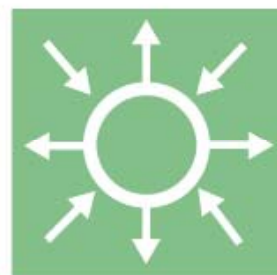


ASP

Anslutning av större produktions-
anläggningar till elnätet

Elforsk rapport 06:79



Åke Larsson
Richard Larsson

December 2006

ASP

Anslutning av större produktions-
anläggningar till elnätet

Elforsk rapport 06:79

Förord

För att hantera en storskalig vindkraftsutbyggnad på ett för nätägarna smidigt sätt och på samma gång ett för anläggningsägarna transparent sätt krävs tydliga anvisningar för hur nätanslutningen skall utföras och för de egenskaper som vindkraftanläggningar skall uppfylla. Föreliggande rapport utgör sådana anvisningar för Anslutning av Större Produktionsanläggningar (ASP) till elnätet, varvid fokus är på anläggningar större än 25 MW.

Projektet har genomförts av Vattenfall Power Consultant med Åke Larsson och Richard Larsson som författare. Projektet har letts av en styrgrupp med följande deltagare: Dan Andersson, E.ON Nät, Eskil Agneholm, Fortum Distribution, Anders Richert, Svensk Energi, Erik Thunberg, Svenska Kraftnät, Björn Axelsson, Vattenfall Eldistribution och Åke Sjödin Elforsk.

Projektet har bedrivits inom det svenska vindkraftsforskningsprogrammet "Vindforsk-II" som finansieras av ABB, EBL-Kompetense, E.ON, E.ON Nät, Falkenberg Energi, Göteborg Energi, Jämtkraft, Karlstad Energi, Luleå Energi, Lunds Energi, Skellefteå Kraft, Statens Energimyndighet, Svenska Kraftnät, Tekniska Verken i Linköping, Umeå Energi, Varberg Energi, Vattenfall och Öresundskraft. För detta projekt har särskild finansiering även erhållits från C4 Energi, Falu Energi & Vatten, Fortum Distribution, PiteEnergi, och Vattenfall Eldistribution.

Stockholm december 2006

Åke Sjödin

Överföring & Distribution

Sammanfattning

Vindkraft är ett teknikområde som är under snabb utveckling och stor förändring. Både teknik och uppförande har under de senaste åren förbättrats. Utvecklingen pekar på att mindre enskilt uppförande kompletteras med stora vindkraftgrupper anslutna till region- och stamnätet. Vindkraftverken blir allt mer sofistikerade och får egenskaper som ökar möjligheten till lyckade nätan slutningar med bibehållen eller förbättrad elkvalitet.

Anslutning av stora produktionsanläggningar kräver normalt mer ingående studier än vad som krävs vid anslutning av enskilda mindre produktionskällor. Omfattning på nätägarens insatser beror på produktionsanläggningens och anslutande elnäts egenskaper. ASP fokuserar på anläggningar större än 25 MW anslutna till regionnätet.

I samband med förfrågan om anslutning av större produktionsanläggningar uppstår frågeställningar hos nätägaren om överföringsförmåga, spänningsvariationer, förluster, felströmmar, reläskydd, dynamisk stabilitet etc.

Få större vindkraftparker har byggts varför erfarenheter från anslutningar av denna anläggningstyp är få. Det kan därför vara svårt att överblicka vad som måste studeras vid sådana anslutningar.

För att säkerställa att produktionsanläggningar inte har oacceptabel negativ påverkan på elnätet har Svenska Kraftnät tagit fram föreskrifter som bland annat beskriver inom vilka intervall av spänning och frekvens som en produktionsanläggning skall kunna producera effekt. Även krav på bibehållen nätan slutning vid dimensionerande fel föreskrivs. Kraven och konsekvenserna av dessa föreskrifter belyses.

Effektinmatning från en produktionsanläggning påverkar bl.a. lastflödet på det anslutande nätet. Generellt finns tre huvudsakliga frågeställningar som måste beaktas vid anslutning av produktionsanläggningar:

- *Produktionsanläggningens påverkan på resulterande effektlöde i anslutande elnät avseende spänningsvariationer, driftströmmar, förluster etc.*
- *Olika typer av produktionsanläggningar och elektriska drivsystem bidrar med olika nivåer på felströmmar till elnätet. Därför krävs att de resulterande felströmsnivåerna i nätet studeras.*
- *Produktionsanläggningar skall enligt krav från Svenska Kraftnät klara olika typer av driftfall och felfall. Dessa egenskaper skall vara verifierade av operatören.*

Studier på effektlöden och dynamisk stabilitet kräver normalt datormodeller. Fullständig dynamisk datormodell av t.ex. en vindkraftpark kan vara tidsödande att ta fram samt att en sådan modell ofta kräver stor datorkraft. Därför beskrivs i denna rapport lämpliga förenklade metoder för relevanta studier. Generellt beskrivs hur en produktionsanläggning kan modelleras/representeras avseende felströmmar och dynamisk stabilitet vid fel.

Anslutning av en produktionsanläggning ger även upphov till frågor kring administrativ hantering. För att en nätägare skall kunna utföra erforderliga studier vid en anslutningsförfrågan krävs informationsutbyte mellan denne och exploatören. Förslag på arbetsmetodik och handläggning ges.

Generellt är det stor skillnad mellan utformning av land- och havsbaserade produktionsanläggningar eftersom möjligheterna för uppförande är betydligt mindre begränsade för landanläggningar. Befintliga projekt används som exempel för att belysa och utreda frågeställningarna i samband med anslutning av större produktionsanläggningar.

Rapporten är tänkt att vara nätägaren behjälplig med att identifiera de frågor som är relevanta och därmed utgöra ett underlag för planering och utförande av nödvändiga systemstudier inför en eventuell anslutning. Frågeställningarna fokuseras på större vindkraftetableringar men är även utformad till att vara ett generellt hjälpmedel vid anslutning av andra typer av produktionsanläggningar.

Summary

Wind power technology is developing fast; single turbines are complemented with large wind farms connected to the national grid. The turbines are getting more sophisticated which increases the possibility to successful grid connection.

Grid connections of large power generating units normally require more detailed studies compared to small single units. The required R&D-level depends on the specific characteristics of the production units and the connecting grid.

An inquiry for a grid connection will raise questions for the grid owner regarding transmission capability, losses, fault currents, relay protection, dynamic stability etc.

Then only a few larger wind farms have been built, the experiences from these types of grid connections are limited and for that reason it can be difficult to identify issues appropriate for further studies.

To ensure that electric power generating units do not have unacceptable impact on the grid, directions from the Swedish TSO (Svenska Kraftnät) have been stated. The directions deal, for example, with power generation in specific ranges of voltage level and frequency and the possibility to remain connected to the grid when different faults occur. The requirements and the consequences of these directions are illustrated.

Power from a generating unit influences the power flow in the connecting grid. There are three main issues that should be considered:

- Influence on the power flow from generating units regarding voltage level, currents, losses etc.
- Different types of electric systems in generating units contribute to different levels of fault currents. For that reason the resulting fault current levels have to be studied.
- It is required that generating units should remain connected to the grid at different modes of operation and faults. These modes have to be verified.

Load flow and dynamic studies normally demand computer models. Comprehensive models, for instance of wind farms, can be difficult to design and normally large computer capacity is required. Therefore simplified methods to perform relevant studies are described. How to model an electric power generating unit regarding fault currents and dynamic stability is described.

An inquiry for a grid connection normally brings about a discussion concerning administration. To make it possible for a grid owner to perform system studies, an exchange of information between a TSO or a DSO and the builder/exploiter is required. A suggestion for work method is stated.

There are in general quite different conditions for generating units on land and off shore. On land the construction possibilities are larger since foundation is easier. Existing projects are described to outline specific questions when connecting large generating units.

The report is supposed to help grid owners with identification of relevant issues that can be a starting point for grid planning and system studies. The report is focused on wind power but can as well be a general help when connecting other types of electric power generating units.

Innehåll

1	Större produktionsanläggningar	3
1.1	Kriegers flak	3
1.2	Lillgrund	6
1.3	Alavattnet	7
1.4	Vindkraft vid Råbelövsjön	8
1.5	Rya kraftvärmeverk	9
2	Administrativa frågeställningar	10
2.1	Handläggning	10
2.2	Anslutningsgaranti.....	12
2.3	Ägandeförhållande för internt elnät i vindkraftparker	12
2.4	Elsystemstudiernas avgränsningar för vindkraft	13
3	Nätplanering	14
3.1	Dimensioneringskriterier.....	14
3.2	Lastflöde (effektflöde) i nätet	15
3.3	Datormodell för lastflödesberäkningar	24
3.4	Felströmmar	25
3.5	Dynamik	26
4	Felbortkoppling	34
4.1	Impendansjordade nät	35
4.2	Direktjordade nät	36
4.3	Beskrivning av reläskydd	36
4.4	Inställningar av spännings- och frekvensskydd	39
5	Föreskrifter – Svenska Kraftnät	41
5.1	Allmänt.....	41
5.2	Störningstålighet.....	42
5.3	Kortslutningar	43
5.4	Spänningsreglering	45
5.5	Effektreglering	45
5.6	Kommunikation och styrbarhet.....	46
5.7	Verifiering och dokumentation	46
6	Elkvalitet	47
6.1	Flicker	47
6.2	Övertoner från omriktare och annan kraftelektronik.....	49
6.3	Transienter och resonans i samband med fel	50
7	Informationsutbyte mellan nätägare och exploatör	54
7.1	Allmänna uppgifter	54
7.2	Tekniska uppgifter I.....	54
7.3	Tekniska uppgifter II.....	54
7.4	Blankett.....	56
7.5	Exempel på data för "Tekniska uppgifter II"	57
8	Nätägarens checklista	58
8.1	Checklista - Tekniska studier.....	59
9	Förklaringar	60
10	Referenser	62

1 Större produktionsanläggningar

För att relatera frågeställningar till verkligheten används exempel från befintliga produktionsanläggningsprojekt. I detta kapitel exemplifieras kortfattat två havsbaserade och två landbaserade vindkraftprojekt samt ett kraftvärmeprojekt. Förklaringar till använda begrepp finns i kapitel 9.

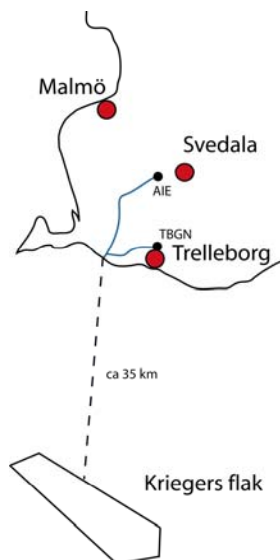
1.1 Kriegers flak

Vindkraftparken Kriegers flak planeras bestå av 128 vindkraftverk med effekten 5 MW per aggregat. Vindkraftparken är planerad att byggas i etapper från år 2009 och kommer fullt utbyggd kunna producera cirka 2,1 TWh per år.

Det område som utsetts för vindkraftparken ligger på den nordöstra delen av Kriegers flak, en upphöjning i södra Östersjön, ca 35 km söder om Trelleborg. Området ligger utanför Sveriges territorialgräns men innanför Sveriges ekonomiska zon, där denna gränsar till Tysklands och Danmarks ekonomiska zoner.

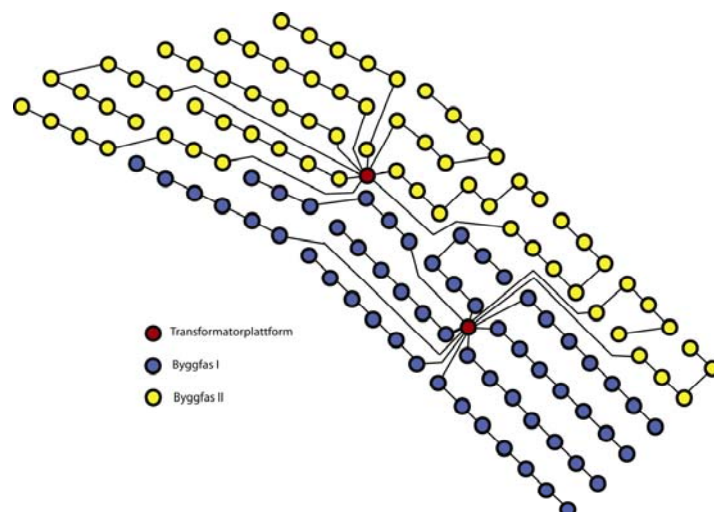
En ingående systemstudie [5,6] har utförts med syftet att bedöma under vilka förutsättningar det finns möjlighet att ansluta den havsbaserade vindkraftparken till det sydsvenska kraftnätet. Generellt behandlades i detta projekt flertalet frågeställningar som är applicerbara för andra större produktionsanläggningar.

Vindkraftparken på Kriegers flak planeras att bli ansluten på 130 kV nivå i stationerna Arrie (300 MW) och Trelleborg norra (340 MW), se figur 1.1.



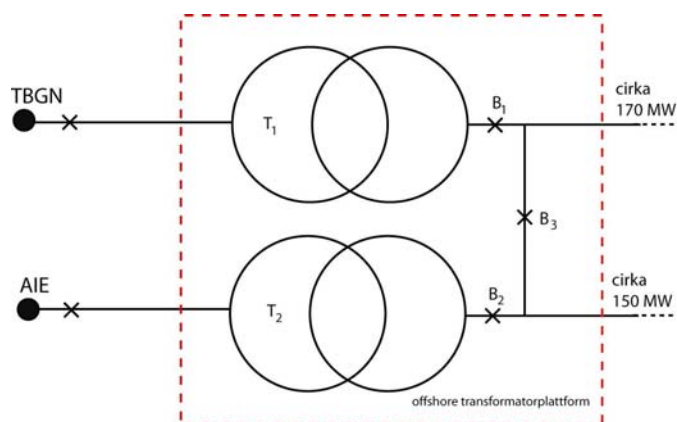
Figur 1.1: Kriegers flak planeras att bli ansluten till regionnätet i stationerna Arrie (AIE) och Trelleborg Norra (TBGN) på 130 kV nivå.

Vindkraftparkens uppsamlande kabelnät planeras till ett 30 kV radialnät med ungefär sju vindkraftverk per radial. Den totala planerade kabellängden för det interna 30 kV kabelnätet är ungefär 100 km. Radialerna planeras att bli ansluten till två transformatorstationer som placeras på fundament ute till havs i vindkraftparken. Båda plattformarna utrustas med två transformatorer som ansluter till land med varsin transmissionskabel på 130 kV. Figur 1.2 visar översiktligt planerad design av det interna kabelnätet.



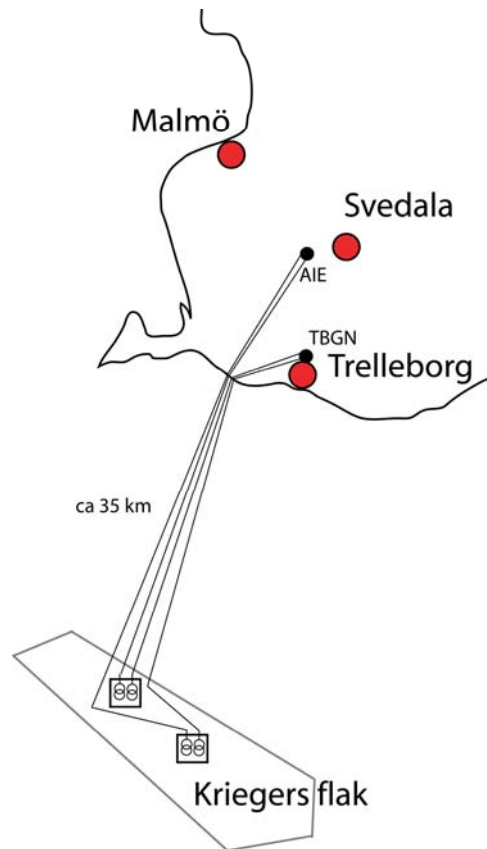
Figur 1.2: Design av det interna kabelnätet för Kriegers flak.

Figur 1.3 visar schematiskt hur en havsbaserad transformatorplattform är planerad att konstrueras.



Figur 1.3: Schematisk bild av en havsbaserad transformatorplattform.

Genom att ansluta en transformator på varje transformatorplattform till respektive anslutningspunkt i Trelleborg norra och i Arrie erhålls goda möjligheter till reservmatning även om en av de två anslutningspunkterna fallerar. Figur 1.4 visar hur vindkraftparken är planerad att anslutas.

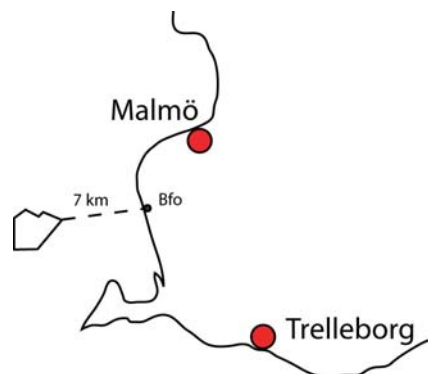


Figur 1.4: Anslutning av hela Kriegers flaks vindkraftpark (640 MW).

Om ett haveri inträffar på en havsbaserad transformator eller på en transmissionskabel kan den alternativa matningsvägen på sekundärsidan av transformatorerna utnyttjas. Via brytare B3 överförs effekt från den felbehäftade vindkraftdelen varför produktion kan bibehållas med alla vindkraftverk, se figur 1.3. Även om en transformator inte dimensioneras för att klara all effekt vid ett eventuellt bortfall av en transmissionsledning finns fördelar med att kunna hålla alla vindkraftverk i drift. Intäktsbortfallet minskar genom att alla vindkraftverk kan producera effekt. Ur ett underhållsperspektiv finns även andra fördelar om vindkraftverken kan vara spänningssatta eftersom t.ex. smörjning av lager och avfuktning underlättas.

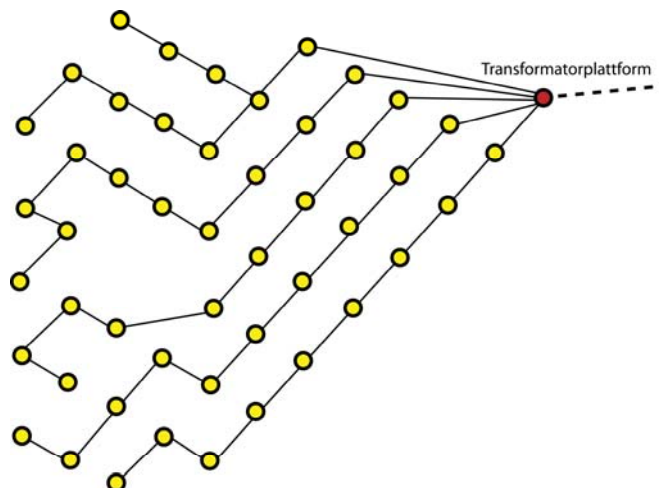
1.2 Lillgrund

Lillgrund ligger ca 7 km från den skånska kusten och kommer ha 48 vindkraftverk med märkeffekten 2,3 MW per aggregat. Byggstart var under våren 2006 i och med att bottenarbeten inleddes. Vindkraftparken planeras vara färdigbyggd år 2007 och kommer då att producera ungefär 350 GWh per år. Vindkraftparken kommer att anslutas till 130 kV nivå på regionnätet i Bunkeflo. Figur 1.5 visar översiktligt Lillgrunds läge och nätanslutning.



Figur 1.5: Lillgrund planeras bli ansluten till regionnätet i Bunkeflo (Bfo) på 130 kV nivå.

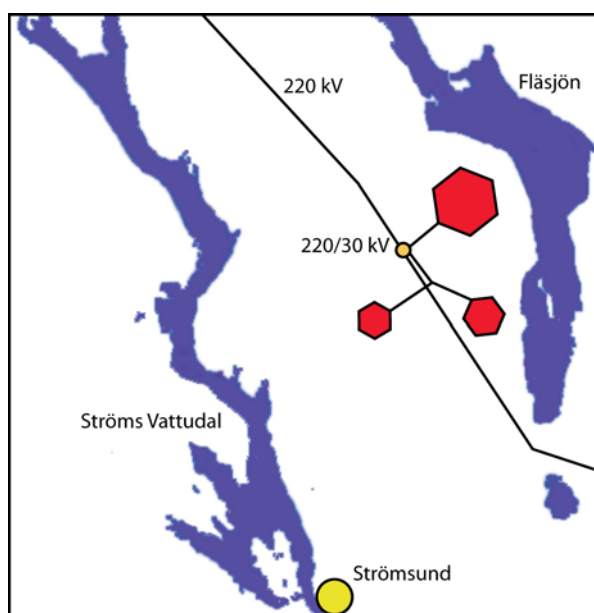
Även Lillgrund kommer ha en 130/30 kV transformering ute till havs. Till transformatorn kommer en 130 kV transmissionskabel och fem 30 kV uppsamlingsradialer att anslutas. På varje radial ansluts ungefär 10 vindkraftverk. Den totala kabellängden för det interna kabelnätet blir cirka 20 km. Figur 1.6 visar hur det interna kabelnätet kommer att utformas.



Figur 1.6: Design av internt kabelnät för Lillgrund.

1.3 Alavattnet

Området för den planerade landbaserade vindkraftparken Alavattnet är belägen norr om Strömsund och planerad att bestå av 48 vindkraftverk. Vindkraftparken är uppdelad på mindre grupper som är placerade på tre höjder. Figur 1.7 visar en översiktlig planering av vindkraftparkens uppförande.



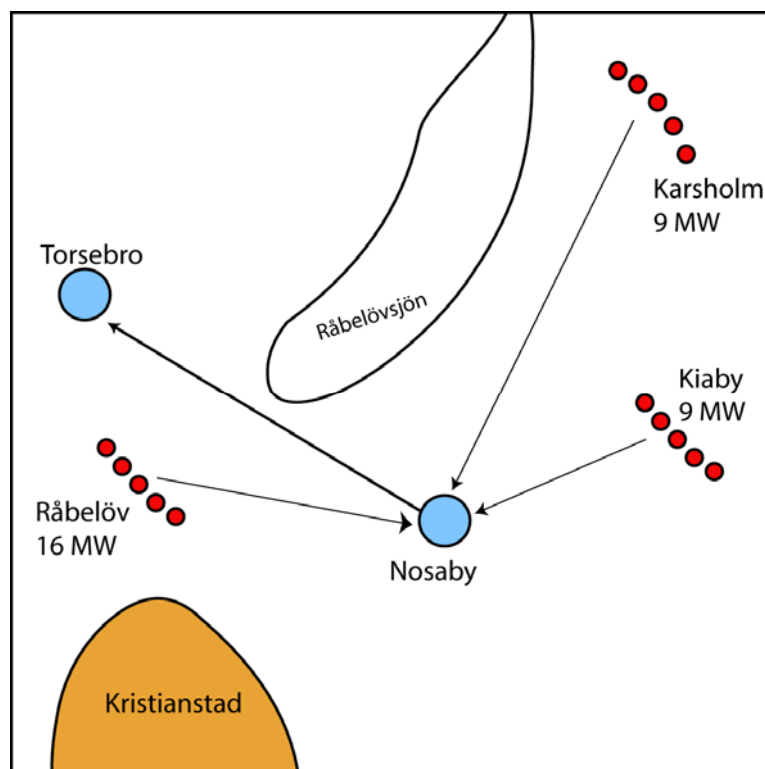
Figur 1.7: Översiktlig planering av vindkraftparken Alavattnet.

Vindkraften är planerad att uppföras inom de tre röda områdena. Vindkraftverken är tänkta att slingmatas med en slinga per område för ökad möjlighet till reservdrift. Det uppsamlade interna kabelnätet är planerat att ha spänningsnivån 30 kV och ansluts till luftledningar på 30 kV som i sin tur ansluts till den tillkommande huvudtransformeringen (220/30 kV). Den nya transformatorstationen är planerad i närheten av den befintliga 220 kV luftledningen.

Generellt är det relativt stor skillnad mellan utformning av land- och havsbaserade vindkraftparker eftersom möjligheterna för uppförande är betydligt mindre begränsat för landanläggningar. Det beror på att utrustning inte behöver placeras på fundament. Dock är kraven för anslutning till region- och stamnät samma för land- och havsbaserad vindkraft.

1.4 Vindkraft vid Råbelövsjön

En mindre vindkraftpark på 34 MW planeras att uppföras i närheten av Kristianstad söder om Råbelövsjön. Vindkraften planeras att delas upp i tre mindre delar om 16, 9 och 9 MW. Ett planerat förslag är att vindkraften ansluts till befintlig fördelningsstation i Nosaby vilken kompletteras med en ny 50/20 kV transformering. De tre grupperna planeras ha ett internt elnät bestående av tre 20 kV radialer på 4-5 km vardera. Befintlig fördelningsstation matas av en 50 kV ledning som ansluter till 130 kV nivå i Torsebro. Figur 1.8 visar en översiktsbild av ett anslutningsförslag.



Figur 1.8: Översiktsbild över området där vindkraften vid Råbelövsjön planeras att uppföras.

1.5 Rya kraftvärmeverk

Rya kraftvärmeverk är en av Skandinavians största gaskombianläggningar. Byggnationen påbörjades i mitten av maj 2004 och är planerad att slutföras under 2006. Anläggningen kombinerar en gasturbinprocess för elproduktion med en ångprocess för el- och värmeproduktion som drivs av naturgas.

Uteffekterna för respektive del är cirka 260 MW el och 290 MW värme. Under ett år kommer anläggningen att producera ungefär 1250 GWh el och 1450 GWh värme. Det motsvarar cirka 30 procent av Göteborgs behov av el och cirka 35 procent av fjärrvärmebehovet.

Elanläggningen är ansluten på 130 kV nivå via ett gasisolerat ställverk till nätstationen Repeshäll cirka 2 km norr om kraftverket. Figur 1.9 visar produktionsanläggningens lokalisering utmed Göta älv i Göteborg.



Figur 1.9: Placering av Rya kraftvärmeverk i Göteborg.

2 Administrativa frågeställningar

Stora produktionsanläggningar kräver normalt mer ingående studier än vad som krävs vid anslutning av enskilda mindre produktionskällor. Omfattning på nätägarens insatser beror på produktionsanläggningens och anslutande elnäts egenskaper.

2.1 Handläggning

Handläggningstiden hos nätägaren för en anslutningsförfrågan beror på omfattningen av de studier som måste utföras samt tillgång och kvalitet på indatata till studierna. Det rekommenderas att en exploatör får svar inom 6 månader efter ställd förfrågan om nätanslutning. Ofta är det långa ledtider mellan en förfrågan fram till byggstart. Innan alla tillstånd beviljats finns också ofta osäkerhet om produktionsanläggningen verkligen får byggas och vilken utformning den kommer att ha. Därför kan en studie komma att revideras under projektets gång.

Typiska skäl för handläggningstid längre än 6 månader kan vara att ett mer ingående utredningsarbete som berör vindkraftanslutningen pågår eller skall börja. Det är t.ex. inte ovanligt att det i ett attraktivt område på kort tid kommer in en större mängd förfrågningar från olika aktörer. Detta kan medföra nätförstärkningar, förändringar av nätstruktur etc. Dessa skäl för en längre handläggningstid och väsentligt ökade kostnader bör i tidigt stadium presenteras för exploatören.

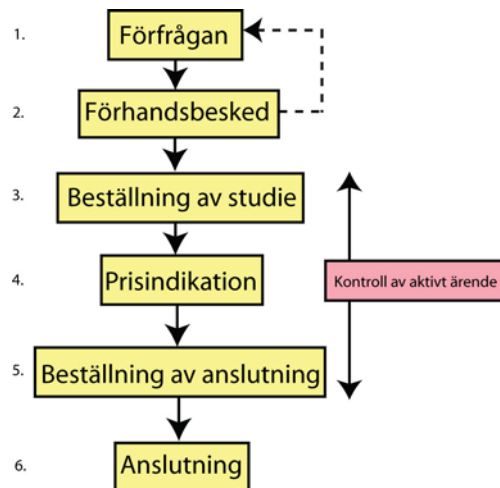
Av dessa anledningar kan det därför vara lämpligt att arbeta med förhandsbesked innan en mer omfattande och ingående studie inleds. Med förhandsbesked avses översiktlig bedömning av anslutningsmöjligheter och eventuella förstärkningsåtgärder. Innan en ingående anslutningsstudie påbörjas bör kostnaderna och fördelningen av dessa preciseras för exploatören.

För anslutning av större anläggningar krävs normalt byggnation av ledningar med spänningen 30 kV eller högre och då krävs i de flesta fall nätkoncession för linje. Koncession beviljas av Energimyndigheten och ansökan kräver förutom teknisk beskrivning även MKB, markägarförteckning etc. Ansökan ska remitteras, yttranden inhämtas från exempelvis försvarsmakten, berörda länsstyrelser, kommuner och andra sakägare. Det är svårt att generellt ange handläggningstiden men erfarenhetsmässigt är det inte ovanligt dessa är mellan 6 månader och 2 år. Överklaganden kan ge betydligt längre ledtider.

För att minimera risken för missförstånd i samband med långa ledtider är det rimligt att exploatören uppvisar för nätägaren att projektet är aktivt. Därmed minimeras risken för onödigt arbete. Det rekommenderas att detta sker minst en gång per år. Inlämnande av t.ex. MKB eller länsstyrelsens kungörelse av projektet är lämpliga kontrollpunkter.

Innan koncession beviljats får inte schaktning, skogsavverkning eller liknande åtgärder för att bereda plats för ledningen påbörjas. Inte heller får en transformatorstation som skall anslutas till en ny ledning, för vilken det krävs nätkoncession för linje, börja byggas innan koncession erhållits.

Figur 2.1 visar ett förslag på hur handlägningsprocessen kan se ut för anslutning av en större produktionsanläggning.



Figur 2.1: Förslag på administrativ process för handläggning från förfrågan till anslutning.

Beskrivningen av flödesschemat nedan avser i första hand nätanslutning av vindkraftparker.

1. Exploatören ställer en förfrågan om vindkraftparkens anslutning till nätägaren.
2. Nätägaren gör en översiktlig och rådgörande bedömning av möjligheten och lämpligheten att ansluta vindkraftparken samt vilka åtgärder som eventuellt måste vidtas vid en anslutning. Om anslutningen innebär uppenbara omfattande nätförändringar kan vindkraftparkens utformning revideras i samråd mellan nätägaren och exploatören med avseende på t.ex. installerad effekt eller antal vindkraftverk för att uppnå optimal design.
3. En större mängd vindkraft kräver normalt ingående elstudier som kan bli kostsamma. Innan en ingående anslutningsstudie påbörjas är det rimligt kostnaderna och fördelningen av dessa preciseras för exploatören.
4. De studier på elsystemet som utförs resulterar i att det inte föreligger några hinder för anslutningen med nuvarande elnät eller att förstärkningar/ombyggnader/restriktioner krävs. Förstärkningskostnaderna som åläggs vindkraftexploatören bör i detta läge redovisas.
5. Om flera exploatörer berörs bör kostnadsfördelning av åtgärderna vid anslutning ske i samråd mellan berörda aktörer. Beställning på anslutningen från exploatören sker skriftligen.
6. Vid utformning av anslutningen bör önskemål och framtida förändringar för både nätägare och exploatör beaktas.

2.2 Anslutningsgaranti

Från exploatörer finns ofta önskemål om att reservera utrymme i nätet. Dock kan sådana garantier ifrågasättas om de är förenliga med ellagens krav på anslutningsskyldighet.

Genom att tillämpa anslutningsgarantier minskar risken för spekulation och de projekt som sannolikt aktualiseras ges möjlighet att utvecklas under mindre pressade former när "först till kvarn" inte råder.

Exempel på anslutningsgaranti finns när exploatören efter erlagd avgift erhållit garanterat utrymme i nätet. För att behålla platsen i nätet och garanti om anslutning måste exploatören visa att projektet är aktivt. Det skall inte vara möjligt att på spekulation köpa många anslutningsgarantier och på så sätt styra andra exploatörers möjlighet till anslutning. När anslutningen är klar räknas avgiften av från anslutningsavgiften. Om exploatören inte kan visa att projektet är aktivt förlorar han sin anslutningsgaranti samtidigt som erlagd avgift inte återgår.

För nätägaren finns en uppenbar risk att arbeta med anslutningsgarantier. Det är tänkbart att en exploatör i tidigt stadium tar kontakt med nätägaren angående anslutning och därmed erhåller anslutningsgaranti. Vid ett senare tillfälle innan produktionsanläggningen är ansluten kräver annan exploatör anslutning för ytterligare en produktionsanläggning. Denna exploatör som tar en senare kontakt med nätägaren kan ha ett längre framskridet projekt vilket innebär att denne med stöd av lagen omedelbart kan göra anspråk på utrymmet som förvisso finns i nätet men är intecknat via anslutningsgaranti för det första projektet. Uppstår denna situation kan nätägaren drabbas av kostsamma nätförstärkningar utan möjlighet att ålägga någon exploatör för kostnaderna för den händelse att utrymme inte finns för båda produktionsanläggningarna.

2.3 Ägandeförhållande för internt elnät i vindkraftparker

Med stöd av ellagen 1997:857 är det inte tillåtet för en juridisk person som bedriver nätverksamhet att bedriva produktion av eller handel med el. Det är därför inte möjligt för en exploatör att på egen hand äga och driva det interna elnätet inom egen vindkraftpark. Därmed krävs att annan aktör ansvarar för drift och underhåll av ett sådant nät. Det kan t.ex. vara befintlig nätägare i området eller ett separat bolag som endast har för avsikt att äga och driva nätet som ansluter vindkraftverken. En möjlighet som diskuterats är att kunna få ihopsamlingsnäten klassade som industrinät men det kräver en lagändring. Det pågår utredningar om hur nätägarfrågan i framtiden kan tänkas hanteras.

Exempel Lillgrund

Eftersom ellagen inte möjliggör för en juridisk person att bedriva både produktions- och nätverksamhet krävs att dessa verksamheter separeras. Det interna uppsamlande kabelnätet som sammanbinder vindkraftverken utmed radialer syftar inte till annat än att just betjäna vindkraftverken. Därför föreslogs att detta interna kabelnät borde klassas som ett ingårds/industrinät och därför undantas kravet på koncession. Det ansågs dock inte möjligt av Energitryggheten varför kravet på koncession för hela vindkraftparkens interna

elnät kvarstod. För att lösa problemet med nätägarfrågan bildades därför ett separat nätbolag.

2.4 Elsystemstudiernas avgränsningar för vindkraft

Vid framförallt landbaserad etablering av vindkraft erhåller nätbolag ofta förfrågningar om nätanslutning från många olika exploatörer i samma område. Det innebär att det i attraktiva områden kan finnas enskilda exploatörer som tillsammans bildar grupper av vindkraftverk. Även om nätägaren äger det uppsamlandet nätet mellan de olika vindkraftverken måste elsystemstudier och krav ställas på vindkraftbeståndet som grupp. En vindkraftgrupp avser vindkraftaggregat med tillhörande utrustning inklusive nät och eventuell transformering. Nätet inklusive tillhörande utrustning och eventuell transformering skall vid dess uppförande endast vara avsett för att sammankoppla vindkraftaggregat.

3 Nätplanering

När projektering av en produktionsanläggning inleds är ofta mängden information begränsad. Ofta är endast t.ex. plats, antal aggregat och preliminär effekt känt. Kartläggning av befintligt elnät måste utföras i ett tidigt stadium i syfte att identifiera en eller flera alternativa anslutningar av produktionsanläggningen. Kostnaderna för eventuella ny- och ombyggnationer åläggs i olika utsträckning normalt exploatören. En kostsam ombyggnad av det befintliga elnätet kan påverka exploatörens kalkyl i sådan utsträckning att denne behöver revidera projektet avseende t.ex. antal aggregat, aggregatens märkeffekt etc.

Initialt innebär nätplaneringsarbetet att inventera befintligt regionnät. Nätets utbredning, teknisk status och ålder bör beaktas vid utformning av anslutningsalternativ. Anslutning av produktionsanläggningen kan innebära förstärkningar av det anslutande nätet som i sin tur kan påverka nätets geografiska utbredning. Innan anslutningen utformas skall eventuella planer på strukturella förändringar av elnätet i det aktuella området identifieras. Tidigareläggning av förändringar i nätet beroende på tillkommande produktions- och konsumtionsanläggningar kan ge uppslag till nya framtida nätstrukturer. På samma sätt bör planerade nedläggningar av produktionsanläggningar beaktas.

Planeringen av elnätet som ligger till grund för en mer ingående studie skall motsvara ett framtidsscenario av elnätet då produktionsanläggningen planeras att anslutas. Scenariot skall innehålla kända förändringar i stam- och regionnätet. Med förändringar avses om- och nybyggnation av ledningar, produktions- och konsumtionsanläggningar samt eventuella avvecklingar.

Ur dokumentationssynpunkt är det lämpligt att även ange eventuella ändringar som inte beaktas i studien. Det kan vara systemförändringar avseende nät och produktion som varit föremål för diskussion men som är alltför osäkra för att beaktas i en systemstudie.

3.1 Dimensioneringskriterier

Ellagen 1997:857 anger följande:

”Den som har nätkoncession för linje är, om det inte finns särskilda skäl, skyldig att på skäliga villkor ansluta en elektrisk anläggning till ledningen.”

En nätägare är enligt ellagen alltså tvingad att ansluta en eventuell produktionsanläggning om inte orimliga förhållanden råder.

Dock har nätägaren rätt att ta ut avgift för den merkostnad som detta innebär. En anslutningsutformning beror därmed av hur exploatören värderar leveranssäkerhet, överföringsförmåga, planerade avbrott etc. Vid utformningen av anslutning till regionnätet bör dessa möjligheter och begränsningar

diskuteras av nätägare och exploatör. De två viktigaste dimensioneringskriterierna är:

- *Ledningarnas överföringsförmåga (termisk dimensionering, alternativ driftläggning, kopplingsläge etc.)*
- *Leveranssäkerhet (reservmatning, redundans etc.)*

Normalt varierar vindhastigheten lokalt mellan vindkraftparker även om de är uppförda närbeläget. I samband med att leveranssäkerhet diskuteras bör det t.ex. belysas att det är tänkbart att all vindkraft i ett område inte nödvändigtvis behöver möjliggöras inmatning av märkeffekt samtidigt. Beroende på lokala variationer i vindhastighet och eventuella effektbegränsningar när all vindkraft skulle kunna producera märkeffekt, kan eventuellt kostsamma nätförstärkningar reduceras. Det kräver dock att styrningen av effekt från t.ex. olika vindkraftparker eller andra anläggningar samordnas.

För att exploatören skall kunna bedöma önskad leveranssäkerhet bör nätägaren bistå med statistik på fel, planerade avbrott, alternativ driftläggning etc.

Historiskt sett har konsumtionsanläggningar normalt haft anslutningar med betydligt högre driftsäkerhet än produktionsanläggningar. Detta beroende på att korta tider för fel, underhåll, renoveringar etc. sällan ekonomiskt motiverar flera matningsvägar eller kostsamma nätförstärkningar.

3.2 Lastflöde (effektflöde) i nätet

I vissa lägen kan överföringsförmågan på ledningar och transformatorer utgöra en flaskhals för inmatad effekt. Situationen kan uppstå i områden där befintlig produktion redan finns ansluten eller där nätet är svagt. Lastflöde (eng. load flow) innebär att aktiv och reaktiv effekt överförs i nätet mellan produktionsanläggningarna och belastningarna (in- och utmatningar i nätet). Den totala belastningsprofilen i elnätet är avgörande om delar av nätet blir överbelastade. Belastningsgraden och därmed överföringsförmågan i olika nätdeklar beror alltså dels på förekommande produktion och konsumtion och dels på överföring mellan regioner samt mängden import och export av energi.

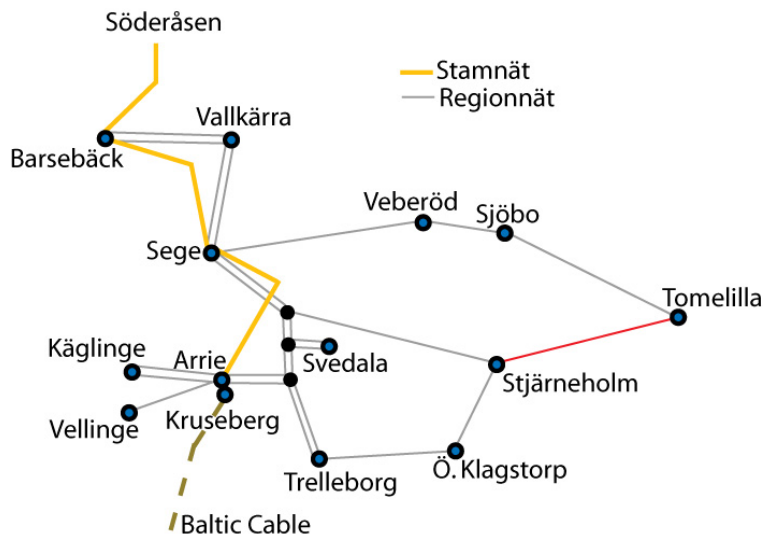
Exempel Kriegers flak

Kriegers flak planeras att delvis anslutas till fördelningsstationerna Arrie och Trelleborg norra. Till Arrie är även överföringskabeln Baltic Cable ansluten som kan importera eller exportera 600 MW. Beroende på bland annat effektöverföringens riktning kan vissa ledningar bli överbelastade.

Det är viktigt att beakta belastningsgraden vid både normal och onormal driftläggning (reservdrift). Med utförda studier på lastflödet visade det sig att Kriegers flak vid normal drift bidrog till överlast på en ledningssträcka. Flertalet ledningar blev överbelastade vid onormal driftläggning när t.ex. en transformator i Arrie togs ur drift. Nedan visas ett utdrag från resultaten av de studier som utförts på lastflödet i området kring Kriegers flaks anslutning. I båda fall avses maximal produktion av vindkraften i området (på land och till havs).

Normal driftläggning

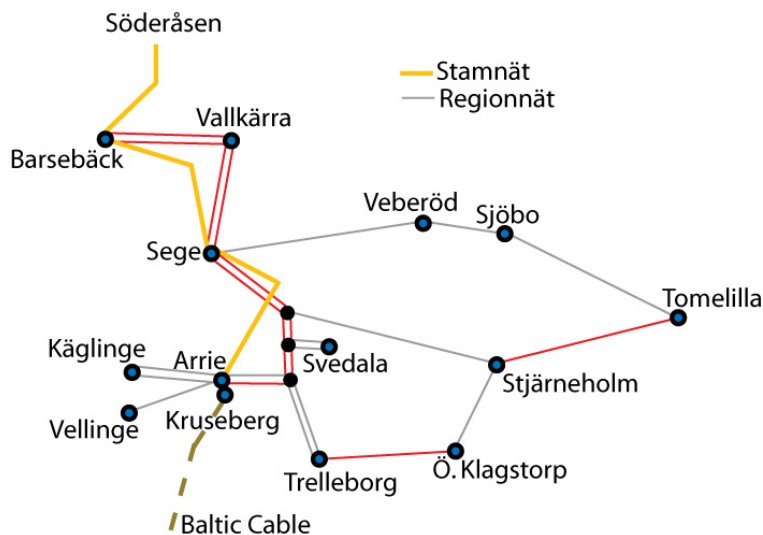
När det råder hög konsumtion i området och hög import från Danmark och Tyskland överlastas ledningen mellan Stjärneholm och Tomelilla med cirka 10 %.



Figur 3.1: Belastningsgrad i området kring Kriegers flak vid normal driftläggning (röd - överbelastad ledning).

Onormal driftläggning

När Transformatorn T1 i Arrie tas ur drift samtidigt som det råder låg konsumtion i området, hög import från Danmark och nollutbyte med Tyskland, överlastas flertalet ledningar. Figur 3.2 visar att delar av ledningsnätet överbelastas i området med denna driftläggning.



Figur 3.2: Belastningsgrad i området kring Kriegers flak vid onormal driftläggning (T1 i AIE tagen ur drift, röd - överbelastade ledningar).

Genom att höja luftledningens linor med så kallade spännkedjor och därmed minska ledningarnas nedhäng ökas överföringsförmågan med ca 30 % på ledningen mellan Stjärneholm och Tomelilla. Vid alternativ driftläggning

(reservdrift) kommer dock fortfarande flertalet ledningar att bli överbelastade. Av detta skäl kommer vindkraftparken troligen att åläggas med produktionsrestriktioner när sådan driftläggning råder. Kostnaden för de mycket omfattande nätförstärkningarna motiveras ej av det lilla produktionsbortfall som en sådan produktionsrestriktion innebär.

3.2.1 Lastflödesberäkningar

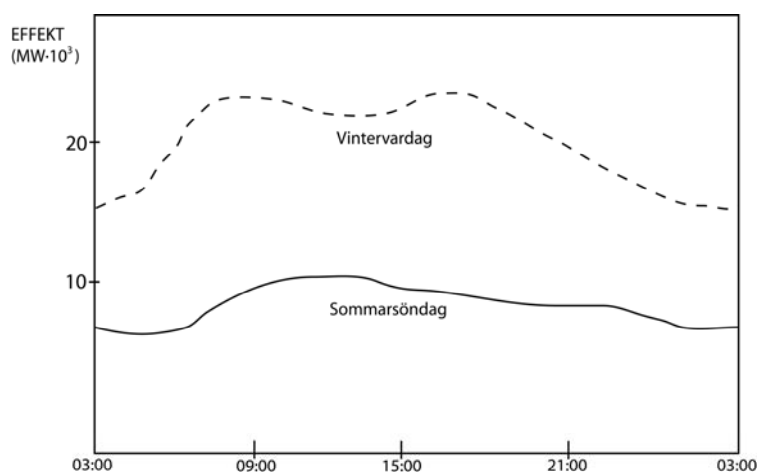
För att säkerställa att nätet inte överlastas krävs normalt lastflödesberäkningar. Regionnät är ofta maskat och därtill kommer spänningsreglerande utrustning som komplicerar beräkningarna varför datorprogram normalt krävs för lastflödesberäkningar i dessa nät. Generellt används lastflödesmodeller för att beräkna:

- Stationära spänningsvariationer
- Driftströmmar och felströmmar
- Förluster

Med elnätets driftläggning varierar antalet utnyttjade ledningar och därmed det överförande elnätets kapacitet. Även normala säsongsvariationer som påverkar lastflödet måste beaktas. Med nedanstående två fall kan säsongsrelaterade ytterlighetsfall identifieras:

- Minimal konsumtion i nätet, maximal effekt från övriga produktionsanläggningar och märkeffekt från vindkraftparken – T.ex. en blåsig sommar dag med mycket vindkraftproduktion och lite konsumtion i nätet.
- Maximal konsumtion i nätet, minimal effekt från övriga produktionsanläggningar och ingen vindkraftproduktion – T.ex. en vindstilla vinterdag med lite vindkraftproduktion och mycket konsumtion i nätet.

Figur 3.3 visar ett exempel på varierande effektuttag ur det svenska stamnätet en vinter- respektive sommar dag.

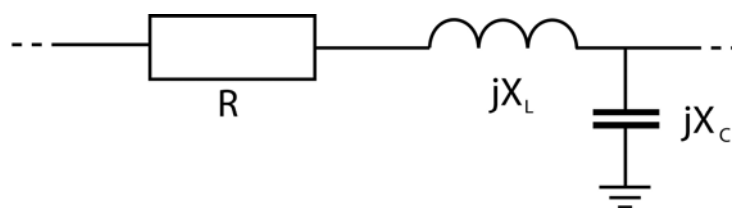


Figur 3.3: Typiska dygnsvariationer i effektuttag beroende på säsong. Exemplifierat effektuttag är från svenska stamnätet med variation på ca 70 MW/min [11].

3.2.2 Driftströmmar

Driftströmmar i ledningar beror av den aktiva och reaktiva effekten som överförs. Kablarnas kapacitiva koppling till jord gör att spänningsberoende reaktiv effektproduktion uppstår. Fenomenet är särskilt påtagligt vid högre spänningar eftersom sambandet är kvadratisk mellan spänning och reaktiv effektproduktion. I ledningarnas reaktans förbrukas reaktiv effekt. Den reaktiva effektkonsumtionen beror kvadratisk av den ström som flyter i ledningen.

Figur 3.4 visar en förenklad elektrisk ekvivalent av en kabel där R är kabelresistans, jX_L är kabelreaktans och jX_C representerar kabelns kapacitiva koppling till jord.

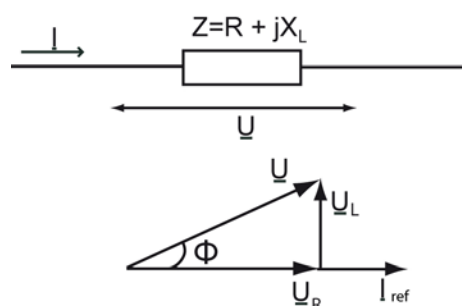


Figur 3.4: Elektrisk ekvivalent för en kabel.

Driftströmmarna i ett elnät beror alltså av produktions- och konsumtionskällor samt egenskaper i ledningsnätet. När ledningssystemen växer blir det allt svårare att överblicka hur effekten flödar i nätet och vilka driftströmmar som uppstår. Som tidigare nämnts rekommenderas därför datorprogram för denna typ av studier.

3.2.3 Spännings- och effektvariationer

Effekt som överförs åstadkommer spänningsvariationer som beror av den ström som flyter i ledningarna och av ledningarnas impedans. Figur 3.5 visar i ett vektordiagram hur spänningsfallet över en ledning beror av den aktiva och reaktiva effekt som överförs på ledningen.



Figur 3.5: Spänningsfall över en ledning med grundekvationen $U=U_R+U_L$.

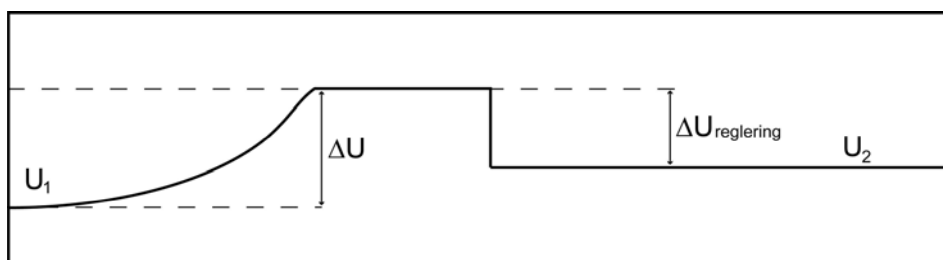
Den stationära spänningen studeras med hjälp av lastflödesberäkningar för att säkerställa så systemspänningen inte antar oacceptabla nivåer. Med *stationär spänning* avses spänningens effektivvärde mätt som medelvärde över 10 minuter.

Exempel Kriegers flak

Normal systemspänning i anslutande nät till Kriegers flak är ca 138 kV. De naturliga spänningsvariationerna som förekommer med säsongsvariationer inräknade är ca 138 ± 2 kV i anslutningspunkten. På sommaren råder normalt lite konsumtion i området samtidigt som det kan förekomma mycket vindkraftproduktion. Det gör att spänningen antar det högre värdet. På vintern när det istället råder relativt mycket konsumtion och dagar med lite vindkraftproduktion sjunker istället spänningen.

När effekt matas in från vindkraftparken stiger spänningen i anslutningspunkten och på nätet i det kringliggande området. För att kompensera för spänningsförändringar finns normalt spänningsreglerande utrustning i form av lindningskopplare på transformatorerna. Beroende på kopplingsstegens trigningsnivåer ökar komplexiteten i nätet relativt snabbt när spänningsreglerande utrustning förs in. Maximal och minimal systemspänning identifierades till cirka 137 respektive 140 kV.

När en större produktionsanläggning kopplas till eller från regionnätet kan initialt spänningsvariationer uppstå. Dessa spänningsvariationer uppstår innan spänningsreglerande utrustning som lindningskopplare hunnit kompensera för en hastig förändring av spänningen. Det är därför möjligt att spänningen kortvarigt kan anta nivåer som avviker från nominellt värde utan att medelvärdet nämnvärt påverkas. Figur 3.6 visar ett exempel på ett sådant inkopplingsförlopp av en produktionsanläggning.



Figur 3.6: Kortvarig spänningsvariation vid inkoppling av en produktionsanläggning.

U_1 är spänningen innan inkopplingen av en produktionsanläggning och ΔU är den spänningsökningen som uppkommer när effekt matas in på nätet. $\Delta U_{\text{reglering}}$ är spänningssänkningen som en eventuell lindningskopplare kan åstadkomma för att kompensera spänningsökningen. Den "nya" stationära spänningen U_2 är i detta fall något högre än U_1 vilket beror på dödbandet i lindningskopplarens reglering. Tidsåtgången för ovanstående omkoppling är normalt någon eller några minuter.

Nedan anges förlopp för vindkraftproduktion som kan orsaka denna typ av spänningsvariationer.

Inkoppling

För kontrollerade inkopplingsförlopp föreskriver Svenska Kraftnät att effektproduktion inte får ökas med mer än 30 MW per minut. Vid normal inkoppling av en vindkraftgrupp ökar effekten långsamt.

Urkoppling

På samma sätt bör inte mer än 30 MW per minut kopplas ur vid stoppvind. Med stoppvind avses höga vindhastigheter (>25 m/s) när vindkraftverken stoppas för att undvika orimlig mekanisk påkänning.

Okontrollerat bortfall (vid fel/haveri)

Vid fel i vindkraftparken eller på en transmissionsledning kan stor andel produktion hastigt falla bort. Det är viktigt att notera att ledningsnätet inte är elkvalitetsmässigt dimensionerat för denna typ av spänningsvariationer. Dessutom förekommer dessa situationer relativt sällan varför betydligt större spänningsvariationer jämfört med normal drift accepteras.

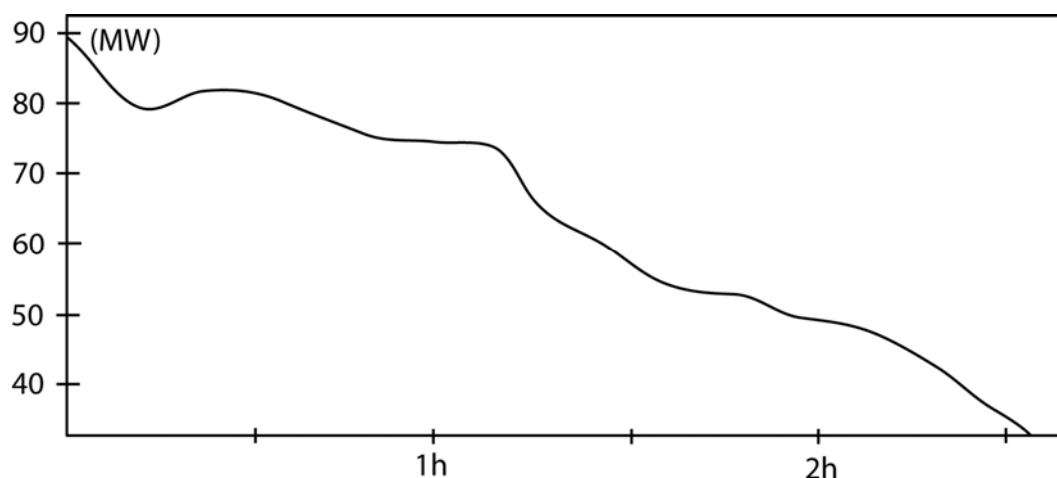
Effektvariation vid ändrad vindhastighet

Effektproduktionen från en vindkraftpark är kubiskt proportionell mot vindens hastighet. Det innebär att liten variation i vinden ger en avsevärt större effektvariation. När vinden ökar hastigt skulle det kunna vara möjligt att reducera effekttökningen jämfört med normala inställningar. Effekttökningen skulle vid sådan reglering då vara väl kontrollerad.

Vindens avtagande ger istället ett okontrollerat effektförlopp. För större vindkraftparker anslutna till svaga nät är det därför tänkbart att relativt stora spänningsändringar kan uppstå om vinden hastigt avtar och lindningskopplaren inte hinner stega om.

Figur 3.7 visar en effektmätning på den danska vindkraftparken Nysted som består av 72 stycken vindkraftverk [12]. Vindkraftparken är belägen sydväst om danska Rödsand och har en märkeffekt på cirka 165 MW. Producerad effekt är mätt under relativt hastig avtagande vindhastighet.

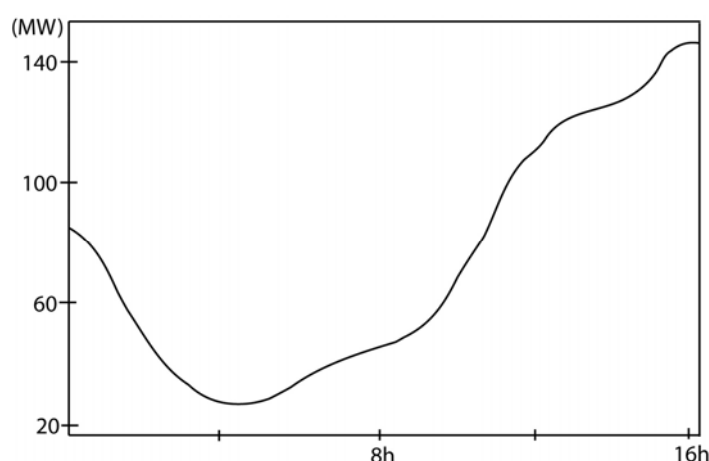
Figur 3.7 ger en indikation om storleken på de okontrollerade effektvariationer som kan förekomma. Maximal effektreduktion per minut är i detta fall ca 0,7 MW per minut (drygt 0,4 % av vindkraftparkens märkeffekt per minut). Det innebär för t.ex. Kriegers flak att effektvariationerna skulle motsvara knappt 3 MW per minut (vid linjär uppskalning av vindkraftparkens märkeffekt). Resultaten från mätningen visar att de effektvariationer som naturligt uppkommer under kort tid beroende på förändring i vindhastighet är relativt små och påverkar spänningen på regionnätet i liten grad. Det bör poängteras att det inte finns något krav från Svenska Kraftnät på denna typ av effektvariationer eftersom vindens avtagande är okontrollerat.



Figur 3.7: Avtagande effektproduktion för vindkraftparken Nysted (maj 2006).

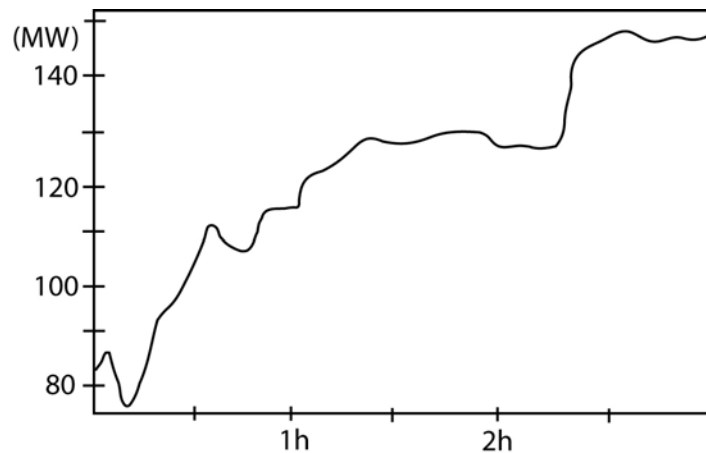
I ett distributionsnät (10-20 kV) med resistiv karaktär är det först och främst inmatning av aktiv effekt som påverkar spänningsnivån. Region- och stamnät är induktiva varför spänningsnivåerna påverkas i betydligt mindre grad av aktiv effektöverföring. Den induktiva karaktären gör att produktion/överföring/konsumtion av reaktiv effekt kraftigt bidrar till rådande spänningsnivå. Dock bör poängteras att spänningsändring beroende på låg resistivitet i t.ex. regionnät inte kan försummas vid inmatning av aktiv effekt.

För att hålla systemspänningen inom acceptabla nivåer används ofta lindningskopplare. På regionnätets spänningsreglerande lindningskopplare är normalt spänningsstegen cirka 1,7 %. Regleringens dödband är cirka 1 %. De naturliga effektvariationerna från en vindkraftpark beroende på variationer i vinden bör inte orsaka så stora spänningsvariationer att spänningsreglerande utrustning som lindningskopplare triggas till att stega om för ofta. Slitaget på dessa kan då minimeras. Figur 3.8 visar naturliga effektvariationer från vindkraftparken Nysted under 16 timmar med relativt kraftigt ökande produktion.



Figur 3.8: Effektproduktion från vindkraftparken Nysted mätt under cirka 16 timmar (maj 2006).

Figur 3.9 visar en del av mätningen i figur 4.8 med högre upplösning.



Figur 3.9: Ökande effektproduktion från vindkraftparken Nysted (maj 2006).

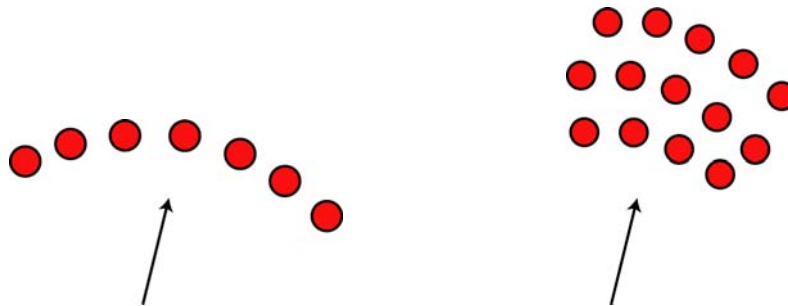
Om det krävs att lindningskopplaren kopplar om relativt många steg för att hålla rimlig spänningsnivå när en produktionsanläggning går från tomgång till märkeffekt krävs att effektökningen från en vindkraftpark inte sker för fort. Vid hastig effektökning hinner då inte lindningskopplaren att kompensera för en större spänningsökning. Det är tänkbart att kravet från Svenska Kraftnät på maximal effektökning (30 MW per minut) ger för stora spänningsförändringar i svagare nät. Om dessa problem uppstår måste effektens förändringshastighet minskas.

Under normala dygnsvariationer är det rimligt att en lindningskopplare stegar om någon eller några gånger från tomgång till märkproduktion. För att omkoppling av lindningar inte skall ske för ofta är det rimligt att 25-50 % av vindkraftparkens effekt kan matas in utan att lindningskopplare stegar om.

Det bör poängteras att mätningarna från Nysted vindkraftpark inte är representativa för alla typer större vindkraftetableringar eftersom effektförändringar kan bero av vindkraftparkens konfiguration, se figur 3.10.

För stora vindkraftparker med stor geografisk utbredning är påverkan från förändrad vindhastighet normalt mindre eftersom en väderfront rör sig med en viss hastighet i en viss riktning. Det innebär initialt vid ett väderomslag att en större vindkraftpark träffas av en front på ena sidan och att inte hela vindkraftparken utsätts för väderomslaget samtidigt.

För mindre vindkraftparker på land är det mer sannolikt att effektproduktionen snabbt kan ändras beroende på hastig förändring av vindhastigheten. På land ökar vindens turbulens i förhållande till havs beroende på topografi, bebyggelse, vegetation etc. Typisk längdskala för sådan turbulens är 0,1-1 km. Hur en vindkraftetablering påverkas av dessa typer av fenomen beror på hur vindkraftparken fysiskt är utformad. Figur 3.10 visar två typer av konfigurationer som skulle påverkas olika av ett vindfenomen med kort längdskala.



Figur 3.10: Olika typer av konfigurationer som skulle påverkas olika av vindfenomen med kort längdskala. Pilarna avser t.ex. en turbulent vinds riktning.

Andra väderfenomen som fallvindar i samband med t.ex. åskväder eller tromber kan innebära mycket hastig förändring av vindhastigheten. Dessa fenomen förekommer dock sällan och har normalt kortare längdskala och påverkar en vindkraftpark i mindre utsträckning.

3.2.4 Gränsvärden för stationära spänningsvariationer – branschpraxis

Beroende på anslutande elnäts egenskaper, produktion, konsumtion etc. kan tillåten nivå på spänningsvariationer variera. Det är dessutom mer accepterat att sällan förekommande spänningsvariationer kan vara större än de som förekommer mer frekvent. Tabell 3.1 visar rekommenderade spänningsvariationer som kan tillåtas från större produktionsanläggningar på regionnätet.

Tabell 3.1: Rekommenderade gränsvärden för stationära spänningsvariationer – branschpraxis.

Variation	ΔU
Vecka – säsong	5 %
Dygn	3 %

3.2.5 Förluster

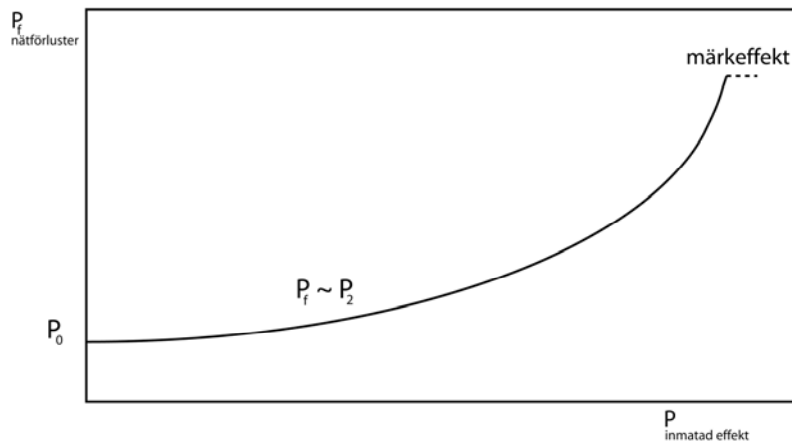
När den överförda effekten i en nät-del ökar till följd av inmatning av effekt från en produktionsanläggning ökar normalt de aktiva effektförlusterna. Förlusternas storlek i förhållande till inmatad effekt beror i första hand på hur mycket effekt som matas in samt var i nätet effekt produceras och eventuellt konsumeras.

De aktiva nätförlusterna har ett kvadratiskt beroende av den överförda effekten i nätet.

$$P_f = P_0 + k \cdot P^2 \quad (3.1)$$

där P_0 är tomgångsförlusterna i nätet, k är en proportionalitetskonstant och P är överförd effekt i ledningarna.

Figur 3.11 åskådliggör ekvation 3.1 och visar att de aktiva nätförlusterna ökar allt snabbare när effektproduktionen från t.ex. en vindkraftpark närmar sig märkeffekt.



Figur 3.11: Nätförlusternas beroende av effektinmatning från t.ex. en vindkraftpark.

Lastflödesberäkningar kan normalt användas för att studera de förluster som uppkommer i nätet beroende på den överförda effekten. Förlustutvärderingen är sällan avgörande för dimensionerade teknikval utan snarare av ekonomisk karaktär i form av uteblivna intäkter för ej överförd energi.

3.3 Datormodell för lastflödesberäkningar

Den modell av elnätet som ligger till grund för lastflödesberäkningarna skall motsvara ett framtidsscenario av elnätet när vindkraftparken kan komma att anslutas. Den prognostiserade modellen skall innehålla planerade produktionsanläggningar och andra eventuella förändringar i elnätet.

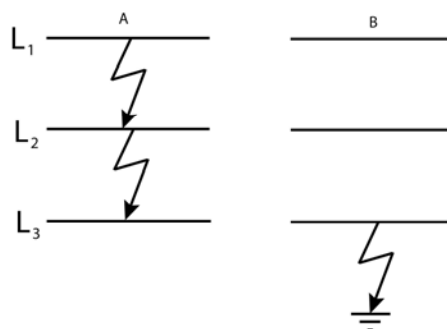
Det finns flera programvaror på marknaden som hanterar beräkningar av lastflöden. Den mest vedertagna är PSS/E (Power System Simulation / Engineering) och återfinns hos de flesta större nätägarna. Programvaran för datormodellen bör kunna presentera driftströmmar, stationär spänning i betraktade nätpunkter, förluster samt felströmmar.

I PSS/E representeras elnätet av ekvivalenta elektriska parametrar för ledningarnas (resistans, induktans och kapacitans). Produktions- och konsumtionsanläggningar kan i ett första skede representeras med effektstorlek för aktiv och reaktiv effekt. Vid studier på felströmmar krävs dock att en produktionsanläggning representeras med en generator. Effektfaktorn bör initialt sättas till $\cos\varphi=1$ eftersom kravet från Svenska Kraftnät är att det reaktiva effektutbytet i anslutningspunkten skall kunna regleras till noll. Från en standardberäkning i PSS/E erhålls stationära spänningsnivåer i respektive nätnod, driftströmmar i ledningarna samt de förluster som samlat uppstår i ett nätområde.

3.4 Felströmmar

Överledning kan ske mellan en eller flera faser samt till jord. Feltyp, kortslutningseffekt (driftläggning) och felresistans påverkar storleken på felströmmar och spänningar. Genom att studera dimensionerande felfall kan säkerställas att maximala tillåtna ström- och spänningsnivåer för apparater och utrustning inte överskrids. Därmed krävs att både kortslutningar mellan faser och till jord studeras.

Det dimensionerande felfallet för kortslutning mellan faser är trefasig kortslutning. För jordslutningar är motsvarande felfall enfasigt jordfel. Figur 3.12 visar de två normalt dimensionerande felfallen.



Figur 3.12: A – trefasig kortslutning, B – enfasig jordslutning.

3.4.1 Kortslutningar mellan faser

Kortslutningsströmmen beror av kortslutningseffekten i felstället. Med andra ord beror den stationära felströmmen vid kortslutning av felets lokalisering och nätets driftläggning. Felströmmen som uppstår i samband med kortslutningen begränsas av ledningsimpedansen fram till felet.

Den trefasiga kortslutningsströmmen beräknas:

$$i_k = \frac{u_h}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (3.2)$$

där u_h är huvudspänning och Z_k är ledningsimpedansen per fas fram till felet.

Det är alltså mycket viktigt i en utredningsfas att identifiera de situationer avseende konsumtion/produktion/driftläggning som ger de dimensionerande felströmmarna.

3.4.2 Kortslutningar till jord

Nivån på jordfelströmmarna vid jordslutning beror av hela kraftsystemets nollföljdsimpedans och därmed av systemjordningen. Eftersom hela nollföljdsystemet måste betraktas krävs beroende på teknisk lösning normalt att denna del av utredningen sker i samråd mellan nätägare och exploitör.

Om nätet är höghohmigt jordat är jordfelströmmarna inte dimensionerande eftersom dessa felströmmar begränsas av nollpunktens impedans. Dock krävs beräkningar för att bestämma utformningen av neutralpunktens impedans.

Vid direktjordat nät finns risk att jordslutningar ger upphov till större felströmmar än acceptabelt eftersom det saknas felströmsbegränsande impedans i neutralpunkten. Det kan även nämnas att om förhållande mellan systemets nollföljds- och plusföljdsimpedans är mindre än ett ($Z_0/Z_+ < 1$) blir strömmen vid enfasigt jordfel större än vid trefasig kortslutning.

Exempel Kriegers flak

Felströmsberäkningarna för det anslutande elnätet till Kriegers flak och annan tillkommande produktion år 2010 visade att uppkomna felströmmar vid kortslutningen mellan fasen och till jord väsentligt överskred 40 kA som utrustning är dimensionerad för. För att klara de felströmmar som kan uppstå 2010 när vindkraften ansluts krävs bl.a. att 17 st effektbrytare på 130 kV nivå byts ut i stationen Sege.

3.5 Dynamik

Förmågan att bibehålla nätanslutning kan utgöra en begränsande faktor vid storskalig utbyggnad av vindkraft. Föreskrifter avsedda och utformade för mindre grupper av vindkraftverk anslutna till distributionsnätet anger att vindkraftverken kopplas bort vid händelse av ett fel i nätet, vilket inte är relevant för stora vindparker. Vid en storskalig utbyggnad av vindkraft innebär bortfall eller felbortkoppling av vindkraftsanläggningar att effektbalansen störs vilket kan leda till störningar i frekvensen och spänningskollaps. Stora produktionsanläggningar måste klara störningar utan bortkoppling. Om t.ex. ett fel uppstår i ledningen till en vindkraftpark skall vindkraftparken kopplas bort, men om vindkraftparken tillhör den felfria delen av nätet så skall vindkraftparken vara inkopplad under den tid det tar att koppla bort den felbehäftade delen. Så fort som den felbehäftade delen kopplats bort skall vindparken återgå till normal drift, detta för att nätet inte skall kollapsa.

Beroende på det interna och det anslutande elnätets dynamiska egenskaper kan snabba tidsberoende fenomen uppstå. Även elsystemen i vindkraftverk påverkar dynamiska fenomen i samband med fel. För att fullständigt studera dessa fenomen räcker inte tidigare beskriven lastflödesmodell. Studier på dessa korta fenomen kräver dynamisk representation av det elektriska drivsystemet i vindkraftverken, av det interna elnätet och av det anslutande elnätet.

Dynamiska simuleringar av det svenska kraftsystemet kan utföras utifrån Svenska Kraftnäts dynamiska nätmodell. Dynamiska simuleringar på ett stort system kan vara tidsödande. Av den anledningen kan det vara av intresse att ta fram en reducerad modell för kraftsystemet. I modellen skall dynamisk data för nätet och produktionskällorna representera elnätet vid en framtida anslutning av vindkraftparken.

Beroende på nätkonfiguration samt storlek på anläggningen kan en relevant representativ modell av systemet variera. För exempelvis en radialmatad vindkraftpark med relativt liten märkeffekt ansluten till ett starkt nät kan det

räcka med att ta fram en kortslutningsekvivalent. Modellen kan kompletteras med ansättning av typiska parameterdata för den producerande enheten.

För andra nätkonfigurationer och/eller stora produktionsanläggningar krävs att modellerna av systemet inkluderar större delar av systemet. Generellt kan sägas att vid en reduktion bör systemet vara så intakt som möjligt kring den studerade vindkraftparken medan produktionskällor, belastningar, nät etc. "långt" bort i systemet kan reduceras [10].

PSS/E kan användas för dynamiska studier på större elnätmodeller men den numeriska lösningen har en relativt lång simuleringssteglängd (10 ms). Det innebär att fenomen som är kortare inte representeras på ett korrekt sätt.

3.5.1 Dynamik i vindkraftverk

Moderna vindkraftverk är konstruerade för någon form av variabelt varvtal, detta beroende på strävan av att reducera vikten på aggregaten samt att skapa bättre elkvalitet. Variabelt varvtal minskar de mekaniska lasterna vilket möjliggör lättare aggregat och ställer därmed inte lika höga krav på fundamentering. De två dominerande huvudtyperna av vindkraftverk på den europeiska marknaden är:

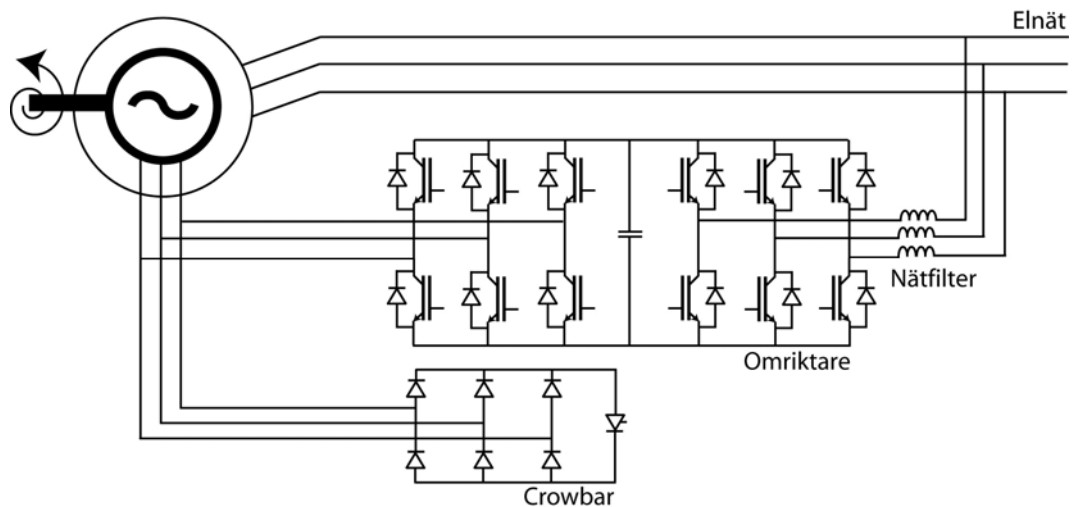
- Doubly Fed Induction Generator (DFIG)
- Fulleffektomriktad generator (FEO)

Doubly Fed Induction Generator

DFIG är en asynkronmaskin som har en sekundär matning där rotorströmmarna kan regleras. Tekniken medger i och med reglering av eftersläpningen att generatorns varvtal kan styras inom visst intervall, typiskt $\pm 30\%$. Rotorströmmarna styrs av en omriktare som återmatar effekt till nätet via en tredje lindning på aggregattransformatorn. Omriktaren ersätter den traditionella tekniken att med rotormotstånd styra generatorns eftersläpning. Typisk storlek på omriktaren är 30 % av vindkraftverkets märkeffekt. Figur 3.13 visar en principskiss av ett elektriskt drivsystem för vindkraftverk med DFIG-teknik.

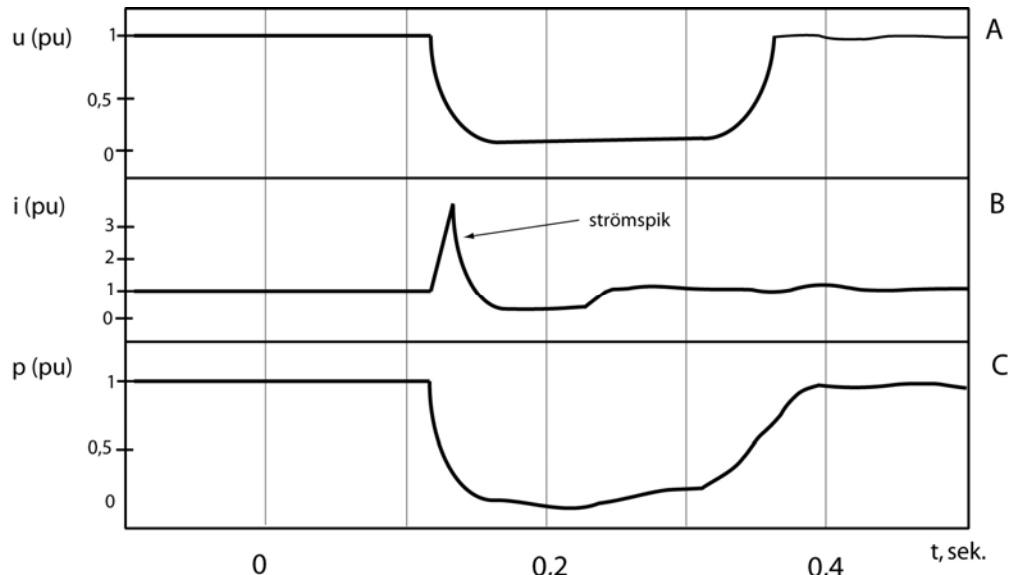
För att skydda omriktaren mot höga strömmar kan en aktiv crowbar användas. Genom att använda speciell styrteknik kan vindkraftverkens förmåga att bibehålla nätanslutningen vid spänningsdippar ökas. Tekniken kallas "ride through" och bygger på att vindkraftverken under en kortvarig spänningsdipp konsumerar överskottet av aktiv effekt i stora effektmotstånd och eventuellt stödjer nätet med en reaktiv ström för att upprätthålla tillräcklig spänningsnivå. På detta sätt kan vindkraftverken bibehålla nätanslutningen under en spänningsdipp och återta produktion när felet är bortkopplat.

Om omriktaren havererar kan normalt vindkraftverken bibehålla nätanslutningen med reducerad drift i och med aerodynamisk effektregering via pitch-funktionen. Dock är möjligheten till variabelt varvtal eliminerad i och med att generatoren antar direkt drift.



Figur 3.13: Principskiss av elektriskt drivsystem för DFIG [8].

Ett DFIG-system med "ride-through" kan initialt vid en spänningsdipp avge en kortvarig felström med hög amplitud ut på nätet. Denna kortvariga strömspik kan uppgå till 5 p.u. och kan därmed bidra med en stötström in på anslutande nät. Figuren 3.14 visar typiskt hur ett elektriskt drivsystem med DFIG och ride-through kan uppträda under en spänningsdipp.



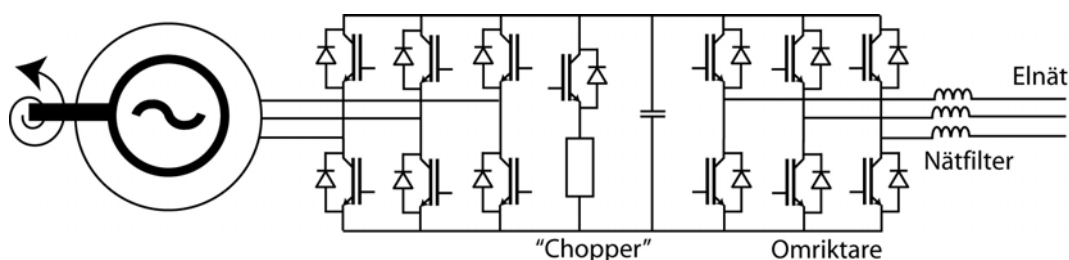
Figur 3.14: Skiss av en typisk respons på en spänningsdipp med 15 % kvarvarande spänning från ett vindkraftverk med DFIG utrustat med ride through-teknik.

Om spänningen (A) i figur 3.14 hastigt sjunker ($t=0,17$) beroende på t.ex. kortslutning i överliggande nät erhålls initialt en relativt stor strömspik (B) på upp till 5 p.u. Under felet matas reaktiv effekt ut på nätet. Den aktiva effekten (C) reduceras för att kraftelektroniken inte skall överlastas. Under spän-

ningsdippen magnetiseras generatoren av omriktaren som även till viss del bidrar med aktiv och reaktiv effekt till nätet. Pitchregleringen används för att kontrollera turbinens ökande varvtal som används för att snabbt åter bygga upp produktionen när spänningen återgår till den normala nivån ($t=0,35$).

Fulleffektomriktare

Vindkraftsaggregat med en fulleffektomriktare mellan generatoren och anslutande elnät styr hela effekten ut på nätet med kraftelektronik. Det innebär att generatoren och elnätet är systemmässigt separerade från varandra. Beroende på detta fås god styrbarhet och god elkvalitet. Olika vindkraftverk med fulleffektomriktare klarar normalt även större variationer i spänning och frekvens jämfört med DFIG. Även denna typ av vindkraftverk kan stödja nätet med reaktiv ström vid spänningsdippar för att bibehålla nätanslutningen. Den ström som matas ut för att hålla uppe spänningen begränsas av märkströmmen på kraftelektronikens halvledare (dioder och transistorer). Halvledarna är normalt konstruerade med separata moduler varför det är liten risk att hela omriktaren havererar samtidigt. Om en modul går sönder kan fortfarande produktion med övriga fungerande moduler fortgå. Figur 3.15 visar en principskiss av ett elektriskt drivsystem med fullstor omriktare.



Figur 3.15: Principskiss av elektriskt drivsystem för FEO.

3.5.2 Felströmsberäkningar och representation av felströmsbidrag för vindkraftparker

I vissa program är det möjligt att använda datormodellen för lastflödet för att studera de stationära felströmmar som uppkommer vid kortslutningar. För att studera jordfelströmmar krävs att simuleringsmodellen kompletteras med nollföljdsdata för ledningar, transformatorer etc.

I PSS/E finns en beräkningsmodul (ASCC - Automatic sequencing Short Circuit Calculation) som simulerar felfall och är därför ett lämpligt verktyg för att studera nivån på stationära felströmmar i nätet. Resultatet från beräkningsmodulen är felström vid impedanslösa trefasfel och impedanslösa enfasiga jordslutningar.

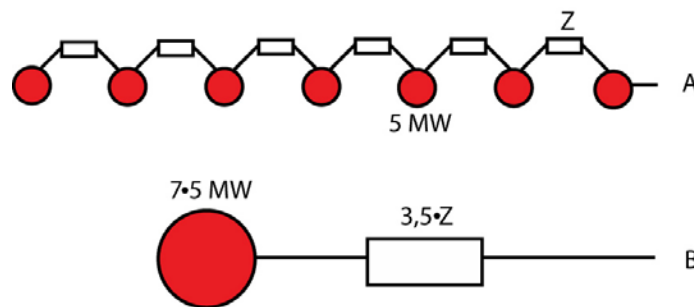
För att kunna utföra relevanta simuleringar på felströmsbidraget från en vindkraftpark krävs att ett anslutande elnät är modellerat samt att dynamiska modeller eller dynamisk representation av vindkraftparken finns att tillgå.

I PSS/E är det approximativt möjligt att dynamiskt representera kortvariga felströmsbidrag från elektriska drivsystem i vindkraftverk genom att ange värden för aggregatens subtransienta reaktanser (X_d''). Denna metod motsvarar det som sker under cirka 20 ms efter att t.ex. en kortslutning inträffat på stamnätet. Genom att approximativt representera hela vindkraftparken med ett specifikt värde på X_d'' kan felströmsbidraget från hela vindkraftparken in på nätet studeras. Tabell 3.2 visar hur typiska värden på X_d'' anges för respektive drivsystem. I första hand bör exploatören förse nätägaren med värden på maximalt strömbidrag för aktuell aggregattyp.

Tabell 3.2: Inställningar av den subtransienta reaktansen i PSS/E

Elektriskt drivsystem	Typiskt maximalt strömbidrag (pu)	X_d'' (pu)
DFIG	5.0	0.2
Fulleffektomriktare	1.4	0.71

Strömbidraget från vindkraftparkens aggregat begränsas av impedansen i vindkraftparkens kablar, aggregattransformatorer och eventuellt i en huvudtransformator. Därmed krävs att hela systemets impedans anges. Normalt finns vindkraftaggregaten anslutna utmed radialer vilket komplicerar representationen av strömbidragets begränsning i ledningsnätet. Det är därför rimligt att ett uppsamlande kabelnät förenklas genom att t.ex. en radial med vindkraftverk ersätts med en ekvivalent subtransient reaktans motsvarande en hel radials maximala strömbidrag. Med subtransient reaktans avses generatorns tidsberoende reaktans under en kort tid. Strömbidraget från ekvivalenten begränsas sedan med ett medelvärde på radialens totala ledningsimpedans. Figur 3.16 visar ett förslag på hur en förenkling kan se ut.



Figur 3.16: Princip för aggregering av radial till en ekvivalent, A – verklig radial där varje ring motsvarar ett vindkraftverk på 5 MW varje impedans Z ledningen mellan två vindkraftverk, B – aggregerad radial bestående av ett vindkraftverk på 35 MW.

Ovanstående ekvivalenta modell för strömbidraget kompletteras med data för plusföljdsimpedansen i transmissionskabeln och eventuellt för transformatorer.

3.5.3 Bibehållen nätanslutning vid spänningsdippar – dynamisk stabilitet

Enligt Svenska Kraftnäts föreskrifter skall produktionsanläggningar klara att bibehålla nätanslutningen vid dimensionerande kortslutningar. För en stor produktionsanläggning innebär det en spänningsdipp på ca 250 ms som motsvarar en misslyckad brytning följt av en sekundär brytning via brytarfels-skydd på stamnätet. Mer utförlig information om dessa krav finns i kapitel 6.

Vid anslutning av produktionsanläggningar skall förmågan att bibehålla nätanslutningen verifieras. Dessa egenskaper beror till stor del av teknikval och hur styrsystemen i t.ex. vindkraftaggregat är utformade.

Exempel Kriegers flak

För att säkerställa att vindkraftparken Kriegers flak klarar de krav som Svenska Kraftnät ställer avseende bibehållen nätanslutning vid spänningsdippar på stamnätet konstruerades dynamiska modeller av vindkraftparken. Avsikten var att modellera relativt snabba förlopp och därmed har inte hänsyn tagits till vindens varierande natur eftersom den variationen är betydligt långsammare. För att förenkla modellen har därför effekten från turbinerna antagits konstant. Eftersom det nät som vindkraftparken modellerats mot finns i PSS/E krävs även att modellerna av vindkraftverken implementeras i samma programvara. PSS/E arbetar med relativt lång simuleringssteglängd (typiskt 10 ms).

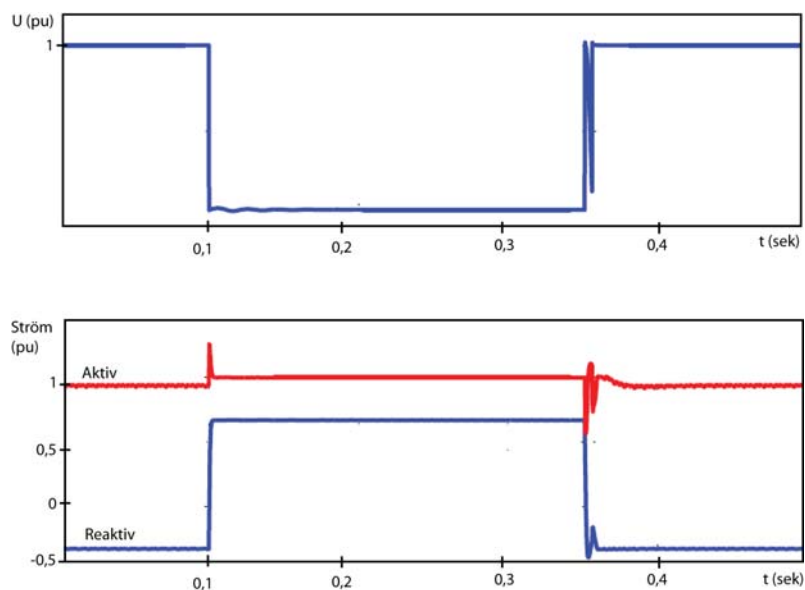
Modellerna av vindkraftverken byggdes upp med hög detaljeringsgrad i programmet PSCAD/EMTDC [7]. Sedan kopplades de ihop till en fjärdedel av vindkraftsparken på cirka 160 MW. Därefter användes den framtagna modellen i PSCAD/EMTDC för att verifiera den framtagna och förenklade modellen i PSS/E av hela vindkraftsparken.

En fjärdedel av vindkraftparken planeras bestå av cirka 32 vindkraftverk. Ett fullständigt system med 32 fristående dynamiska aggregatmodeller skulle i detta simuleringskede kräva orimligt stor datorkraft. För att reducera behovet av datorkapacitet aggregerades varje radial i det uppsamlade kabelnätet (7 vindkraftverk) till ett ekvivalent vindkraftverk på 35 MW med motsvarande kabel och transformator.

För att verifiera en sammanslagning av vindkraftverken utmed en radial simulerades och jämfördes en radial med sju vindkraftverk och dess aggregerade ekvivalent. Resultatet visar att en aggregerad radial uppvisar nästintill identiska egenskaper jämfört med en radial med sju fristående modeller.

Det som är avgörande för att ett vindkraftverk kan bibehålla nätanslutningen vid en kortslutning på stamnätet är vilken nivå den kvarvarande spänningen antar samt i vilken grad vindkraftverket kan stödja nätspänningen vid en dipp. När spänningen sjunker är det inte möjligt att mekaniskt reglera ner effektproduktion tillräckligt snabbt med pitchreglering. Överskottet av aktiv effekt förs därför över till stora effektresistorer så kallade "choppers". Genom att överskottet av aktiv effekt "bränns upp" överbelastas inte kraftelektronik i vindkraftverken. En PLL-utrustning (Phase Lock Loop) är ett frekvensstyrt kontrollsystem vars funktion är baserad på att detektera fasskillnader. Vindkraftverket kan med hjälp av en PLL behålla synkroniseringen med nätet och

på sätt återta produktion när felet är bortkopplat. Oftast är det tillräckligt att styra ned den aktiva effekten till "choppers" vid en spänningsdipp och sedan återta produktionen när felet är bortkopplat och spänningen återtar normal nivå. I situationer när den kvarvarande spänningen vid ett stamnätsfel blir så låg att det inte går att synkronisera vindkraftverken mot nätet krävs att nätet aktivt stöttas. Normalt finns det möjlighet att aktivt mata ut en reaktiv ström (reaktiv effekt) för att stödja nätet så att den kvarvarande spänningen antar tillräcklig nivå. Figur 3.17 visar hur aktiv och reaktiv ström kan styras i ett vindkraftverk för att möjligheten till bibehållen nätanslutning skall öka.



Figur 3.17: Exempel på styrning av aktiv och reaktiv ström (effekt) från omriktaren ut på nätet vid en spänningsdipp med kvarvarande spänning på cirka 5 %.

Utmatning av reaktiv ström i figur 3.17 är inte en normalinställning i vindkraftverk.

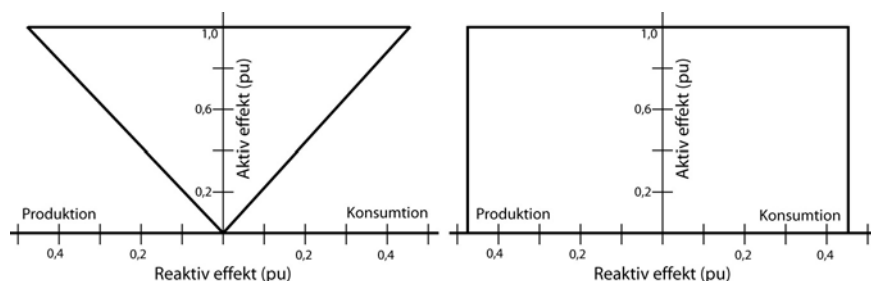
En del typer av moderna vindkraftverk har möjligheten att bibehålla nätanslutning betydligt längre än den tid som föreskrivs av Svenska Kraftnät vid spänningsdippar. Det är viktigt att tillse i samråd mellan nätägare och exploatör att vindkraftverken är utformade så att t.ex. en återinkoppling efter en längre tids spänningslöshet på ett antal sekunder inte skadar produktionsanläggningen.

3.5.4 Spänningsreglering med vindkraftverk

Moderna vindkraftverk kan normalt bidra till att reglera spänningen på det anslutande elnätet. Eftersom regionnätet har induktiv karaktär kan spänningen i stor utsträckning påverkas genom att reaktiv effekt antingen produceras eller konsumeras.

Generellt är det storleken på kraftelektronikens halvledare och kylsystemet som är avgörande för inom vilka intervall som spänningen kan styras. Figur

3.18 visar typiska styrmöjligheterna av aktiv och reaktiv effekt för ett traditionellt och ett modernt vindkraftverk.



Figur 3.18: Styrmöjligheter av aktiv och reaktiv effekt under normala förhållanden, t.v. traditionellt vindkraftverk, t.h. modernt vindkraftverk.

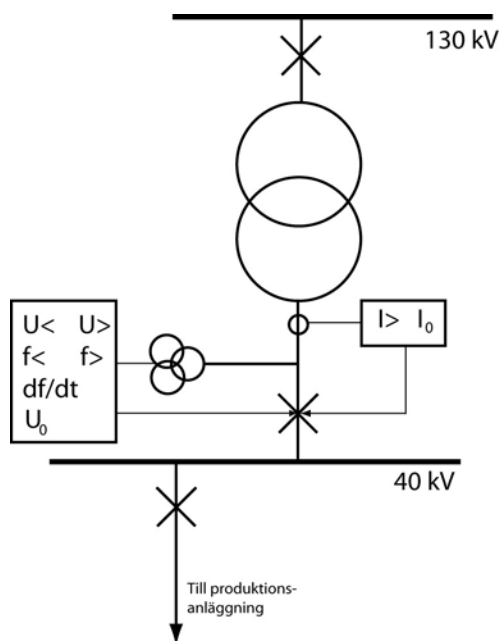
Normalt kompliceras en vindkraftparks bidrag till eventuell spänningsreglering av transformatorer, reaktiv effektkompensering, kablar etc. Därför krävs ofta ingående studier på hur aktiv och reaktiv effekt bör styras inom vindkraftparken och till anslutningspunkten.

Vid spänningsreglering är det viktigt att elnätet har väl avvägda tidskonstanter så att inte olika regleringar kommer i konflikt med varandra och på så sätt ger onödigt slitage på t.ex. lindningskopplare eller försämrade elkvalitet.

4 Felbortkoppling

För att skapa hög säkerhet och goda skyddsfunktioner bör skydden för en vindkraftpark och det anslutande nätet samordnas. Både ur tekniskt och ekonomiskt hänseende finns uppenbara skäl till ett utbyte av information mellan nätägare och vindkraftexploatörer. Dessutom bör en dialog föras mellan dessa två parter för att säkerställa att aggregaten i vindkraftparken inte tar skada vid spänningslösheten eller återkommande spänning som uppstår vid ett fels återinkoppling. Om risk finns att aggregaten tar skada krävs att exploatören förser sin anläggning med kompletterande reläskydd. Det är av mycket stor vikt att alla typer av produktionsanläggningars interna selektivplan fungerar med selektivplan och felbortkoppling för det anslutande nätet.

De skyddsfunktioner vindkrafttillverkaren tillhandahåller i aggregaten är till för att skydda vindkraftverken och är normalt inte tillräckliga för att fungera som ledningsskydd. De är dessutom normalt integrerade i aggregatens styrsystem och därför inte alltid möjliga att prova och verifiera ⁽¹⁾. Figur 4.1 visar ett exempel på en typisk reläskyddsuppsättning som anslutande elnät kan bestyckas med. Skydden består av spänningsskydd, frekvensskydd, överströmsskydd, frekvensderivataskydd och jordfelskydd.



Figur 4.1: Exempel på reläskyddsuppsättning.

I exemplet i figur 4.1 löser det riktade jordfelsskyddet brytaren på nedsidan av transformatorn. Brytaren på primärsidan används även som reserv för misslyckade brytningar längre ner i nätet ut till vindkraftparken. Överströmsskyddet ställs in för momentan brytning av kortslutningar i transformatorn.

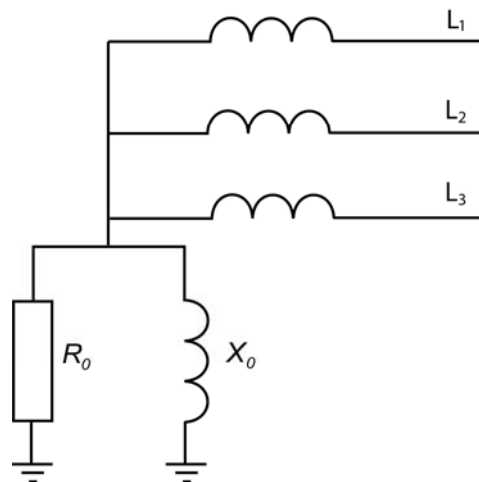
⁽¹⁾ Standarden IEC 61400-21 är under ombearbetning. I en remissversion av standarden föreslås att reläfunktioner skall provas och verifieras.

Med tidsfördröjning aktiveras skyddet som reservskydd för kortslutningar i underliggande nät.

Beroende på t.ex. nätets och vindkraftparkens utformning, ägarförhållande och systemjordning kan skyddssystemets utformning variera.

4.1 Impedansjordade nät

Normalt är regionnätets lägre spänningsnivåer impedansjordade. Det innebär att transformatorns neutralpunkt är förbunden med jordpotential via en impedans. Ofta utgörs denna impedans av en reaktans parallellkopplad med en resistans. En väl avstämd reaktans kan vid jordfel nästintill släcka ut den kapacitiva felströmmen. Genom att införa en resistans är det möjligt att med aktiv strömkomponent detektera jordfelets lokalisering och därmed avgöra vilken anläggningsdel som är felbehäftad. Med vetskap om felställets riktning kan selektiv bortkoppling underlättas. Figur 4.2 visar ett elnät som är systemjordat över en impedans.



Figur 4.2: Systemjordning med impedans i neutralpunkten.

4.1.1 Reläskydd i impedansjordade nät

Anslutning av en vindkraftpark till impedansjordat regionnät bör vara utrustat med följande skyddsfunktioner:

- Överströmskydd
- Jordfelskydd
- Över- och underspänningsskydd
- Över- och underfrekvensskydd
- Skydd mot oönskad ö-drift

4.2 Direktjordade nät

Vid anslutning av vindkraftparker till direktjordade nät krävs ofta att lednings-skydd som distansskydd, separat jordströmsskydd och längsdiffskydd används.

Distansskyddet är impedansmätande och mäter impedansen i ledningen fram till felstället och skapar med olika tidsinställda steg selektivitet. Majoriteten av fel i de direktjordade näten är en- och tvåfasiga jordfel varför nollföljdsströmmätande jordfelsskydd används.

Skydd med absolut selektivitet benämns som enhetsskydd och används för att skydda ett specifikt objekt, t.ex. ett differentialskydd för en transformator. Skyddet kan mäta i samtliga fel med snabb utlösningstid.

Behoven för olika anslutningar varierar varför det är svårt att ge en generell beskrivning av reläskydden vid anslutning till direktjordade system. Utredning av specifikt behov i respektive anslutningsfall måste därför utföras.

4.3 Beskrivning av reläskydd

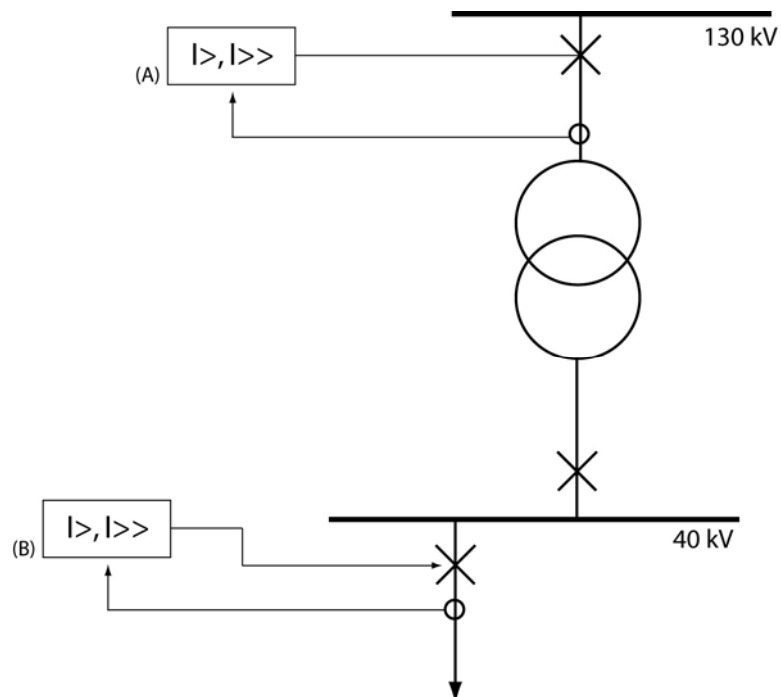
Bestyckningen av reläskyddsfunktioner i impedansjordade och direktjordade nät är till stora delar samma. T.ex. är principen för spännings-, frekvens-, och överströmsskydden samma. Nedan beskrivs olika typer av reläskydd som förekommer för båda typerna av systemjordning.

- **Överströmsskydd**

Moderna reläskydd för överström har normalt ofta minst tre strömsteg med valbar tidsfördröjning och utlösningsskarakteristik. Det finns goda möjligheter att skapa ett effektivt skydd för kabelnätet ut till vindkraftparken samtidigt som redundans skapas för interna fel i vindkraftparken. Om det finns avgre-nade ledningar krävs att kortslutningsskyddet ställs in på sådant sätt att selektivitet erhålls och att inte oönskad bortkoppling av enheter sker.

Överströmsskydd i anslutande ände hos nätägaren på primärsidan av transformatorn (A), se figur 4.3, skall lösa bort felet på kortast möjliga tid och kan vara av samma typ som tidigare beskrivet. Skyddet skall momentant lösa för kortslutningar nära transformatorn. Inställningen bör vara något över högsta kortslutningsström som erhålls på nedsidan av transformatorn för att minimera risken för att onödiga bortkopplingar sker vid fel längre ut i nätet. Vid misslyckad bortkoppling skall transformatorns överströmsskydd lösa bort felet via reservfunktion.

Ett tidsfördröjt steg bör även finnas för att reservfunktion skall erhållas vid uteblivna utlösningar från skydd ute i det underliggande nätet (B).



Figur 4.3: Schematisk bild av överströmsskydd på 40 och 130 kV nivå.

• Överlastskydd

Eftersom vissa apparater, framförallt strömtransformatorer, inte kan överlastas bör därför reläutrustningen för detektering av överström kompletteras med ett skydd för termisk överlast. Detta beroende på att märkeffekten hos vindkraftverk ibland kan överskridas.

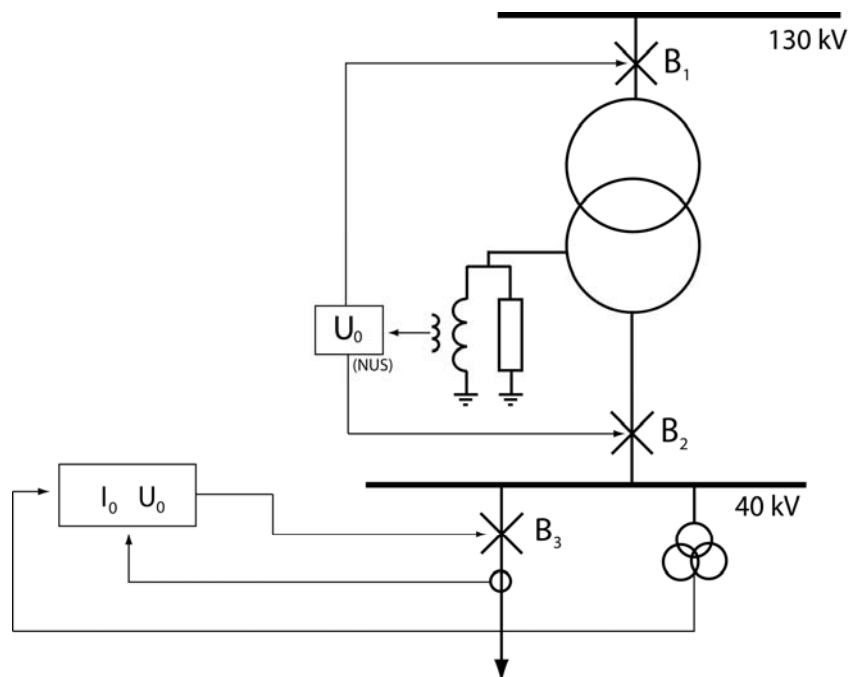
Normalt uppdaterar vindkrafttillverkarna styrsystemets mjukvara via telekommunikation. Om ett vindkraftverk har mjukvarumässig begränsning av maxeffekten kan denna produktionsrestriktion nollställas vid en eventuell uppdatering. Konsekvensen blir då att vindkraftverken kan producera mer än tillåten effekt. Det finns även exempel när stallreglerade vindkraftverk producerat för mycket effekt. Det beror på att märkeffekt är specificerad vid bestämda förhållanden för t.ex. lufttryck och temperatur. Vid andra vädermässiga förutsättningar har luften annan densitet vilket gör att ett vindkraftverk kan producera mer än märkeffekt.

• Jordfelsskydd

I samband med anslutning av vindkraft sker ofta omfattande kablfiering vilket ofta bidrar till att ökade jordfelströmmar. Jordningssystemet och jordtagen avgör behovet av kompensering av kapacitivt strömbidrag från kabelnätet vid fel. Bestyckningen av reläskydd för detektering av jordfel kan därför variera.

Om selektiv bortkoppling inte anses nödvändig kan oriktat jordfelsskydd användas. Genom att antingen mäta spänningens eller strömmens nollföljds-komponent kan jordfel detekteras. Består nätet av flera ledningar och selektiv bortkoppling önskas, krävs riktat jordfelsskydd.

Figur 4.4 visar riktat jordfelsskydd som via summaströmsmätning och spänningsmätning med öppen deltakoppling detekterar nollföljdskomponenterna i systemet. Den parallellkopplade resistansen alstrar en aktiv strömkomponent vid jordfel som används för att mäta in felet. Som reserv för det strömmätande skyddet finns nollpunktspänningsskydd (endast impedansjordade nät).



Figur 4.4: Schematiskt bild av riktat jordfelsskydd och nollpunktspänningsskydd (NUS).

Vid jordfel uppstår motsvarande nollföljdsspänning i hela systemet på sekundärsidan av transformern (D/Y-koppling) varför denna kan mätas på olika ställen. I detta fall avser det riktade jordfelsskyddet att skydda en transmissionsledning till en vindkraftpark. Genom att samordna jordfelsskyddets reservsteg med anslutande elnäts skydd och överliggande brytare erhålls god redundans. Vid fel på radialen till vindkraftparken aktiveras brytare B_3 .

Nollpunktsspänningsskydd (NUS) utgör reservfunktion för det strömmätande skyddet ovan. Oavsett om jordfelsskyddet är riktat eller oriktat bör reservskydd finnas. Skyddet bör med tidsfördröjning lösa utmatningsbrytare (B_2) till vindkraftparken. Om denna brytning misslyckas bör ytterligare tidsförskjuten utlösningssimpuls skickas till brytaren på högspänningssidan av transformern (B_1).

NUS-skyddet känner fel uppströms utmatningsbrytaren inklusive fel i lindningen på sekundärsidan av transformern. Ett eventuellt andra tidsfördröjt steg löser närmast överliggande brytare (transformatorns primärsida).

Även om nollföljdsspänningen är samma i mätpunkterna för det riktade jordfelsskyddet och för nollpunktspänningsskyddet erhålls redundans för skydden

genom att ha olika fysiska mätpunkter. Ofta kan en sekundär mätlindning på jordningsreaktansen utnyttjas för att mäta nollföjdsspänning.

Om felet är lågohmigt löses jordslutningar i det anslutande kabelnätet i första hand bort av det strömmätande jordströmsskyddet i matande ände hos nätägare. Om jordslutningen är högohmig aktiveras även nätägarens NUS-skydd.

- **Över- och underspänningsskydd**

Om märkspänning eller isolationsnivå överskrids måste utrustningen skyddas. Normalt görs detta med en kombination av reläskydd för driftfrekventa överspänningar och ventilavledare för transienta överspänningar. Över- och underspänningsskyddet i det anslutande nätet utgör primärfunktion, reservfunktion utgörs av skydden i varje enskilt vindkraftaggregat. Skyddet skall se till att skador och störningar inte uppstår.

- **Över- och underfrekvensskydd**

I likhet med spänningsskydden utgör över- och underfrekvensskydden i det anslutande nätet primärfunktion. Skyddet skall se till att skador och störningar inte uppstår.

- **Ö-drift**

För att säkert detektera nätbortfall och därmed oönskad ö-drift bör vindkraftgruppernas frekvens- och spänningsskydd kompletteras med ett frekvensderivataskydd. Frekvensderivataskyddet mäter ändringen av frekvens per tidsenhet, df/dt . Fördelen jämfört med ett frekvensskydd är att frekvensderivataskyddet ger en säker och snabb detektering. Vid nätbortfall ändras frekvensen med en derivata som normalt är betydligt större än de derivator som förekommer i nätet. Vid bortfall av stora kraftblock kan frekvensen på elnätet falla med 0,5 Hz, ändringen sker emellertid långsamt, enligt Svenska Kraftnät överstiger derivatan vid ett sådant bortfall inte 0,1 Hz/s. Om en vindkraftgrupp hamnar i oönskad ö-drift uppstår normalt betydligt större frekvensderivator. Derivatan blir positiv om kvarvarande last är mindre än den aktuella vindproduktionen och negativ om kvarvarande last är större än vindproduktionen. Skyddet bör därför mäta frekvensderivatans absolutvärde. Vidare måste skyddet tidsfördröjas för att inte lösa för den frekvensändring som kan uppstå vid kortslutningar. T.ex. skall inte frekvensderivataskyddet lösa för en eventuell förändring i frekvens vid stamnätsfel enligt figur 5.1. I det fallet är en tidsfördröjning på cirka 300 ms lämplig.

4.4 Inställningar av spännings- och frekvensskydd

Svenska Kraftnät har i publikationen "Affärsverket Svenska Kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar" angivet under vilka förhållanden som vindkraftparker (>25 MW) skall kunna bibehålla utmatning av effekt. Inställningarna av reläskydden i anslutande elnät skall harmonisera med dessa föreskrifter. Eftersom vindkraftparkerna skall kunna mata nätet med effekt inom föreskrivet intervall för spännings- och frekvensvariationer anges gränserna på dessa som känsligast möjlig inställning. Tolerans för t.ex. avdrift och andra fenomen i skydds- och mätutrustning måste beaktas.

Tabell 4.1 visar reläskyddsinställningar för spänning och frekvens som harmoniserar med föreskrifterna för större vindkraftparker.

Tabell 4.1 Gränsvärden för spänning och frekvens (vindkraftparker > 25 MW)

U<	U>	f<	f>
90 %	110 %	47,5 Hz	52,0 Hz

Om det finns andra anläggningar i närheten av en vindkraftpark som påverkas vid fel bör reläskydden ställas relativt snävt i förhållande till Svenska Kraftnåts gränsvärden. Om andra anläggningar som ligger långt bort och påverkas i liten grad av avvikelser i spänning och frekvens kan ett större intervall för reläskydden tillåtas för att öka möjligheten till bibehållen nätanslutning. Mer information finns i kapitel 5.

5 Föreskrifter – Svenska Kraftnät

5.1 Allmänt

Svenska Kraftnät sköter stamnätet för elkraft och har systemansvaret för den svenska elförsörjningen. Detta ansvar innebär att se till att elsystemet kort-siktigt är i balans och att dess anläggningar samverkar driftsäkert. Stamnätet omfattar totalt ca 15 000 km 220 kV och 400 kV kraftledningar med bl.a. stationer, förbindelser med utlandet och kontrollsystem.

Krav på produktionsanläggningar föreskrivs i publikationen "Affärsverket Svenska Kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar". Skriften anger krav på bibehållen nätanslutning, effekttreglering, informationsutbyte etc. Tabell 5.1 visar hur produktionsanläggningar definieras storleksmässigt i dessa föreskrifter.

Tabell 5.1 Storlekar - produktionsanläggningar

	Vattenkraft	Värmekraft	Vindkraft	Gasturbin
Stora anläggningar	Större än 50 MW	Större än 100 MW	Större än 100 MW	Större än 100 MW
Medelstora anläggningar	Från 25 MW t.o.m. 50 MW	Från 25 MW t.o.m. 100 MW	Från 25 MW t.o.m. 100 MW	Från 25 MW t.o.m. 100 MW
Små anläggningar	F.o.m. 1,5 MW t.o.m. 25 MW	F.o.m. 1,5 MW t.o.m. 25 MW	F.o.m. 1,5 MW t.o.m. 25 MW	F.o.m. 1,5 MW t.o.m. 25 MW

Föreskrifterna anger med stöd av 16 § förordningen (1994:1806) om systemansvar att innehavare av vindkraftanläggning har uppgiften att tillse att denna uppfyller vissa krav. Kraven avser följande punkter:

- Störningstålighet
- Spänningsreglering
- Effekttreglering
- Kommunikation och styrbarhet
- Verifiering och dokumentation

Observera att en produktionsanläggningens förmåga att uppfylla dessa krav skall vara verifierade. Detta kan utföras med t.ex. fullskaleprov, beräkningar, simuleringar etc. Det är exploatörens uppgift att med verifiering tillse att en produktionsanläggning uppfyller de krav som föreskrivs av Svenska Kraftnät med givna egenskaper för produktionsanläggningar och anslutande nät.

I det följande återges de viktigaste delarna från Svenska Kraftnäts föreskrifter. För fullständigt föreskriftsdokument hänvisas till Svenska Kraftnäts hemsida, www.svk.se.

5.2 Störningstålighet

Stora och medelstora vattenkraftstationer, gasturbinaggregat och vindkraftparker skall kunna upprätthålla utmatning av effekt inom vissa intervall av nätspänningen och nätfrekvensen. Tabell 5.2 visar kraven på effektutmatning relativt spänning och frekvens. Spänningen relateras till nominell spänning på vindkraftaggregaten omräknat till vindkraftgruppens högsta spänning med hänsyn taget till spänningsfallet vid maximal aktiv effekt. Större värmekraftblock skall på samma sätt kunna upprätthålla utmatning av effekt enligt tabell 5.3.

Tabell 5.2: Krav på upprätthållen effektutmatning hos större vattenkraftsstationer, gasturbinaggregat och vindkraftparker

Frekvens (Hz)	Spänning	Effekt-utmatning	Drifttid	Övrigt
47,5-49,7	85-110%.	-	10 min	Skall kunna klaras ett fåtal gånger. För vindkraftgrupper gäller 90-110%
47,5-49,0	95-105%	<5% reduktion	>30 min	
49,0-49,7	90-105%	bibehållen	kontinuerlig	
49,7-51,0	85-90%	<10% reduktion	>1 timme	Gäller ej vindkraftparker
	90-105%	bibehållen	kontinuerlig	
	105-110%	<10% reduktion	>1 timme	
51,0-52,5	95-105%	Reducerad	>30 min	Återgång till normal produktion inom 1 min då $f < 50,1$ Hz. För vindkraftgrupper gäller frekvensintervallet 51,0-52,0

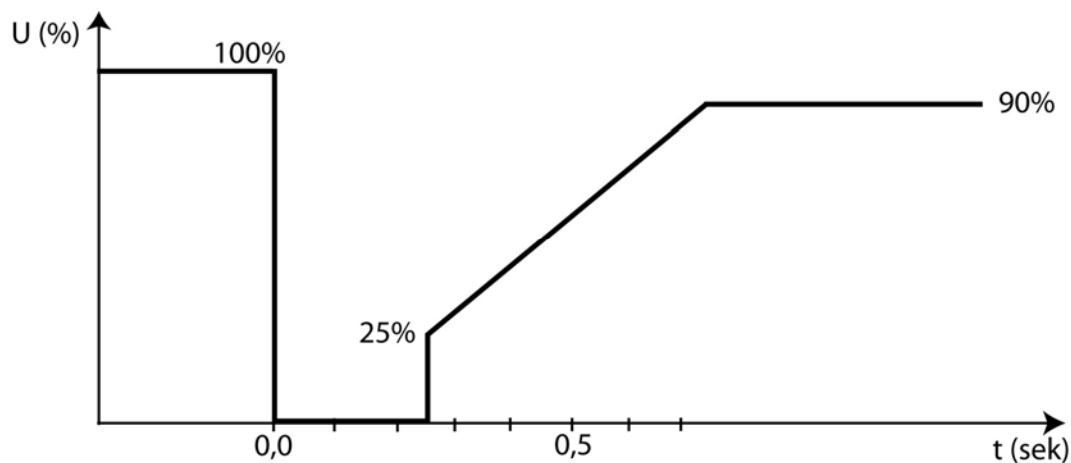
Tabell 5.3: Krav på upprätthållen effektutmatning hos värmekraftblock

Frekvens (Hz)	Spänning	Effekt-utmatning	Drifttid	Övrigt
47,5-49,7	85-110%.	-	10 min	Skall kunna klaras ett fåtal gånger.
47,5-49,0	95-105%	<15% reduktion vid 47,5 Hz	>30 min	
49,0-49,7	90-105%	bibehållen	kontinuerlig	
49,7-50,3	85-90%	<10% reduktion	>1 timme	
	90-105%	bibehållen	kontinuerlig	
	105-110%	<10% reduktion	>1 timme	
50,3-51,0	90-105%	reducerad	>30 min	Återgång till normal produktion inom 1 min då $f < 50,1$ Hz
50,3-52,5	85-110%	-	10 min	Skall kunna klaras ett fåtal gånger.
51,0-52,5	95-105%	reducerad	>3 min	Återgång till normal produktion inom 1 min då $f < 50,1$ Hz

Tabellerna 5.2 och 5.3 anger att en produktionsanläggning skall kunna producera märkeffekt när nätspänningen sjunker som lägst till 85 % av nominell spänning. Detta innebär att all utrustning måste dimensioneras för att klara den ökade ström som uppstår vid sjunkande spänning och bibehållen effekt.

5.3 Kortslutningar

Svenska Kraftnäts föreskrifter anger att stora produktionsanläggningar skall, med bibehållen nätanslutning, klara snabba variationer i spänningen på en eller flera faser i det anslutande maskade stamnätet. Variationerna motsvarar ett språng ned till 0 % under 0,25 sekunder, följt av ett språng på 25 % och sedan linjärt ökande spänning under 0,5 sekunder upp till 90 % spänning, som därefter består. Figur 5.1 visar den spänningsprofil i det anslutande maskade stamnätet som stora vindkraftsanläggningar skall klara med bibehållen nätanslutning.



Figur 5.1: Dimensionerande spänningsprofil vid fel i det maskade stamnätet.

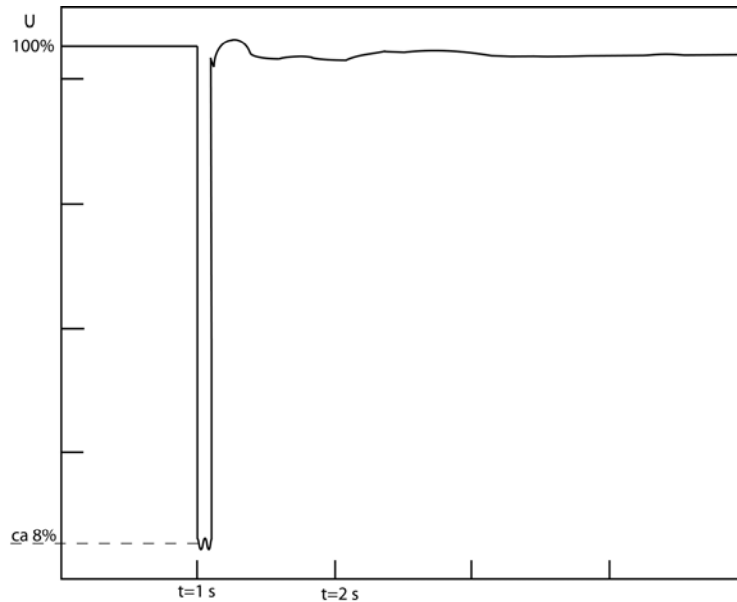
När en kortslutning orsakar spänningsprofilen motsvarande den i figur 5.3 på stamnätet kommer spänningen i vindkraftparken anta en högre nivå beroende på ledningsimpedansen mellan vindkraftparken och stamnätet fördröjer förloppet. Det är spänningsnivån ute i vindkraftparken som är avgörande för om vindkraftverken klara att bibehålla nätanslutningen enligt föreskrifterna.

Spänningsprofilen motsvarar en misslyckad brytning följt av en sekundär brytning via brytarfelsskydd på stamnätet. Spänningens återgående efter 250 ms fördröjs av t.ex. att asynkronmaskiner i nätet kräver reaktiv effekt för magnetisering. Spänningsnivån efter 700 ms är lägre än spänningens normalvärde. Det motsvarar en förändring av nätimpedansen till följd av att t.ex. en ledning kopplats ur beroende på ett stamnätsfel.

Exempel Lillgrund

Genom att simulera en kortslutning i den närmsta punkten i det maskade stamnätet med en dynamisk modell i PSS/E kan den lägsta erhållna spänningsnivån i anslutningspunkten studeras. I fallet Lillgrund är Sege denna närmsta punkt. Ett fel som resulterar i 0 % spänning på 400 kV nivå i Sege

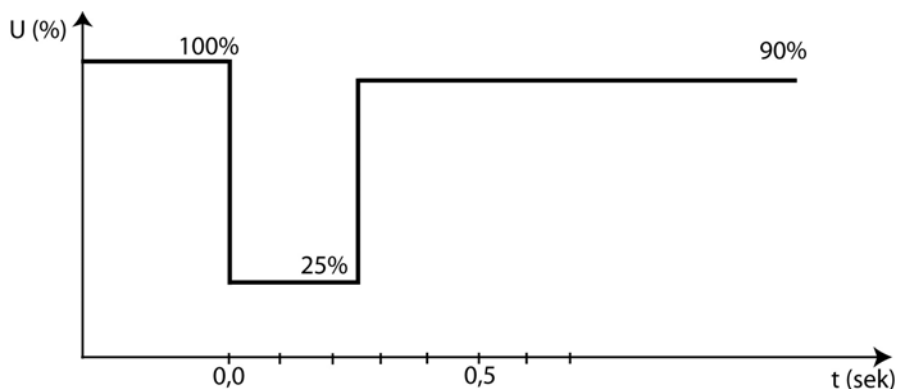
medför inte att spänningen blir 0 på 130 kV nivå i Bunkeflo. 130 kV nätet förmår upprätthålla en viss spänning under felet. Figur 5.2 visar kvarvarande spänning för värsta fallet vid en kortslutning i stamnätet på cirka 8 % i anslutningspunkten.



Figur 5.2: Spänningsprofil i anslutningspunkten vid kortslutning i det stamnätet.

Vindkraftparken ansluts med en ca 7 km lång 130 kV transmissionskabel till anslutningspunkten. Impedansen mellan anslutningspunkten och vindkraftparken gör att kvarvarande spänning ute vid vindkraftverken blir högre än 8 %.

För små och medelstora produktionsanläggningar är kraven på bibehållen nätanslutning något annorlunda. Figur 5.3 visar den spänningsprofil i det anslutande elnätet som är dimensionerande för dessa produktionsanläggningar.



Figur 5.3: Dimensionerande spänningsprofil vid fel i det anslutande elnätet för vindkraft anläggningar på 1,5-100 MW.

5.4 Spänningsreglering

Stora och medelstora anläggningar skall vara försedda med automatisk spänningsreglering. Spänningen skall vara inställbar inom minst ± 5 % av anläggningens nominella spänningsnivå. Vindkraftparker skall utformas så att det reaktiva utbytet kan regleras till noll. Stora och medelstora produktionsanläggningar utom vindgrupper skall dimensioneras med möjlighet till reaktiv produktion samtidig maximal aktiv effektproduktion.

5.5 Effektregering

Vindkraftaggregat ingående i vindkraftgrupp skall ha individuell möjlighet till inställning av den nivå då aggregatet automatiskt stoppas på grund av yttre omständigheter. Vid stopp på grund av för stark vind får inte alla vindkraftaggregat i en vindkraftgrupp stoppas samtidigt. Högst får 30 MW per minut kopplas bort.

Vid högre vindhastigheter är det inte lämpligt att vindkraftaggregat i en park startas samtidigt. Högst 30 MW per minut bör inkopplas när vindkraftgrupp startas.

Det skall vara möjligt att kontrollera produktionen från en vindkraftgrupp så att produktionen inte överstiger ett bestämt effektvärde. Effektvärdet skall kunna vara reglerbart med en utifrån inkommande signal. Det skall vara möjligt att ändra i regleralgoritmen.

Produktionen skall kunna regleras så snabbt att den reduceras till under 20 % av maximal effekt inom 5 sekunder.

Stora och medelstora anläggningar, utom vindkraftgrupper, skall kunna klara effektregering inom ett givet effektområde enligt tabell 5.4.

Tabell 5.4: Effektregering av stora och medelstora anläggningar utom vindkraftgrupper

Anläggning	Reglerhastighet (%/minut)	Reglerområde (% av nom. effekt)	Effektområde (% effekt)
Vattenkraft	40	100	0-100
Kolkondens	4	30	60-90
Oljekondens	8	30	40-90
Kraftvärmeverk	4	30	60-90
Kärnkraftverk (PWR)	5	30	60-90
Kärnkraftverk (BWR)	10	30	60-90
Gasturbin (jettyp)	20	100	0-100
Gasturbin (industri- typ)	7	100	0-100

5.6 Kommunikation och styrbarhet

Vindkraftparken skall vara utrustad på ett sådant sätt att realtidsinformation rörande spänning, aktiv och reaktiv effekt, driftstatus och reglerförmåga kan göras tillgänglig för Svenska Kraftnät. Det är dock inte säkert att Svenska Kraftnät kräver att all denna information finns tillgänglig.

Exempel Lillgrund

Anslutande elnätbolag behöver möjligheter att kunna påverka vindkraftparken vid vissa kritiska situationer. I detta fall kommer vindkraftparken att utrustas med två funktioner som nätägaren kan kontrollera

- *"Mjuk nödstopp", om något fel tillstöter och effektinmatningen från vindkraftparken på regionnätet hastigt måste stoppas kommer systemet utrustas med en funktion som snabbt bromsar vindkraftparken men låter vindkraftparken bibehålla nätanslutningen.*
- *"Nödstopp", om ett allvarigare tillstånd tillstöter som kräver att vindkraftparken bryts bort skall nätägaren ha möjligheten att snabbt lösa ut 130 kV brytaren till vindkraftparken.*

5.7 Verifiering och dokumentation

Vindkraftparkens förmåga att uppfylla angivna krav skall vara verifierade. Verifiering att vindkraftparken uppfyller de krav som anges kan ske på olika sätt, exempelvis genom fullskaleprov, tekniska beräkningar, simuleringar och reläinställningsplaner.

Produktionsanläggningens konstruktion och däri ingående apparaters tekniska data skall vara dokumenterade. Då Svenska Kraftnät begär det skall det tillställas dokumentation om de tekniska data som är relevanta för i föreskrifter reglerade funktioner. Vid förändring av tekniska data skall Svenska Kraftnät informeras om detta.

Produktionsanläggningens dynamiska modell skall före idrifttagning av anläggningen ställas till Svenska Kraftnäts förfogande för studier på region- och stamnätet. Modellen ska direkt, utan att vidare implementeringsarbete krävs, kunna användas i programvaran PSS/E (simuleringssteglängd - 10 ms). Modellen skall i anslutningspunkten ge korrekt svar från vindkraftparken vid pendlings och varierande spänning och frekvens i anslutande nät.

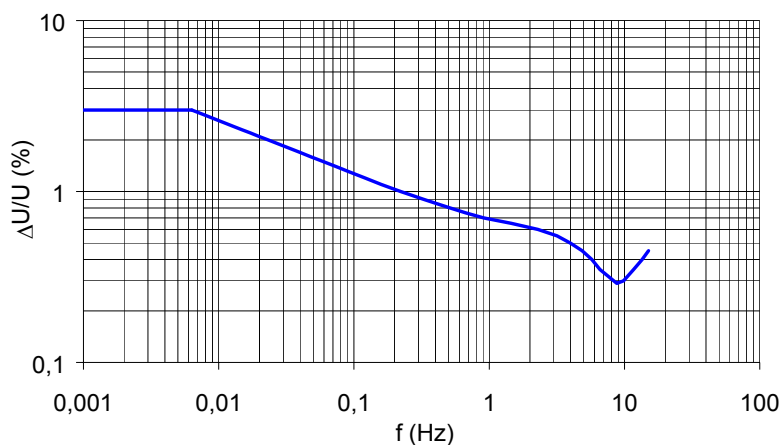
Det bör belysas att det i första hand är exploatörens ansvar att verifiera produktionsanläggningens egenskaper uppfyller med kraven från Svenska Kraftnät.

6 Elkvalitet

Vindkraftverk kan ge dynamiska störningar på elnätet till följd av en varierande effektproduktion samt vid styrning och reglering med kraftelektronik. I samband med att effekten i olika grad varierar under drift samt att spänningsändringar sker vid effektändringar förekommer flicker. Övertoner förekommer i första hand vid effektregering och styrning av spänning och ström med kraftelektronik. Svenska Kraftnät anger riktlinjer för elkvalitet på stamnätet (TR6).

6.1 Flicker

Ojämn effektproduktion 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 experimentellt uppmätta störnivå används för att beräkna det flicker som vindkraftverk genererar i anslutningspunkten. Figur 6.1 visar maximal tillåten spänningsförändring relaterat till förändringens frekvens.



Figur 6.1: Tillåten spänningsändring vid olika frekvenser [1].

Fältmätningar på låga kortslutningseffekter tyder på att vedertagen metod för att beräkna sammanlagring av flicker från flera källor i en anslutningspunkt inte helt stämmer. Normalt sett är flicker inget problem vid anslutning på regionnätet eftersom kortslutningskvoten ofta är relativt hög samt att inkopplingssekvensen av vindkraftverken kan styras så att flickeremissioner vid start hålls nere.

Exempel Lillgrund

För att åskådliggöra relevanta flickeremissioner från vindkraftparker på regionnätets nivå exemplifieras emissioner till regionnätet med indata från Lillgrundprojektets nätanslutning. Beräkningen avser 48 vindkraftverk med 2,3 MW per aggregat. Det bör påpekas att exemplet är fiktivt och använder indata för flickerstegsfaktorn (k_f) och flickeremissionsfaktorn (c_f) från vindkraftverk av typen DFIG (elkvalitetsdata erhålls från tillverkarens elkvalitetsdeklARATION). I detta exempel motsvarar teknikvalet "värsta fallet" för anslutningen. Det är alltså tänkbart att vindkraftverk med bättre egenskaper kan orsaka lägre nivåer av flicker.

Flera starter ($t=120$ minuter):

$$P_{lt} = 8 \cdot k_f(\psi_k) \cdot N_{120}^{\frac{1}{3,2}} \cdot \frac{S_{ref}}{S_k} = 8 \cdot 0,03 \cdot 48 \cdot 20^{\frac{1}{3,2}} \cdot \frac{2,3}{1840} = 0,037 \quad (6.1)$$

där N_{120} är antalet starter under två timmar, S_{ref} är ett vindkraftverks märkeffekt och S_k är kortslutningseffekten i anslutningspunkten.

Drift:

$$P_{lt} = \frac{S_{ref}}{S_k} c_f(\psi_k) \sqrt{n} = \frac{2,3}{1840} \cdot 2,04 \cdot \sqrt{48} = 0,018 \quad (6.2)$$

där S_{ref} är ett vindkraftverks märkeffekt, S_k är kortslutningseffekten i anslutningspunkten och n är antalet vindkraftverk.

Flicker från upprepade starter är normalt inget problem eftersom antalet starter kan kontrolleras. Beräkningen är utförd för att visa på de flickernivåer som kan uppstå vid relativt många starter. Däremot är flickeremissioner under drift intressant eftersom det inte är direkt påverkligt. Beräkningarna visar på låga nivåer av flickeremissioner under drift.

6.1.1 Rekommenderade gränsvärden för flicker

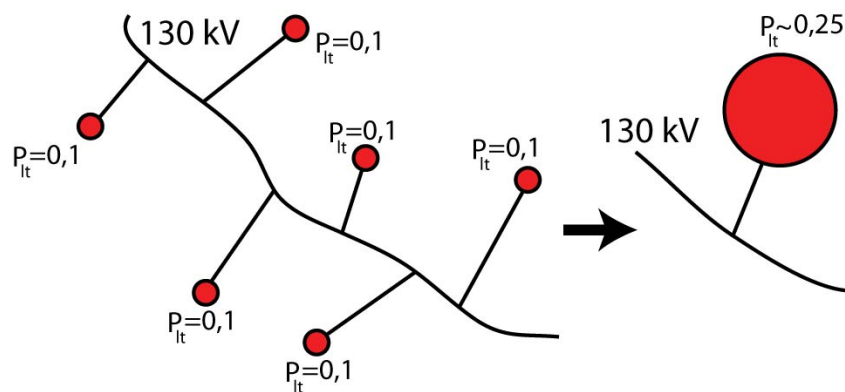
Om höga flickernivåer trots hög kortslutningseffekt uppstår är det mer allvarligt på höga spänningsnivåer (regionnät) jämfört med på lägre spänningsnivåer (distributionsnät). Det beror på att flicker fortplantas obehindrat utåt i nätet mot lägre kortslutningseffekt. Flicker från en källa långt ut i nätet avtar uppåt i nätet mot ökande kortslutningseffekt. Därmed bör ett lägre gränsvärde tillämpas för regionnätanslutningar jämfört med anslutning av produktionsanläggningar i distributionsnätet [9]. Generellt för vindkraftparker bör gälla att en anslutningspunkt skall vara så pass stark att ett antal större vindkraftparker går att ansluta till samma regionnätetsledning. Det sammanlagrade flickret under drift emitterat från en vindkraftpark på minst 25 MW anslutet till regionnätet bör därför inte överskrida $P_{lt}=0,1$.

Om vindkraftverken i flera vindkraftparker anslutna till samma ledning approximativt antas vara anslutna i samma punkt kan det sammanlagrade flickret från många vindkraftverk beräknas enligt:

$$P_{lt,tot} = \sqrt{\sum_k P_{lt,k}^2} = P_{lt} \cdot \sqrt{k} \quad (6.3)$$

där P_{lt} är flickeremissionen från vindkraftverk nummer k . I detta fall antas alla vindkraftverk ha samma flickeremission.

Gränsvärdet på $P_{lt}=0,25$ (för mindre vindkraftetableringar) erhålls i detta fall för ungefär sex vindkraftparker ($P_{lt}=0,1$ för varje vindkraftpark). Figur 6.2 visar en bild som beskriver denna sammanlagring av flicker från olika vindkraftparker på samma ledning.



Figur 6.2: Sammanlagring av flicker för flera vindkraftparker på samma regionnätledning.

Exempel Utgrunden

Utgrunden är en mindre havsbaserad vindkraftpark belägen i den södra delen av Kalmarsund. Vindkraftparken har sju vindkraftverk med DFIG-teknik med total märkeffekt på cirka 10 MW. Nätanslutningen sker via en 8 km lång 20 kV sjökabel till Degerhamn på Öland. Kortslutningskvoten är relativt låg i anslutningspunkten.

Mätningar på Utgrunden visar att uppmätt flicker från ett vindkraftverk multiplicerat med $\sqrt{7}$ resulterar i total flickeremission som är dubbelt så stor som den totala uppmätta flickeremissionen. Det är alltså möjligt att sambandet 6.3 överskattar den resulterande flickernivån från flera vindkraftparker.

6.2 Övertoner från omriktare och annan kraftelektronik

Konventionella kraftsystem arbetar med sinusformade spänningar och strömmar. Utrustning som kraftelektronik med olinjära komponenter deformerar den normala sinusformen på spänning och ström. Genom att studera vågformernas innehåll av övertoner kan generering och utbredning i kraftsystemet av dessa studeras.

Övertoner i kraftsystemet bidrar till ökade förluster och mekanisk utmattnings och därmed till förkortad livslängd. Utrustning kan skadas eller haverera be-

roende på samverkan mellan övertoner och resonansfenomen. Övertoner kan dessutom även störa ut kommunikation av kontroll- och skyddsutrustning.

6.2.1 Rekommenderade gränsvärden för övertoner

I en anslutningspunkt bör vindkraftparker inte bidra med strömövertoner så att THD (Total Harmonic Distorsion) ökar med mer än 2,5 % av referensströmmen i anslutningspunkten [4].

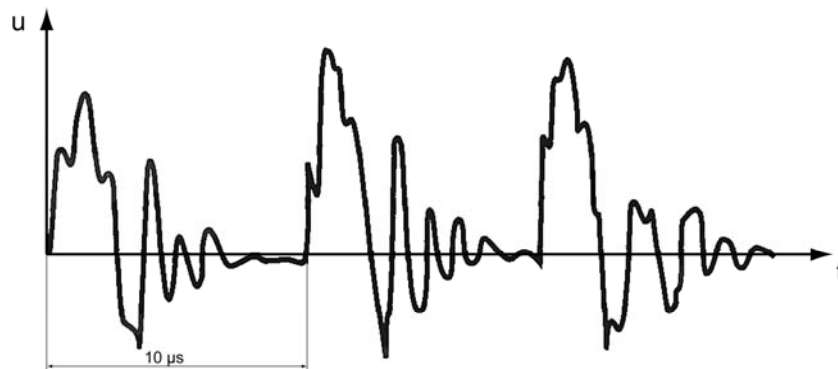
$$I_{ref} = \frac{P_{ab}}{U_n \cdot \sqrt{3}} \quad (6.4)$$

där P_{ab} är abonnerad effekt och U_n är nominell spänning

THD beräknas för deltoner upp till 50:e ordningen.

6.3 Transienter och resonans i samband med fel

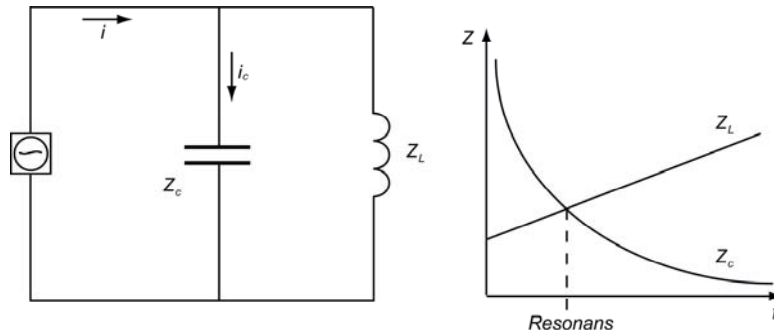
En transient är en mycket snabb förändring av spänningens eller strömmens amplitud. Transienten definieras normalt av amplitud, stigtid och halveringstid. Transienter kan uppkomma i samband med att fel inträffar eller vid spänningssättning efter att felet kopplats bort. Höga kopplingstransienter kan även uppkomma vid brytning av induktiva och kapacitiva kretsar. Vid t.ex. kopplingsmanövrar i ställverk kan kapacitiva störströmmar till jord uppstå. Dessa strömmar kan i sin tur beroende på nätimpedansen orsaka störspänningar [3]. Figur 6.3 visar en störspänning som kan uppkomma vid en kapacitiv koppling.



Figur 6.3: Transient störspänning vid kapacitiv koppling.

Transienter kan i samband resonansfenomen (förstärkningsfenomen) skapa farliga strömmar och spänningar. Resonans kan förhindras genom användning av synkroniserade brytare som bryter strömmen vid bästa tillfälle. Genom att använda filter kan skadliga frekvenser filtreras bort samtidigt som nätimpedansen och därmed resonansfrekvensen ändras. På så sätt kan nätimpedansen som ger resonansfrekvenser vilka sammanfaller med transienters svängningsfrekvens elimineras.

Figur 6.4 visar en parallell resonanskrets som vid en viss frekvens ger resonans.



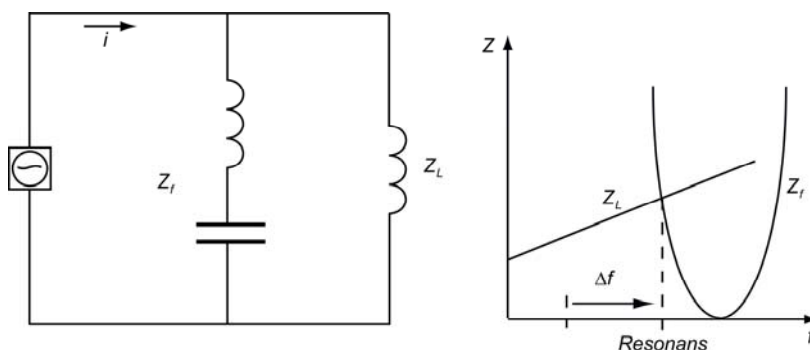
Figur 6.4: Parallellresonanskrets som representerar nätimpedansen i en viss punkt. Z_c är kapacitiv koppling till jord och Z_L är en induktiv last. Vid viss frekvens är beloppet på de två impedanserna lika vilket innebär att resonansfenomen uppstår mellan de två impedanserna.

Resonans uppstår när impedanserna Z_L och Z_c är lika stora. Som ett överslag kan den multipel på 50 Hz som ger resonans i nätet beräknas:

$$n = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (6.5)$$

där n är ordningstalet för den överton som ger resonans ($n = \omega_r / \omega_g$), ω_g är grundtonens vinkelfrekvens och ω_r vinkelfrekvensen vid resonans), S_k är kortslutningseffekten i betraktad punkt och Q_c är den kapacitiva kopplingen till jord.

Om t.ex. en induktor installeras förändras nätimpedansen och därmed den frekvens för när resonans uppstår. Serieimpedansen Z_f fungerar även som ett filter som kan leda bort skadliga frekvenser. Detta sker när resonans råder mellan de ingående komponenterna i Z_f och impedansen har sitt minimumvärde, se figur 6.5.



Figur 6.5: Parallellresonanskrets som motsvarar den i figur 6.4 men med en införd induktor. Resonansfrekvensen mellan nätimpedansen och lastens impedans förskjuts.

För att studera dynamiska fenomen i samband med fel är det möjligt att använda programvaror som PSCAD/EMTDC eller motsvarande. Fördelen med angiven programvara är att det är enkelt att revidera nätet och därmed studera hur transienter beror av t.ex. nätimpedans, strömbidrag etc.

6.3.1 Lokal nätdynamik - effektpendlingar

Effektpendlingar kan uppstå när transmission av effekt mellan olika nätdelar inte är konstant. I första hand innebär dessa effektpendlingar minskad överföringsförmåga. Mer allvarliga pendlingar kan dock leda till att anläggningsdelar förlorar synkronisering med nätet och därmed faller ur. Transient stabilitet är alltså ett mått på hur generatorer kan bibehålla nätanslutningen vid en störning som t.ex. kraftig ökning eller minskning av produktion, förlust av stor last eller vid ett fel. Kraftsystemets stabilitet kan relativt enkelt förutspås med "Equal-area" metoden. Denna beskrivs i sin korthet nedan.

Ekvation 6.6 beskriver den elektriska uteffekten från synkron generering (t.ex. vattenkraftverk eller kraftvärmeverk).

$$P_e = \frac{E_q \cdot V_s}{X} \sin \delta \quad (6.6)$$

där E_q är generatorns bakomliggande spänning, V_s är ett starkt näts spänning, X är total reaktans från generator till starkt nät och δ är fasvinkelskillnaden mellan generatorns bakomliggande spänning och spänningen dit effekten skall transporteras.

Om den mekaniska effekten är konstant och dämpning försummas kan genereringens svängning beskrivas med ekvation 6.7.

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (6.7)$$

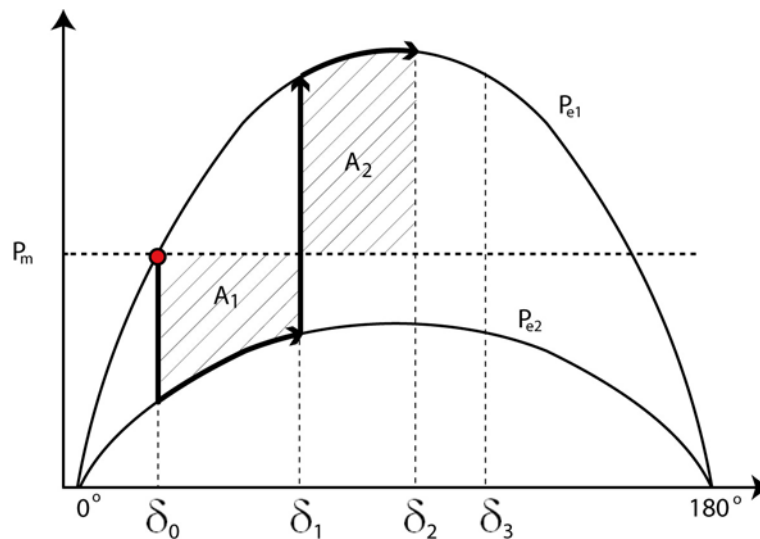
där M är en inertiakonstant och P_m är den mekaniska effekten.

När ett fel uppstår och överföringsförmågan i kraftsystemet minskar accelererar generatoren i och med att energi lagras i den roterade massan (δ ökar). När felet kopplas bort (δ_1) och överföringsförmågan återgår retarderar den roterande massan. Sambandet mellan mekanisk effekt och elektrisk effekt vid en sådan händelse visas i figur 6.6.

Om ett fel inträffar och överföring av elektrisk effekt minskar enligt P_{e2} lagras energin i den roterande massan enligt area A_1 . När elektrisk effektöverföring enligt P_{e1} återfås retarderar den roterande massan genom att lagrad energi åter överförs elektriskt ut på nätet. Genom att jämföra areorna A_1 och A_2 kan erhållen fasvinkel (δ_2) bestämmas. I figur 6.6 anges δ_3 som kritisk vilket innebär att om $\delta_2 > \delta_3$ fasvinkelskillnaden bli för stor och produktionen skulle tappa synkroniseringen.

Beroende på hur aktiv och reaktiv styrs under ett eventuellt felfall i produktionsanläggningar är det möjligt att egenskaperna för effektöverföring på anslutande elnät förändras. I kombination med annan generering som t.ex. vattenkraft och värmekraft kan därför denna typ av fenomen kräva att dynamiska studier utförs lokalt. Att generellt ange när denna typ av studier bör utfö-

ras är komplicerat och bör bedömas från fall till fall med specifika indata för produktionskällor och elnät.



Figur 6.6: Samband mellan elektrisk effekt och lastvinkel vid konstant mekanisk effekt.

I första hand är effektpendlingar mellan olika produktionsanläggningar i landet en fråga för Svenska Kraftnät. Det bör dock poängteras att effektpendlingar kan förekomma på lägre nivåer i nätet mellan t.ex. stora motorer i industrier och produktionsanläggningar som t.ex. Rya kraftvärmeverk.

Det finns även exempel på större vindkraftverk som har direktansluten synkrongenerator. Lokala nätägare kan därför bli utsatta för denna typ av fenomen även i samband med vindkraftproduktion [13].

7 Informationsutbyte mellan nätägare och exploatör

Designen av en produktionsanläggning påverkar egenskaper och möjligheter för en bra nätanslutning. Därför kan behovet av indata till de studier som måste utföras variera. En dialog måste föras mellan nätägare och exploatör om vad som krävs för en komplett systemstudie.

För att underlätta dialogen har en blankett tagits fram som kan användas i olika steg i projektet som hjälpmedel och guide. På blanketten finns ett vägledande vindkraftsexempel. Blanketten är dock utformad för att användas för alla typer av produktionsanläggningar. Tabell 7.1-7.3 visar erforderlig data för detta exempel. Det kan finnas fall när blanketten har parametrar som är överflödiga eller som behöver kompletteras.

För att understryka exploatörens ansvar avseende kraven från Svenska Kraftnät på en produktionsanläggning bör nätägaren upplysa exploatören om gällande föreskrifter. Det är lämpligt att "Affärsverket Svenska Kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar" bifogas blanketten.

Blanketten består av tre huvuddelar:

- *Allmänna uppgifter*
- *Tekniska uppgifter I*
- *Tekniska uppgifter II*

7.1 Allmänna uppgifter

Blankettens första del innehåller fält för allmänna uppgifter om projektet som kontaktuppgifter och projektnamn.

7.2 Tekniska uppgifter I

Denna del tillsammans med den första delen (Allmänna uppgifter) kan användas under processen för ett förhandsbesked, se kapitel 2. Här anges övergripande tekniska uppgifter om projektet som krävs för att nätägaren skall kunna göra en bedömning av anslutningsmöjligheter. T.ex. anges anläggningens placering och tänkt märkeffekt. Placeringen av produktionsanläggningen bör anges med karta och koordinater.

7.3 Tekniska uppgifter II

När möjliga anslutningar till kraftsystemet är identifierade och projektet går in i en mer detaljerad fas krävs mer ingående data för att nätägaren skall kunna utföra erforderliga systemstudier. Uppgifterna avser indata till nätägarens studier för prisindikation. Följande punkter finns med på blanketten och bör i möjligaste mån bifogas.

1. Elsystemets layout – För att studera produktionsanläggningens elsystem och dess påverkan på befintligt elnät vid en anslutning bör en layout presenteras. Detta görs enklast med någon form av enlinjeschema. En väl presenterad layout ökar möjligheterna för nätägaren att skapa en väl planerad anslutning. I schemat bör spänningsnivåer och typ av ledningar eller kablar ingå.
2. Ledningsdata – Beroende på val av ledningar påverkas lastflöde och felströmmar. Enlinjeschemat måste därför kompletteras med plus- och nollföljdsimpedanser och längder för det interna ledningsnätet.
3. Transformatordata – Ingående transformatorer i systemet påverkar bland annat lastflöde och felströmmar och därför måste omsättningar, plus- och nollföljdsimpedanser samt märkeffekter anges.
4. Reaktiv effektkompensering – Om anslutningens utformning gör att reaktiv effektkompensering krävs bör behovet och typ av kompenseringsutrustning anges.
5. Dynamisk modell – Den dynamiska modell av produktionsanläggning som exploatören bör förse nätägaren med kan vara av varierande detaljeringsgrad. Att skapa en exakt ekvivalent modell av en produktionsanläggning är komplicerat och kräver stor datorkraft. Modellen kan förenklas så att den endast motsvarar de egenskaper som relevanta att studera.

Ägaren till anslutande elnät bör i ett första läge förse med indata på egenskaper för felströmsbidrag från vindkraftparken (anges med värden på subtransienta reaktanser som kan implementeras i beräkningsmodellen, se kapitel 3.5.2).
6. Övriga uppgifter – Större produktionsanläggningar har normalt specifika förutsättningar som inte går att ange generellt. Exempel kan vara förslag på produktionsbegränsningar eller samkörning med andra anläggningar.

7.4 Blankett

Anslutning av Större Produktionsanläggning

Allmänna uppgifter

Företag	Telefon
Org. nummer	Email
Adress	Projektnamn
Kontaktperson	

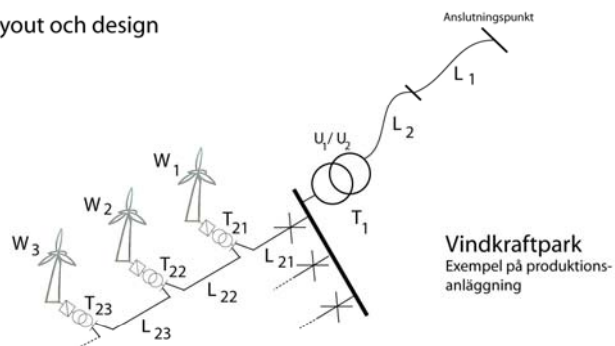
Tekniska uppgifter I (används för förhandsbesked)

Placering (karta bifogas)	Maximal inmatad effekt
Antal aggregat	Anläggningens systemspänning
Aggregatens märkeffekt & fabrikat	

Tekniska uppgifter II (bifogas och används för prisindikation)

Beskrivningen av elsystemets layout och design bör behandla följande:

1. Elsystemets layout
2. Ledningsdata
3. Transformatordata
4. Reaktiv effektkompensering
5. Dynamisk representation
6. Övrig indata som påverkar nätanslutningen



Datum och Ort

Underskrift

7.5 Exempel på data för "Tekniska uppgifter II"

R och X är angivet i Ω och C i μF .

Tabell 7.1: Ledningsdata

	Längd (m)	R₊	X₊	R_o	X_o	C	Ledararea (mm ²)	U (kV)	Kabeltyp
L₁	6300	0,34	0,66	1,36	0,47	1,6	1000	145	AXLJ
L₂	5500	0,31	0,64	1,25	1,0	1,4	800	145	FXCTV
L₂₁	800	0,12	0,10	0,40	0,28	0,17	240	36	FXCTV
L₂₂	800	0,12	0,10	0,40	0,28	0,17	240	36	FXCTV
L₂₃	800	0,12	0,10	0,40	0,28	0,17	240	36	FXCTV

Tabell 7.2: Transformatordata

	Koppling	R₊	X₊	R_o	X_o	U₁/U₂ (kV)	S (MVA)
T₁	Y/d	1,6	15,4	1,6	15,4	145/36	150
T₂₁	D/y	2,9	27,5	∞	∞	36/1	3,3
T₂₂	D/y	2,9	27,5	∞	∞	36/1	3,3
T₂₃	D/y	2,9	27,5	∞	∞	36/1	3,3

Tabell 7.3: Aggregatdata

	Fabrikat	Märkeffekt (MW)	Elektriskt drivsystem (DFIG/FEO)	X_d'' (pu)
W₁	WindPower	3,0	DFIG	0,2
W₂	WindPower	3,0	DFIG	0,2
W₃	WindEnergy	2,3	FEO	0,71

8 Nätägarens checklista

Anslutning av en större produktionsanläggning kan i stor utsträckning variera från fall till fall. Tidigare i rapporten beskrivs egenskaper, situationer, fenomen etc. som en nätägare ofta måste beakta i samband med utformning av en anslutning. Nedan följer en sammanställande checklista med kontrollpunkter för de åtgärder en nätägare bör överväga att vidta vid förfrågan om anslutning av en större produktionsanläggning.

1. Utarbeta en administrativ process som är anpassat till ärendet. T.ex. kan förslagen process i kapitel 2 tillsammans med anslutningsblanketten i kapitel 7 användas. Hur den administrativa hanteringen utformas beror på omständigheterna för respektive anslutning. Om mycket ny produktion planeras i samma område krävs normalt en mer ingående plan för hur produktionsanläggningarna hanteras.

2. Identifiera framtida scenarier för elnätets struktur som indata till kommande systemstudie. Ofta krävs lastflödesberäkningar för att kunna avgöra påverkan från anslutning av produktion. Normalt är det relativt långa ledtider från att en anslutningsförfrågan fram till en faktisk anslutning. Det är därför viktigt att nätstudierna utförs i ett större perspektiv där eventuellt ett större nätområde eller en region betraktas. Normalt kan inte enbart en specifik anslutning beaktas.

3. Eftersom anslutning av större produktionsanläggningar kan kräva någon form av åtgärd i befintligt nät är det viktigt att t.ex. en förstärkningsåtgärd är ekonomiskt motiverad både för exploatören och för nätägaren. Nätägaren bör bistå exploatören med avbrotts- och felstatistik och föra diskussion om nivå på leveranssäkerhet som exploatören behöver eller är beredd att betala för.

4. Vid utformning av anslutningsalternativ måste säkerställas att ledningsnätet, apparater och utrustning kan hantera effektflöde och därmed driftströmmar, spänningsvariationer, felströmmar etc.

I detta skede av processen används de scenarier som tagits fram i steg 2. Med uppgifter på önskad leveranssäkerhet från exploatören är det nu möjligt att utföra de tekniska studier som krävs för att säkerställa en lyckad anslutning.

5. Krav på och elkvalitet avseende utrymme för flicker och övertoner för aktuell anslutning bör preciseras för exploatören.

6. Det är upp till exploatören att tillse att produktionsanläggningen uppfyller kraven i "Affärsverket Svenska Kraftnätets föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar". Det bör påpekas att produktionsanläggningens funktion enligt föreskrifterna skall vara verifierade och dokumenterade.

7. Exploatören ansvarar för att resonans inte vid något tillfälle orsakas av produktionsanläggningen. Det krävs då att nätägaren bistår exploatören med erforderlig nätdata för att detta skall kunna säkerställas. Dessa studier utförs med fördel gemensamt.

8.1 Checklista - Tekniska studier

Nedan listas de tekniska studier som normalt bör utföras vid en nätplanering och utformning av anslutningsalternativ.

8.1.1 Lastflöde

1. Driftströmmar (överlast) och felströmmar
2. Spänningsvariationer och spänningshållning
3. Förluster
4. Reaktiv effektbalans, stora kabelnät kräver ofta någon form av kompenser-
ring.

8.1.2 Dynamik

1. Felströmsbidrag vid spänningsdippar
2. Exploatören skall svara för att anläggningen är verifierad och följer de krav som Svenska Kraftnät föreskriver avseende effektproduktion vid olika förut-
sättningar och bibehållen nätanslutning vid spänningsdippar.
3. I vissa fall i kombination med synkronmaskiner finns anledning att stude-
ra uppkomsten av effektpendlingar.

9 Förklaringar

Anslutningspunkt

Den punkt där elektrisk energi överförs till en installation.

ASP

Rapporten "Anslutning av Större Produktionsanläggningar" fokuserar på anläggningar större än 25 MW anslutna till regionnätet.

Choppers

Effektresistorer där eventuellt överskott av aktiv effekt "bränns upp" för att t.ex. inte överbelasta kraftelektronik.

Doubly Fed Induction Generator, DFIG

Asynkrongenerator som har en sekundär matning där rotorströmmarna kan regleras.

Dynamiska förlopp

Snabba tidsberoende fenomen kallas dynamiska förlopp och dessa beror av det interna och det anslutande elnätets dynamiska egenskaper. Studier på dessa korta fenomen kräver dynamisk representation.

Exploatör

T.ex. person, förening eller företag som avser bygga och ansluta produktion till kraftsystemet.

Flicker

Fluktuationer i ljusintensitet hos en glödlampa beroende på variationer i spänningen. Benämns ibland flimmar i svensk litteratur.

Fulleffektomriktare, FEO

Vindkraftaggregat med fulleffektomriktare styr hela effekten ut på nätet med kraftelektronik. Det innebär att generatoren och nätet är systemmässigt separerade från varandra.

Inkoppling av produktionsanläggning (SVK)

Inkoppling av vindkraftgrupp bör högst ske med 30 MW per minut.

Internt elnät

Elnätet som förbinder aggregat inom produktionsanläggningen en.

Lindningskopplare

Varierande spänning i nätet kan kompenseras genom att omsättningen på transformatorer regleras. För att reglering inte skall ske kontinuerligt finns vissa trigningsnivåer för när lindningskopplaren skall stega om.

Miljökonsekvensbeskrivning, MKB

Avser identifiera och beskriva de direkta och indirekta effekter en planerad verksamhet kan medföra på människor, djur, växter, mark, vatten, luft, kli-

mat, landskap och kulturmiljö, dels på hushållningen med mark, vatten och den fysiska miljön i övrigt, dels på annan hushållning med material, råvaror och energi.

Okontrollerat bortfall

Kan uppstå vid fel/haveri i t.ex. en vindkraftpark eller på en transmissionsledning.

Pitchreglering (bladvinkelreglering)

Metod för att reglera momentet från turbinen på generatoren i ett vindkraftverk genom att vrida vingarna.

Reservdrift (redundans)

Alternativ driftläggning med andra ledningar än de som i normala fall nyttjas.

Sammankopplingspunkt

Den punkt i nätet som är elektriskt närmast till en specifik anläggning till vilken andra producenter eller konsumenter är eller kommer att anslutas.

Stallreglering (överstegringsreglering)

Metod för att begränsa momentet från turbinen på generatoren i ett vindkraftverk. Bladens aerodynamiska form åstadkommer turbulens och därigenom en momentminskning vid höga vindhastigheter.

Stationär spänning

Avser spänningens effektivvärde mätt som medelvärde över 10 minuter.

Stoppvind

Avser höga vindhastigheter (>25 m/s) när vindkraftverken stoppas för att undvika orimlig mekanisk påkänning.

Transformatorplattform

Transformatorstation som placeras på fundament ute till havs vid vindkraftparken.

Transmissionskabel

Elektrisk förbindelse mellan produktionsanläggning och anslutningspunkt.

Uppsamlingsradial

Radial som ansluter aggregat inom ett begränsat område.

Urkoppling (SVK)

Urkoppling av vindkraft bör högst ske med 30 MW per minut.

Vindkraftpark (vindkraftgrupp)

Vindkraftverk inom ett geografiskt område som är anslutna till samma punkt i nätet.

Ö-drift

Uppstår då en produktionskälla matar ett lokalt nät som är fränkopplat från ett starkt frekvensstyrande nät.

10 Referenser

- [1] "Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet" (AMP), Sveriges elleverantörer 1999.
- [2] Blomqvist H. (redaktör); Elkraftsystem 1; Liber; Stockholm 2002
- [3] Blomqvist H. (redaktör); Elkraftsystem 2; Liber; Stockholm 2002
- [4] "Elkvalitetskrav och reaktiva effektkrav på kundens samt nätägarens data vid 20 kV anslutningspunkt i Bergkvara", Elkvalitetskrav och Nätdeklaration mot Sydskraft Elnät 20 kV skena i Bergkvara.
- [5] Ellerth, P.; Larsson, R.; Larsson, Å.; "Systemstudie Kriegers flak", Rapport, SwedPower AB (nuvarande Vattenfall Power Consultant), Trollhättan, 06-04-25.
- [6] Karlsson, D.; Lindahl, S.; "Slutrapport Systemstudie för anslutning av Kriegers flak vindkraftpark till E.ON:s 130 kV nät i Skåne", Rapport, Gothia Power AB, Göteborg, 06-03-23.
- [7] Manitoba HVDC Research Centre: User's Guide on the Use of PSCAD, April 30, 2004, Version 4.1.0
- [8] Petersson, A.; Ullah, N.R.; "Modellering av vindkraftparken Kriegers flak – för felfallsstudier i överliggande nät", Avdelningen för Elteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 2005-12-15.
- [9] Larsson, R.; Larsson, Å.; "Sammanlagring av flicker från vindkraftverk"; Rapport, Elforsk, Stockholm, 05/06.
- [10] Larsson, Å.; "Framgångsrik elprojektering av vindkraftgrupper", Rapport, Elforsk, Stockholm, 2003.

- [11] Stenborg, B; Systembeskrivning och driftanalys, Institutionen för elkraftsystem, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1991.

- [12] Svensson, J. H.; Personlig korrespondens, "Mätningar Rödsand (Nysted)", email, 2006-05-04.

- [13] DeWind Technical Brochure, tillgänglig på
http://www.eunrg.com/assets/Dewind_8-2_8pageBrochure_U SLetter_v12_lowqual_for_emailing.pdf [31 oktober, 2006]