

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Stokastiska modeller för framtidens smarta transmissionsnät	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Stochastic models for future smart electricity transmission grids	
Universitet/högskola/företag Luleå tekniska universitet	Avdelning/institution Energivetenskap / Teknikvetenskap och matematik
Adress Forskargatan 1, 931 87 Skellefteå.	
Namn på projektledare Math Bollen	
Namn på ev övriga projektdeltagare Fatemeh Hajeforosh, Zunaira Nazir, Sarah Rönnerberg, Manuel Alvarez, Lars Abrahamsson	
Nyckelord: 5-7 st Eltransmission och –distribution; dynamisk belastningsförmåga; smarta elnät; driftsäkerhet och tillförlitlighet av elnät; överbelastningskydd; HVDC	

Förord

Projektet ”stokastiska modeller för framtidens smarta transmissionsnät” finansierades av Skellefteå kraft elnät samt Energimyndigheten. Projektet utfördes i parallellt med ett Energiforskningsprojekt, ”Stokastiska modeller för dynamisk belastbarhet av luftledningar” och ett internt LTU projekt. Energiforskningsprojektet syftade mot spridning av resultat och kunskaper till framförallt elnätsföretag; LTU projekts mål var att starta relevant forskning om stokastisk driftsäkerhet of transmissionsnät.

Detta projekt och energiforskningsprojektet hade en gemensam referensgrupp med representanter från Skellefteå Kraft AB, Vattenfall Eldistribution AB, E.ON Energidistribution AB, Ellevio AB, Jämtkraft Elnät AB, Independent Insulation Group Sweden AB, och Hitachi Energy Sweden AB.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Innehållsförteckning	2
1 Sammanfattning.....	2
2 Summary.....	3
3 Inledning/Bakgrund	5
3.1 Stokastik och smarta elnät	5
3.2 Belastningsförmåga av komponenter.....	5
3.3 Dynamisk belastningsförmåga.....	6
3.4 Termiska modeller	6
3.5 Dynamisk belastningsförmåga och nedstyrning	7
3.6 Överbelastningsskydd.....	8
3.7 Stokastisk driftsäkerhet.....	8
3.8 Högsäpänd likström (HVDC).....	9
4 Genomförande	9
5 Resultat	9
5.1 Dynamisk belastningsförmåga.....	9
5.2 Dynamisk belastningsförmåga och överbelastningsskydd	11
5.3 En detaljerad stokastisk modell för dynamisk belastningsförmåga.....	12
5.4 En kvantitativ stokastisk modell för dynamisk belastningsförmåga	14
5.5 Användning av stokastisk modell av dynamisk belastningsförmåga i drift och planering.....	16
5.6 Solcellsanläggningar, överbelastning av transformatorer, acceptansgräns och dynamisk belastningsförmåga.....	17
5.7 Stokastisk driftsäkerhet av transmissionsnät	18
5.8 En stokastisk modell för HVDC	20
6 Diskussion.....	20
6.1 Energirelevans	20
6.1.1 Behov på överföring av elektrisk energi.....	20
6.1.2 Dynamisk belastningsförmåga.....	21
6.1.3 Stokastisk driftsäkerhet.....	21
6.2 Samhällsrelevans	22
6.3 Dynamisk belastningsförmåga.....	22
6.4 Överbelastningsskydd.....	23
6.5 Stokastisk driftsäkerhet.....	23
6.6 Utbildning och användning av stokastiska metoder	24
7 Publikationslista.....	24
8 Referenser, källor.....	25
9 Bilagor	27

1 Sammanfattning

Elnätet sätter en del hinder mot övergången till ett hållbart energisystem och stokastiska metoder, baserade på sannolikhetslära, kan faktiskt minska en del av dessa hinder. Det må låta märkligt att en ren matematisk metod, sannolikhetslära,

kan hjälpa till i något så konkret som övergången till ett hållbart energisystem, men det som sannolikhetslära dock möjliggör är en bättre avvägning av de olika riskerna. Ofta varierar riskerna mycket med tid och i planering av elnätet har en av grunderna alltid varit att risken för elnätet, för deras komponenter samt för personsäkerheten ska vara så låg som rimligvist möjligt. Vid risker som varierar med tid tas det något extrem fall som dock under de senaste åren har blivit ett hinder mot till exempel ytterligare elektrifiering och anslutning av förnybar elproduktion. Genom att bättre kunna kvantifiera riskerna går det att göra, även i realtid, en avvägning mellan till exempel risker för elnätet med att tillåta laddning av många elbilar och konsekvenser för koldioxidutsläpp av att begränsa laddningen.

Projektet har riktat sig framförallt mot två exempel av det som ofta kallas för smarta elnät: ny teknologi eller nya metoder som gör det enklare att ta hand om de stora utmaningarna som elnätet står framför. Dessa två metoder är dynamisk belastningsförmåga och stokastisk driftsäkerhet.

Dynamisk belastningsförmåga används redan i mindre utsträckning av vissa elnätsföretag för att begränsa behov på nya luftledningar vid anslutning av vindparker. I projektet har det visats att metoden har stor potential även för matning till svenska städer och för elektrifiering av transportsektorn. Det har också utvecklats en metod för att räkna ut sannolikheten på överbelastning av en komponent, istället av att bara ange om en komponent är överbelastat eller inte. Risken med att inte ta åtgärder kan då avvägas på ett bättre sätt mot risker med att ta åtgärder. Dynamisk belastningsförmåga har i projektet, på en mycket större del än vid annan forskning, relaterats till överbelastningsskydd. Det har då bland annat observerats att det finns mycket begränsad med forskning gjort om överbelastningsskydd.

Stokastiska metoder för driftsäkerhet av transmissionsnät används inte av elnätsföretag; istället baseras driften och planering på (N-1)-kriteriet, som inte tar med variationer i sannolikhet och konsekvenser med tid. Det finns en begränsad mängd forskning inom stokastisk driftsäkerhet; i projektet har det forskats vidare med detta och har det bland annat konstaterats att det behövs en ändring i forskningsfokus för att kunna få metoderna att användas av elnätsföretagen. Forskningen inom projektet har därför framförallt riktat sig åt definitioner av allvarlighetsindikatorer och metoder för att presentera och interpretera beräkningsresultat.

Utöver en hel del kvarstående forskningsbehov, behövs det också en överföring av kunskaper och forskningsresultat till elnätsföretag och andra intressenter. Både forskningsprojekt och utbildning behövs för detta.

2 Summary

The electricity grid places a number of barriers against the transition to a sustainable energy system and stochastic methods, based on probability theory, can actually reduce some of these barriers. It may sound strange that a purely mathematical method, probability theory, can help in something as concrete as the

transition to a sustainable energy system. However, what probability theory makes possible is a better balancing of the various risks involved. The risks often vary significantly with time. In planning the grid, one of the basic rules has always been that the risk to the grid, to its components and to personal safety must be as low as reasonably possible. In the case of risks that vary with time, an extreme case is taken which, however, in recent years has become an obstacle to, for example, further electrification and integration of renewable electricity production. By being able to better quantify the risks, it is possible to make a balance between, for example, risks for the grid by allowing charging of many electric cars and consequences for carbon dioxide emissions from limiting this charging. Such a balance can and should even be made in real-time, not just during long-term planning of the grid.

The project has primarily focused on two examples of what is often referred to as smart grids: new technology or new methods that make it easier to take care of the major challenges faced by the electricity grid. These two methods are, dynamic component rating and operational risk assessment.

Dynamic component rating is already used to a lesser extent by some network operators to limit the need for new overhead lines when connecting wind farms. In this project, it has been shown that the method also has great potential for supply to Swedish cities and for electrification of the transport sector. A method has also been developed to calculate the probability of overloading a component, instead of just indicating whether a component is overloaded or not. The risk of not taking action can then be weighed in a better way against risks of taking action. Dynamic line rating has in this project, much more than in other research projects, been related to overload protection. It has then been observed, among others, that there is very limited research done on overload protection.

Stochastic methods for operational security assessment of transmission networks are not used by network operators; instead, operation and planning are based on the (N-1) criterion, which does not include variations in probability and consequences over time. There is a limited amount of research on operational risk assessment. In this project, further research has been done on this subject and it has been established, among other things, that a change in research focus is needed in order to be able to get methods for operational risk assessment used by the network operators. The research within the project has therefore primarily been focused on definitions of severity indicators and methods for presenting and interpreting calculation results.

In addition to several specific research tasks, there is also a need to transfer knowledge and research results to network operator and other stakeholders. Both research projects and education are needed for this.

3 Inledning/Bakgrund

3.1 Stokastik och smarta elnät

Detta projekt handlar om en del alternativa tillvägagångssätt i elnätet som går under namnet ”smarta elnät”. Det finns olika definitioner av smarta elnät, och vilken definition är mest lämpligt beror på tillämpningen och på vilken intressent det handlar om. Det finns, till exempel, andra definitioner för produkttillverkare, för standardisering och för tillsynsmyndigheter. Något som de flesta är dock eniga om är att smarta elnät gör det enklare att ta hand om elförsörjningens utmaningar. En stor utmaning som finns för elnätet numera är att ansluta ny produktion och/eller ny förbrukning. Den klassiska lösningen är då att bygga luftledningar, kablar, transformatorer, mm. Sådant brukar ta en lång tid, säkert på högre spänningar, och det är också ofta kostsamt. Smarta lösningar skulle i så fall vara att kunna öka utrymmet för ny produktion eller förbrukning snabbare och/eller till lägre kostnad.

I detta projekt har det tagits upp tre olika exempel av smarta lösningar:

- Dynamisk belastningsförmågan. Se avsnitt 3.3.
- Högspänd likström (HVDC). Se avsnitt 3.8.
- Stokastisk driftsäkerhet i transmissionsnät. Se avsnitt 3.7.

Sista lösningen är redan i grunden en stokastisk metod, då sannolikheter spelar en viktig roll. Vid dynamisk belastningsförmågan och HVDC tas sannolikheterna oftast inte med i bedömningen; i detta projekt kommer vi dock att ta med dessa också.

3.2 Belastningsförmåga av komponenter

Luftledningar, transformatorer och kablar är viktiga komponenter i elnätet. De klarar en viss spänning och en viss ström. Ju högre spänningen och ju högre strömmen, ju mer elektrisk energi komponenten kan överföra. Spänningen som en apparat klarar bestäms av isolationsförmågan, som beror på komponents omformning. Det som sätter främst gräns på strömmen är komponenttemperaturen. Det finns olika gränser vid olika typer av apparater. Temperaturen bestäms av balansen mellan uppvärmningen (framförallt strömmen genom komponenter, termiska förluster) och kylning (på grund av en del väderparametrar). Detaljerna varierar mellan komponenter. Högsta tillåtna strömmen genom en komponent kallas för ”överföringsförmåga”; en situation då strömmen är högre än överföringsförmågan kallas för ”överbelastning” och många komponenter i elnätet är försatta med överbelastningsskydd.

Som sagt, då finns det en maximum tillåten temperatur för, till exempel, en luftledning. Men belastningsförmåga uttrycks som en ström eller en effekt (roten av tre gånger strömmen gånger märkspänningen).

Den klassiska lösningen är att välja ett vist extremt väderförhållande, till exempel en längre period med hög temperatur och låg vindhastighet. Extremt betyder i

detta fall extremt vad gäller kylning av komponenten. Belastningsförmågan motsvarar då den högsta strömmen som komponenten klarar även under dessa extrema förhållanden. Denna statiska belastningsförmåga är konstant över komponenterna livslängd.

Nästa steg är säsongsinställningar, som används för luftledningar i transmissionsnät i flera länder. Belastningsförmågan för vintern bestäms då för extrema förhållanden under vintern, och likadant för sommaren. Det skulle kunna klassas redan som dynamisk belastningsförmåga, men begreppet brukar användas bara när belastningsförmåga bestäms av prognostiserat eller uppmätt väder och då ändras till exempel varje timme. Denna belastningsförmåga refereras till som momentan belastningsförmåga.

3.3 Dynamisk belastningsförmåga

Det grundläggande konceptet för dynamisk belastningsförmåga, att belastningsförmågan för en ledning skulle variera under drift baserat på väderparametrar, introducerades på 1980-talet [15, 16, 17] och flera grundläggande artiklar skrivs om ämnet på 1990-talet [18, 19, 20]. På senare tid fick dynamisk belastningsförmåga betydande uppmärksamhet för integrering av vindkraft; grundidén är att hög produktion från vindkraft inträffar för höga vindhastigheter vilket innebär en högre belastningsförmåga av ledningar [21].

Tillämpningen av dynamisk belastningsförmåga i kraftsystemet med dess fördelar är fokus för flera artiklar [22, 23, 24]. En översikt över några praktiska implementeringar av metoden presenterades nyligen i [25]. Mer om litteraturen om dynamisk belastningsförmåga finns i [4] och [5].

Trots olika fördelar som rekommenderas i litteraturen kommer det alltid att finnas en osäkerhet i belastningsförmåga. Överskattning av belastningsförmågan kan leda till att ledartemperaturen överskrider dess maximala gräns och underskattning kommer att ge ytterligare hinder för ny produktion och konsumtion. Studier i detta avseende fokuserar på noggrann modellering genom prognoser och stokastiska metoder för att noggrant kunna förutsäga framtida värden för vädervariabler, medan det tas hänsyn till möjliga risker. Detta projekt har riktat som mycket mot att utveckla stokastiska modeller för att kunna ta med osäkerheterna i beslutsprocesser.

3.4 Termiska modeller

Dynamisk belastningsförmåga beror till stor del på noggranna termiska modeller av komponenter som luftledningar, transformatorer och kablar. Likande modeller används för att beräkna den statiska belastningsförmågan, men det är vid dynamisk belastningsförmåga att det blir även mer viktigt att ha noggranna modeller.

Termiska modellen för luftledningen brukar ta med omgivningstemperaturen, vindhastigheten och vindriktningen i modellen [4][5]. Strålningstermerna brukar försummas; en detaljerat beskrivning och bedömning av deras relevans har gjorts i projektet [11].

Att räkna ut temperaturen för en given tidförlopp av strömmen och väderparametrar kräver lösning av en del olinjära differentialekvationer, som bara är möjligt med numeriska metoder. Numeriska metoder behövs även för att få den stationära lösningen när strömmen och alla väderparametrar är konstanta. Det är dock möjligt att få en ekvation för den ström som ger, i stationärt tillstånd, en viss ledartemperatur. Det är denna ekvation som har används i detta projekt för att beräkna den momentana belastningsförmågan av luftledningar. Tidsberoendet av strömmen och väderparametrar har inte tagits med för luftledningar. Mer detaljer om detta finns i [4] och [5].

För transformatorer är tidskonstanter betydligt längre, upp till ett flertal timmar, och antagandet att systemet är i stationärt tillstånd är inte längre rimligt att ta. Då har tidsförloppet av temperaturen tagits med i modellerna och går det inte längre att definiera ett värde på den momentana belastningsförmågan. En noggrann termisk modell för transformatorer, som har används i projektet, finns beskriven i [7] och [12].

3.5 Dynamisk belastningsförmåga och nedstyrning

Den momentana belastningsförmågan är ofta högre och även betydligt högre än den statiska belastningsförmågan. Det betyder att det under många timmer av året finns mer överföringskapacitet än enligt den statiska belastningsförmågan. Det är dock också viktigt att ange att det inte leder till ökning av "firm capacity", ingen ökning av garanterat kapacitet. Det gör det att det finns begränsningar i tillämpning av dynamisk belastningsförmåga. Om det behövs en garanterat kapacitet, då kan det behövas andra metoder.

I Sverige är högsta förbrukning ofta under vintern, då den momentana belastningsförmågan är högre än under sommaren. Det finns därför potential för dynamisk belastningsförmåga i Sverige, som just nu fortfarande inte används så mycket. Det finns en del tillämpningar vid vindkraftsanläggningar, då tanken är att kylningen är bättre när det blåser, som redan nämndes förut. Tillämpning av dynamisk belastningsförmåga för vindkraft nämns regelbunden i litteraturen; tillämpning för att mata hög vinterförbrukning nämns mindre ofta.

Att kombinera dynamisk belastningsförmåga med nedstyrning ökar potentialen även mer. Här beror det helt enkelt på hur ofta hög (termisk) belastning inträffar och om det är något som händer till exempel varje dag. För att nedstyrning ska ha hög potential gäller det att kombinationen hög belastning, låg kylning (låg momentant belastningsförmåga) har än låg sannolikhet.

För att kunna kombinera dynamisk belastningsförmåga med nedstyrning behövs det en del investeringar i form av övervakning och en metod att bestämma när nedstyrning behövs. Det även behövs en metod att kunna kommunicera mellan komponenten (till exempel luftledningen eller transformatorn) och produktion eller förbrukning som kan styras ner vid behov.

3.6 Överbelastningsskydd

Överbelastningsskydd är vanligt i flera delar av elnätet, från de lägsta spänningar till de högsta spänningar. Hemma finns det säkringar eller dvärgbrytare som löser ut vid en överbelastning. Det var utlösning av ett överbelastningsskydd till en 400-kV ledning som bidrog till separation mellan Spanien och Frankrike i juli 2021 [26].

Det finns dock begränsad med forskning på gång om överbelastningsskydd och det finns bland annat ingen information om hur bra presentandan av det befintliga överbelastningsskyddet är. Det är då viktigt att skilja mellan prestanda av själva skyddsrelät (som brukar vara hög) och prestanda av skyddsfunktionen som relät utför.

Konceptet överbelastningsskydd kommer i projektet att tas betydligt bredare än den vanliga tolkningen, som bara refererar till automatisk utlösning av en komponent genom ett skyddsrelä som detekterar en överbelastning. Ofta är ett sådant relä baserat på överström och tid för att detektera överbelastningen. I detta projekt har vi utvecklat en mer generell definition av överbelastningsskydd, då det ingår alla åtgärder som tas för att förebygga överbelastning av komponenten. Det innehåller nedstyrning av förbrukning eller produktion men även manuella åtgärder i kontrollrummet.

Tillämpning av dynamisk belastningsförmågan gör att det behövs regelbundna ändringar av tröskelvärden i överbelastningsskydd. Här är det viktigt att det finns rätt balans mellan risken med att göra åtgärder som inte hade behövs (onödig utlösning) och risken att inte ta åtgärder medan de behövs (bristande utlösning).

3.7 Stokastisk driftsäkerhet

Det finns olika sätt att förebygga avbrott i transmissionsnät: i planeringsfasen (oftast flera år i förväg) och kort innan eller även under drifttimmen (upp till några dygn i förväg). Det brukar då användas deterministiska metoder, som (N-1) och (N-2)-kriterier.

Ett viktigt verktyg för att upprätthålla robustheten av transmissionsnätet är driftmetoden, då driftsäkerheten hålls nästan alltid tillräckligt hög, genom (N-1)-kriterier eller liknande. Tankesättet då är ”för ett kraftsystem att vara tillförlitligt ska det vara driftsäkert största del av tiden” [27, 28]. I nuvarande drift av transmissionsnät används det deterministiska metoder, som har resulterat i att det finns väldigt sällan avbrott på transmissionsnätsnivå. Det finns dock vissa begränsningar vid denna ”deterministiska driftsäkerhet” som skulle kunna tas bort genom att använda ”stokastisk driftsäkerhet”.

- Under vissa perioder är det väldigt låg sannolikt att det blir ett komponentbortfall i elnätet; då kan (N-1) kriteriet sätta ett onödigt hinder mot, till exempel, produktion från vindkraft eller stora mängder elbilsladdning.

- Det finns perioder med betydligt högre sannolikhet på komponentbortfall (som under en storm på västkusten), då det skulle behövas en större driftreserv än enligt (N-1) kriteriet.

Det som behövs då är metoder för att kvantifiera risken under drift ("driftrisk" och "driftriskberäkningar", efter engelska begrepp "operational risk" och "operational risk assessment").

Första tillämpningar av stokastisk driftsäkerhet fanns redan i 60-talet [29] och har används för korttidsplanering av produktionsenheter. Det gjordes några studies om att använda liknande metoder för drift av transmissionsnätet, med bland annat en del Svensk-norska projekt [30] och som till slutet ledde till ett stort Europeiskt samarbetsprojekt [31] och en del liknande studier i Portugal [32] och Island [33]. Det finns dock fortfarande många utmaningar kvar innan det kan komma till definitioner och beräkningsmetoder som kan användas.

3.8 Högspänd likström (HVDC)

Klassiska sättet att transportera elektrisk energi i stora mängder över långa avstånd är med hjälp av växelström (50 Hz i Sverige och stora delar av resten av världen). I de flesta fall är det bästa lösningen, men det finns vissa begränsningar och i sådana fall kan HVDC vara ett bra alternativ. Högspänd likström passar inte helt in i ovannämnde beskrivning av smarta elnät, eftersom det är ju en stor investering och att bygga en HVDV förbindelse kan också ta ett flertal år. Det finns dock fall då växelströmförbindelser helt enkelt inte kan användas, skulle ha vissa nackdelar eller inte skulle ge samma ökning av möjligheter till ny förbrukning eller produktion.

4 Genomförande

Projektet har till stor del utförs som ett doktorandprojekt med Fatemeh Hajeforosh som doktorand och Math Bollen som huvudhandledare; bi-handledarskap har tagits i början av Lars Abrahamsson och senare av Sarah Rönnberg. Delen om stokastisk driftsäkerhet har utförs inom ett doktorandprojekt med Zunaira Nazir som doktorand, Math Bollen som huvudhandledare och Manuel Alvarez som bihandledare.

5 Resultat

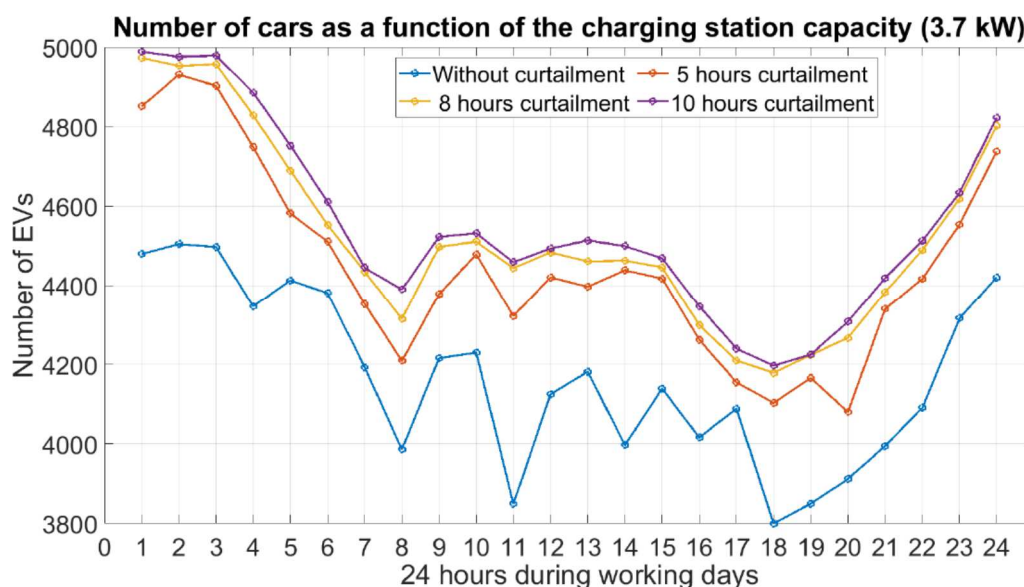
5.1 Dynamisk belastningsförmåga

För att illustrera potentialen och begränsningar vid dynamisk belastningsförmåga av luftledningssystem skapades det en hypotetisk stad, Belasteå, då information om nätet, förbrukning och produktion för ett antal städer i Norra Sverige kombinerades. Den hypotetiska staden beskrivs i [4] och [5], då det anges ett flertal exempel, med och utan nedstyrning samt med och utan stokastiska modeller. En del av exempel används även i denna rapport.

För att bedöma hur mycket som kan vinnas i överföringsförmåga genom att använda dynamisk belastningsförmåga har det använts förbrukningsdata för Belasteå under samma åtta-årsperiod som det fanns väderdata för. En befintlig luftledning har använts och förbrukningsdata har skalats så att högsta förbrukningen under åtta-årsperioden blev lika med den statiska belastningsförmågan av ledningen, 19,7 MW. Skulle man utgå från den statiska gränsen, då skulle det inte finnas utrymme för någon ökning av belastning alls.

För varje timme under åtta-årsperioden beräknades timvärdet av belastningsförmågan. Skillnaden mellan förbrukningen för denna timma och den beräknade belastningsförmågan var då timmens acceptansgräns för ny förbrukning. Hänsyn togs till dygnsvariationer och veckovariationer i elbilsaddning; och det har räknats ut en ”garanterad acceptansgräns” för varje timme under arbetsdagar och under helgdagar. Resultat visas i Figur 1, som den blåa kurvan (”without curtailment”). Figuren visar, till exempel, att det finns utrymme att ladda 3800 bilar på 3,7 kW, på veckodagar kl. 6 på kvällen utan att det någonstans blir överbelastning av ledningen. (Mer korrekt angivet: utan att det hade blivit överbelastning någon gång denna timme under de 8 åren. Antagandet som gjordes är att det inte kommer att finnas förändringar i mönster för vädret och förbrukning utöver laddning av elbilar.)

Nästa försök var att inte ta lägsta värdet av acceptansgränsen utan istället den ökning av förbrukningen som skulle leda till överbelastning under fem timmar varje år (dvs 40 timmar under åtta-årsperioden). Kombineras dynamisk belastningsförmåga med nedstyrning av belastning vid behov, då skulle det behövas nedstyrning fem timmar om året. Samma beräkningar gjordes för nedstyrning 8 och 10 timmar om året. Resultatet visas också delvis i Figur 1. Mer resultat finns i [4] och [9].



Figur 1. Antalet elbilar (på 3,7 kW) som kan laddas samtidigt, utöver den vanliga lasten av Belasteå, innan luftledningen blir överbelastad, arbetsdagar [4].

5.2 Dynamisk belastningsförmåga och överbelastningsskydd

Det var i publikation [1] att det angavs starka överenskommelsen i problemställningen mellan dynamisk belastningsförmåga och överbelastningsskydd. Relationen var för sig känd men denna artikel var en av den första gången det inte bara utpekades i forskningslitteraturen men det även byggdes vidare på detta. Grundtanken i stokastiska modellen för dynamisk belastningsförmåga (se avsnitt 5.3) kommer från modeller för tillförlighet av skyddssystemet till elnätet. Det finns två aspekter av denna tillförlighet: skyddet löser ut medan det inte behövs; skyddet löser ut medan det hade behövdes.

Överbelastningsskyddet aktiveras när strömmen överskrider ledningens belastningsförmåga tillräckligt mycket under en tillräckligt lång tid. Skyddet kan vara automatiskt, i form av en överströmtidsrelä eller (för lägre spänningar) säkringar. Funktionen kan också utföras av personal i kontrollrummet; ordet ”reläskydd” är möjligen inte lämpligt i sådana fall, men principen är dock densamma. Automatiska åtgärder är, i nästan alla befintliga fall, fortfarande att koppla bort ledningen. Det finns dock utvecklingar mot att minska ledningens belastning när det finns (en stor risk för) överbelastning. Nedstyrning av produktion eller förbrukning är ett sätt att åstadkomma detta. Vi har använt begreppen ”skydd” och ”reläskydd” i våra studier både för automatiska och för manuella åtgärder för att förebygga eller begränsa ledningens överbelastning. I vissa fall har vi också använt det mer allmänna begreppet ”ta åtgärder” för manuell eller automatisk bortkoppling av ledningen, förbrukning eller produktion, och även för att skicka en alarmsignal till kontrollrummen. Åtgärder kan då vara att koppla bort ledningar, att styra ner förbrukning eller produktion för avtalade kunder, att starta produktionsenheter eller även roterande bortkopplingar. Vilken åtgärd som tas och om den är automatisk eller manuell, ligger utanför detta projekt och denna rapport.

Skyddets mål är, generellt sett, att ta bort en farlig situation i elnätet och att göra ingenting när det inte finns någon farlig situation. Den farliga situation som behandlas i de flesta studierna om reläskydd är ett fel: kortslutning eller jordfel. När det inte finns ett fel ska inget reläskydd koppla bort någon komponent; finns det ett fel då ska bara reläet eller reläerna i direkt närhet av felet ingripa.

Skyddet kan göra fel på två olika sätt: att ingripa då det inte behövs; och att inte ingripa då det behövs. Det finns två viktiga begrepp knutna till detta:

- Funktionspålitlighet (”dependability”) av reläskydd definieras av IEC som ”sannolikheten för ett skydd att inte ha bristande funktion under givna förhållanden under ett givet tidsintervall” (the probability for a protection of not having a failure to operate under given conditions for a given time interval [34]).
- Säkerhet mot oönskad funktion (”security”) av reläskydd definieras som ”sannolikheten för ett skydd att inte ha en oönskad funktion under givna förhållanden under ett givet tidsintervall” (”the probability for a protection of not having an unwanted operation under given conditions for a given time interval” [34]).

Inställningar av skyddet är sådana att både pålitlighet och säkerhet är höga, dvs låg sannolikhet för bristande funktion och låg sannolikhet för oönskad funktion. Det gäller för fel mot kortslutningar och jordfel då det finns tydliga gränser och marginaler mellan icke-fel och fel vad gäller nätets drift.

Situationen blir dock helt annorlunda vid skydd mot överbelastning. Det finns en väldigt skarp marginal mellan överbelastning och icke överbelastning, som gör det omöjligt att ha hög pålitlighet och hög funktionssäkerhet samtidigt. Här kan det också läggas till att det inte går att exakt veta om en ledning är överbelastad eller om den har varit överbelastad. Varken temperatur eller nedhäng går att mäta noggrant och det går inte heller att veta om det skulle ha varit ett jordfel (när nedhängen skulle vara för mycket) om det inte hade tagits åtgärder för att minska risken på överbelastning.

När strömmen genom ledningen är betydligt lägre än belastningsförmågan, då är det tydligt att skyddets funktion inte behövs. Är strömmen betydligt över belastningsförmågan under en längre tid, då är det tydligt att skyddets funktion behövs. Även vid dessa tydliga fall kan det finnas funktionsfel, men sannolikheten för dessa är liten.

Situationen blir dock annorlunda när strömmen och belastningsförmågan kommer nära varandra. Det finns en osäkerhet i väderparametrar som gör att det finns en osäkerhet i belastningsförmågan. Det finns en del andra osäkerheter också, framförallt värden av ledningens emissions- och absorptionskoefficienter [11]. Även om strömmen är mindre än den uppskattade belastningsförmågan kan strömmen överskrida den faktiska belastningsförmågan. Då finns det två alternativ: skyddet ingriper eller skyddet ingriper inte.

Det kan då också finnas två olika fel: skyddet ingriper när ledningen inte är överbelastad; skyddet ingriper inte när ledningen är överbelastad. Summan av dessa två sannolikheter är lika med 100 %. Det går inte att få båda sannolikheter till ett lågt värde. Med andra ord, vid överbelastningsskydd är det inte möjligt att få både en hög pålitlighet och en hög funktionssäkerhet.

Klassiska överbelastningsskydd hade en hög pålitlighet: statiska belastningsförmågan är nästan alltid lägre än momentana belastningsförmågan, varför en överbelastning med hög sannolikhet leder till funktion av skyddet. Men funktionssäkerheten är låg, vid funktion av skyddet finns det en hög sannolikhet att ledningen inte är överbelastad och att funktionen inte hade behövts.

Dynamisk belastningsförmåga leder till att det blir mindre sådana oönskade funktioner av skyddet. Konsekvensen blir dock att sannolikheten för bristande funktion ökar något. Vi återkommer till denna diskussion i Avsnitt 5.4.

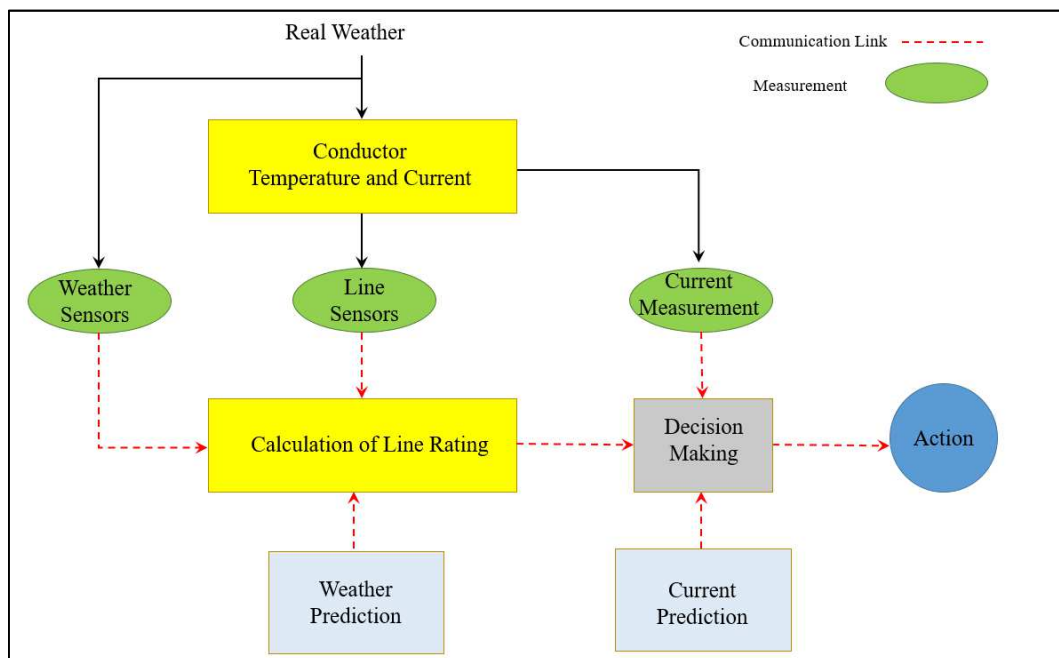
5.3 En detaljerad stokastisk modell för dynamisk belastningsförmåga

Arbetet utgick från en kvalitativ modell om batterilagring i elnät, då möjliga brister i tillförlitlighet och konsekvenser av detta för elnätet och –marknaden behandlas i detalj [3]. Modellen hade funnits längre, men hade ännu inte

publicerats. Denna modell var motivationen till en kvalitativ modell för dynamisk belastningsförmåga, som utvecklades helt under projektet [10].

Att studera tillförlitlighet av ett system med dynamisk belastningsförmåga är inte bara frågan om att ha en mycket noggrann och tillförlitlig metod för att beräkna belastningsförmågan utan det handlar också om tillförlitlighet hos olika mätsystem, sensorer, kommunikation, skydd, beräkningsmetoder och prognosmodeller.

Figur 2 visar en generisk modell av ett system för dynamisk belastningsförmåga, där avsikten är att täcka driftplanering dagen innan (för att identifiera marknadshinder), någon timme i förväg, eller användning under själva driften (som skydd). Denna generiska modell har använts i [10] för att titta på tillförlitlighet från olika synvinklar. Streckade linjer representerar kommunikationskanalen mellan två block.

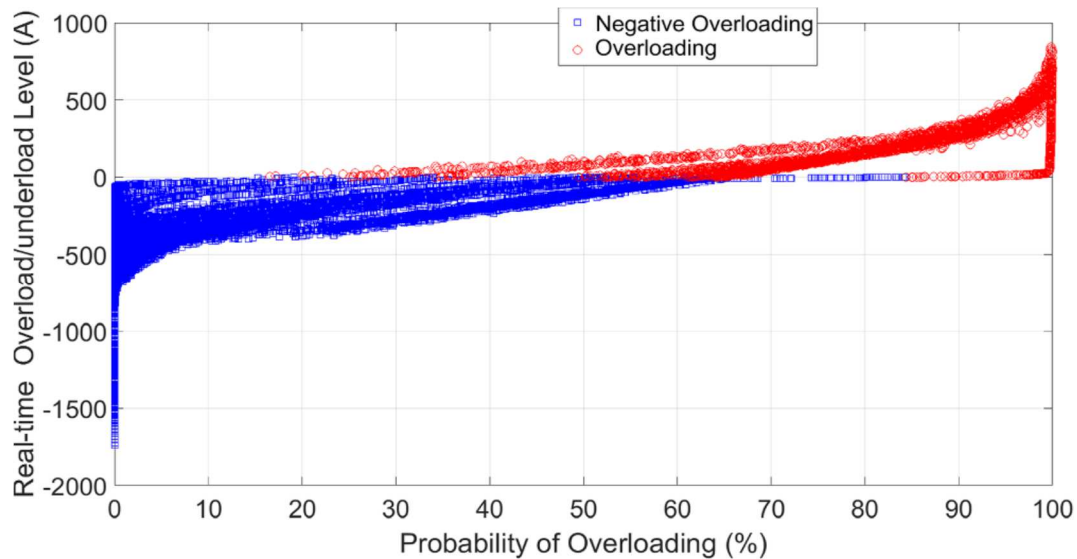


Figur 2. Kvalitativ tillförlitlighetsmodell för dynamisk belastningsförmåga [10].

Den generiska modellen i Figur 2 innehåller olika typer av element som alla ingår i ett system för dynamisk belastningsförmåga, inklusive mätanordningar, kommunikationskanaler, modeller och algoritmer för att förutsäga och beräkna belastningsförmåga, väderprognos och beslutsblock för att bestämma vilka åtgärder som ska vidtas. Fel i något av dessa element har potentialen att påverka prestandan av skyddet och följaktligen av elnätet. Input till algoritmerna kommer i vissa system också från prognoser som görs någon annanstans: prognos av väderparametrar; prognos av linjeströmmar. Fel kan uppstå i dessa prognoser, vilket kan leda till att felaktiga värden tillhandahålls för algoritmen som beräknar belastningsförmåga eller ledartemperatur.

Sannolikheten för överbelastning av ledningen till Belasteå har beräknats för varje timme under den åttaårsperiod för vilken data fanns tillgänglig. Den verkliga ledningen och verkliga förbrukningen skulle aldrig leda till överbelastning. För att kunna illustrera metoden, har ledningens spänningsnivå reducerats och förbrukningen ökats så att det skulle ge tillräckligt många timmar med överbelastning under året.

Figur 4 visar för varje timme sannolikheten för överbelastning mot skillnaden mellan strömmen och belastningsförmågan enligt den deterministiska modellen, då det inte tas med någon osäkerhet i väderparametrar.



Figur 4. Sannolikhet på överbelastning och marginalen till deterministisk momentan belastningsförmåga [6].

Den deterministiska belastningsförmågan är det beräknade värdet för varje timme från uppmätta väderdata. Sannolikheten för överbelastning och marginal har beräknats för totalt 70 128 timmar under åttaårsperioden. De röda cirklarna i figuren indikerar överbelastning (strömmen överstiger den deterministiska belastningsförmågan) och de blå cirklarna indikerar underbelastning (strömmen är mindre än den deterministiska belastningsförmågan).

Figuren visar att det finns en generell trend mot högre sannolikhet för överbelastning, ju närmare strömmen kommer den deterministiska belastningsförmågan. Det är dock inte så att det finns en tydlig relation: storleken av marginalen är inte i sig någon indikation på sannolikheten. Vill man, till exempel, ha en konstant marginal så att sannolikheten för överbelastning aldrig skulle vara mer än 10 %, då skulle det krävas en marginal på nästan 500 A. Även en acceptabel sannolikhet på 40 % skulle fortfarande kräva en marginal på ungefär 250 A.

Modellen som beskrivs ovan, utgår från osäkerheter i väderparametrar för att beräkna osäkerheter i ledningens belastningsförmåga. Det som specifikt tas med i de flesta studier är variationer och osäkerheter i vindhastighet, vindriktning och omgivningstemperatur. Osäkerheter i strålning tas oftast inte med; anledningen är

att strålningstermerna i den termiska balansen inte brukar tas med i beräkningar av överföringsförmåga av luftledningar. Det gjordes därför en specifik och detaljerad studie av vikten av strålningstermer; resultat av studien presenteras i [11] och en del av resultat sammanfattas i Tabell 1. För låg nivå av kylning (dvs hög omgivningstemperatur och/eller låg vindhastighet) blir den extra osäkerheter in belastningsförmåga av storleksordning 10 %. Det betyder att det behövs ta en extra marginal, kring 10 % av belastningsförmåga, under perioder att den momentana belastningsförmågan redan är låg.

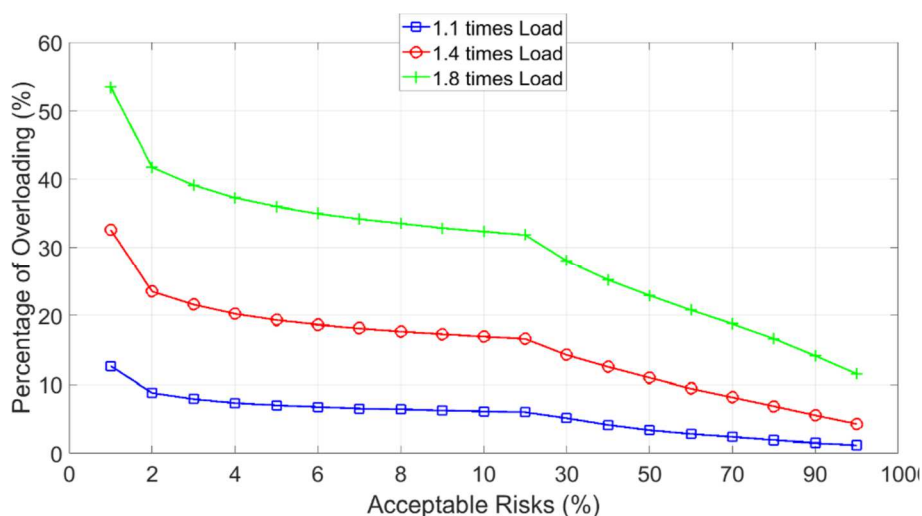
Tabell 1. Osäkerhet i belastningsförmåga på grund av osäkerhet i strålningstermer, för perioder med låg, medel och hög kylning [11].

	W/m ²	Låg	Mellan	Hög
Instrålning från solen	690	3.8%	3.5%	1.5%
Termisk strålning under vintern	1100	6.1%	5.5%	2.4%
Termisk strålning under sommaren	1900	10.6%	9.5%	4.1%
Nedkommande strålning från himlen	1250	6.9%	6.3%	2.7%
Osäkerhet i termisk emission	1000	5.6%	5.0%	2.2%

5.5 Användning av stokastisk modell av dynamisk belastningsförmåga i drift och planering

Stokastiska modellen i förra avsnittet ger en sannolikhetsfördelning av ledningens belastningsförmåga för en vis timme, då begreppet ”timme” ska inte tas bokstavligen som exakt 60 minuten, men som en kortare period, av till exempel en timme. Det kan vara drifttimmen, då mätning av väderparametrar är input till beräkningar. Det kan också vara under planering av elmarknaden dagen innan. Det kan även vara del av underhållsplanering, då man skulle kunna ta osäkerheterna i ”värsta väderförhållanden” över till exempel en tre-dagars period som en viss transformator inte är i drift.

Information om sannolikhetsfördelningen av belastningsförmåga kan då användas för att bestämma om det behövs åtgärder eller inte. Det blir då en avvägning mellan risken att ta onödiga åtgärder och risken att inte ta nödvändiga åtgärder. Det som det till slutet handlar om är att jämföra konsekvenserna av att ta åtgärder och konsekvenserna av överbelastning. Själva diskussionen om konsekvenserna ligger utanför projektet, men det har gjorts en del studier efter relationen mellan acceptabel risk och antalet gånger det behövs ta åtgärder. För att kunna räkna ut detta, behövs det information om strömmen. Ett exempel av resultaten av en sådan studie visas i Figur 5. Det som har beräknats är hur ofta under åttaårsperioden som sannolikheten att ledningen är överbelastad överstiger ett visst tröskelvärde (acceptabel risknivå). Beräkningar utfördes för tre olika belastningsnivåer, då förbrukningen för Belasteå antogs vara 110 %, 140 % och 180 % av den historiskt uppmätta förbrukningen. (Som tidigare nämnts finns det ingen överbelastning i den faktiska matningen till Belasteå; men förbrukningen och spänningsnivån har något anpassats.)



Figur 5. Andel av tiden att det behövs åtgärder som funktion av den acceptable risken på termisk överbelastning av ledningen [6]. Observera ändring i horisontalskala vid 10 %.

Figuren bekräftar att det finns en stark relation mellan acceptabel risk för överbelastning och hur ofta det kommer att vidtas åtgärder för att förebygga överbelastning. Figuren visar också att behovet på åtgärder minskar snabbt mellan 1 % och 3 %, men efter det behövs det en hög acceptans för överbelastning (30 % till 50 %) innan det blir en stor minskning av behovet. Vid ökande förbrukning i staden kommer också behovet av åtgärder att öka. Här har det antagits att förbrukningsökningen är samma procentsats (10, 40 eller 80 %) varje timma under året; i praktiken förväntas det en mer ojämn ökning, då förbrukningen under vissa timmar ökar mer än under andra timmar.

Metoden har tillämpats på integrering av vindkraft och solkraft [6] och för att estimerat acceptansgräns av nätet för elbilsaddning [9].

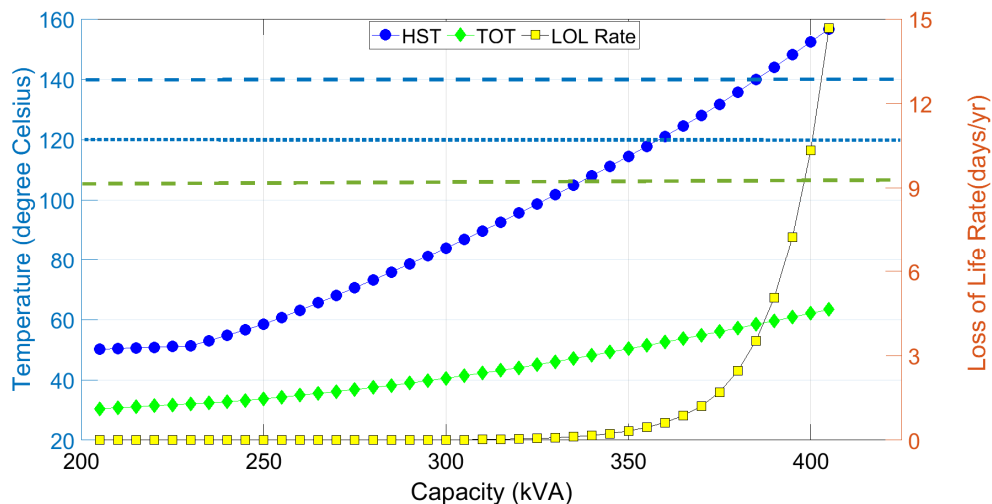
En studie har gjorts i ett större nät (39 noder) med en total förbrukning lika med 400 MW. Förmågan av nätet att ta emot en stor mängd elbilsaddning har studerats med olika nivåer av dynamisk belastningsförmåga av luftledningar. Stokastiska tidserier för elbilsaddning har skapats genom en ny stokastisk metod som bygger på Markovkedjor och som har utvecklats i ett annat projekt [35]. I exempelnetet var det överföringsförmåga av luftledningar som sätter gränsen i mängden ny förbrukning som kan anslutas och som även leder till höga elpriser lokalt på grund av flaskhalsar i nätet. Genom att använda dynamisk belastningsförmåga är det möjligt att öka mängden elbilar med 80 %, utan att det blir fler begränsningar och utan att det blir höga elpriser. Mer detaljer av studien finns i [13].

5.6 Solcellsanläggningar, överbelastning av transformatorer, acceptansgräns och dynamisk belastningsförmåga

Det har gjorts en studie av hur ökande mängder solcellsanläggningar och ökande förbrukning påverkar termisk belastning av distributionstransformatorer. Acceptansgränsmetoden, med en del kunskaper från ett annat projekt [36], har

anpassats och tillämpats för termisk belastning av transformatorer. Detaljerat resultat finns i [7] och [12]; basprincipen visas i Figur 6. Figuren visar tre parametrar som anger hur mycket den termiska påfrestningen av en distributionstransformator är, vid ökade mängden solcellsanläggningar installerade på lågspänningssidan av en transformatorn. Mätningar av förbrukningen har kombinerats med simuleringar av produktion. Beräkningsmotorn på Renewables Ninja har använts för att få realistiska tidserier för produktionen.

För alla tre parametrar kan det sättas gränsvärden för att estimeras acceptansgränsen. Lämpliga gränsvärden för HST är 120 °C och 140 °C; dessa gränsvärden överskrids vid installerad effekt av 355 kVA och 385 kVA; detta är då acceptansgräns vid dessa gränsvärden. Gränsvärden för TOT är på 105 °C; den överskrids långt efter gränsvärdena för HST överskrids. Riktlinjer för lämpliga gränsvärden för HST och TOT finns i en IEC standard; det finns dock inga sådana gränsvärden för LOL, som gör det svårare att hitta en lämplig acceptansgräns.



Figur 6. Högsta hot-spot temperatur (HST), topp-oljatemperatur (TOT) och åldring över ett år (LOL) för en distributionstransformator som funktion av installerad effekt solkraft nedströms av transformatorn [7][12].

5.7 Stokastisk driftsäkerhet av transmissionsnät

Denna del av projektet började med en litteratursökning för att bedöma vad läget är med forskningen i detta område. Resultat av detta finns beskrivet i [8]. Litteratursökningen, tillsammans med tidigare erfarenhet i att forska på ämnet, har bland annat också lett till en bättre insyn i problemställningen. Huvudekvationen som kom fram är uttrycket för att beräkna drifrisken ("operational risk") R_{op} .

$$R_{op} = \sum_{c=1}^{N_c} P(c) \cdot F_s(c)$$

Då $P(c)$ är sannolikheten att det inträffar felkombination (ett eller flera komponenter ur drift, "contingency") c inom en viss ledtid ("leadtime"), $F_S(c)$ är ett mått för hur alvarligt denna felkombination är ("alvarlighetsindex", "severity factor") och N_c är antalet felkombinationen. Ekvationen ledde till en indelning av pågående forskning och forskningsbehov.

- 1) Val av felkombinationen att ta med i beräkningen. Det finns ett väldigt stort antal sådana kombinationer och det finns bara möjlighet att beräkna ett mycket begränsat antal. Här har det gjorts mycket forskning, inte bara för driftsäkerhet men också för tillförlitlighetsberäkningar i transmissionsnät.
- 2) Beräkning av sannolikheten att en viss felkombination inträffar inom ledtiden. Även här har det gjorts en del forskning, men det är också en stor del av publikationer då ledtiden inte bedöms, som kan ge en fel uppskattning för ledtider upp till ett flertal timmar. Det finns också brist på data om felfrekvenser på tidskalor upp till några timmar.
- 3) Definition av alvarlighetsindex. Här saknas det seriösa forskningen och det även saknas diskussion om vad skulle vara lämpliga index.
- 4) Beräkning av alvarlighetsindex, som i nästan alla fall kräver en modell av transmissionsnätet. Här krävs det en stor förenkling eftersom det blir omöjligt att beräkna påverkan av en felkombination i mycket detalj under en begränsad tid.
- 5) Presentation och tolkning av resultat. Här saknas forskningsresultat helt.

Forskningen i litteraturen riktar sig som mycket mot framförallt 1, och i mindre utsträckning till 2 och 4. Det finns begränsad forskning på 3 och egentligen ingenting på 5. Under projektet har vi riktat oss på 3 och 5. Det är bland annat för att vi tror att brist på forskning om detta är en bidragande faktor till att transmissionsföretag inte använder metoder för stokastisk bedömning av driftsäkerhet.

För att lära oss mer om hur man kan definiera allvarlighetsindex och hur man skulle kunna presentera och tolka beräkningsresultat har vi utfört en enkel driftsäkerhetsberäkning för ett exempelnett. Vid dessa beräkningar har vi definierat allvarlighetsindex för fyra olika fenomen

- i) Underspänning
- ii) Överspänning
- iii) Överbelastning
- iv) Instabilitet

Här har vi bland annat lärt oss en del om utmaningar vid att definiera sådana index, att det inte finns ett perfekt sätt att definiera dessa, och att det kommer att behövas en kombination av olika index för att kunna ta beslut under driften. Fyra olika allvarlighetsindex har beräknats för olika belastningsnivåer av systemet; dessa har skapats genom att öka både produktion och förbrukning med lika procentsats. Tolkningen av resultat har varit svårare än förväntat, bland annat eftersom en ökning av belastningsnivåer inte alltid leder till en ökning av drifrisken enligt beroende på definitionen av allvarlighetsindexen.

Vi har också börjat titta på olika sätt att presentera beräkningsresultat så att de kan enklare användas i driftcentralen. Det resulterade i ett antal grafiska metoder då felkombinationen, sannolikhet och allvarlighetsindex tas med.

5.8 En stokastisk modell för HVDC

Vi just nu jobbar på en sammanställning, utav publicerade resultat och egna insikter, av en stokastisk modell för HVDC länken som kan användas i beräkningar av driftrisen. Det som gör HVDC framförallt intressant är att skyddssystem och reglersystem spelar en viktig roll och inte kan bortglömmas i modellen. Insyn om hur man kan modellera detta på ett stokastiskt sätt kommer också ha tillämpningsmöjligheter vid modeller för andra delar av transmissionsnätet.

Diskussionen har också lärt oss en del om vilken typ av information som behövs om fel och reparation under driften, dvs med korta ledtider. Även detta kommer att ha tillämpningar för andra komponenter. Variation av felfrekvensen men tid behandlas till del i litteraturen, till exempel när en storm passerar över ett vist geografiskt område. Det finns dock liten information om hur reparationsfrekvensen ("repair rate") borde modelleras, då det är framförallt viktigt hur reparationsfrekvensens variation modelleras under ledtiden. Här har det gjorts en första försök att strukturera detta. Mer detaljer finns i [14].

6 Diskussion

6.1 Energirelevans

6.1.1 Behov på överföring av elektrisk energi

Detta projekt handlar om elnätet och elnätets mål är att överföra elektrisk energi mellan produktionskällor och förbrukning. På sådan sätt har elnätet bara en möjliggörande roll; den direkta energirelevansen finns vid produktion of förbrukning av elektriska energin. Det uppstår en del förluster i elnätet vid överföring av den elektriska energin, mellan 5 % och 10 %, men metoderna som behandlas i detta projekt har begränsad påverkan på förlusterna.

Relevansen av forskningen som ha gjorts i detta projekt är i att det kan ta bort hinder mot alternativa produktionskällor och möjliggöra elektrifiering av bland annat transport och industriella processer. Det pågår just nu ett antal tunga diskussioner om hinder som ställs av elnätet. Några exempel är:

- Behov av stora mängden elektrisk energi för att radikalt minska koldioxidutsläpp från stora industriella processor som stålindustri.
- Flaskhalsar i inmatning till en del Svenska städer som bland annat sätter stopp på nyetablering av även mindre industriella anläggningar.
- Ökning av behov på fordonssladdning i städer och även på glesbygd.

6.1.2 Dynamisk belastningsförmåga

Det som sätter gränser på överföringen är ofta temperaturen av transformatorer, kablar och/eller luftledningar. Den högsta förbrukningen är i Sverige under vintern och den största ökningen på grund av fordonsladdning kommer också att förväntas under vintern [37]. Potentialen för dynamisk belastningsförmåga att öka acceptansgränsen för fordonsladdning kommer därmed att vara stor. På sådant sätt kan ett hinder mot elektrifiering av transportsektorn tas bort. Fördelar för ett hållbart energisystem av denna elektrifiering är något som många är eniga om, men en diskussion om detta ligger utanför detta projekt.

Här är det också viktigt att lägga till att dynamisk belastningsförmåga kan tillämpas i planeringsfasen utan att det behövs ytterligare investeringar i elnätet. Enda som kan behövas är att det hålls koll på ändringar i förbrukningsmönster.

Dynamisk belastningsförmåga under planeringsfasen har dock sina begränsningar; det är framförallt för att metoden inte leder till en garanterad kapacitetsökning men till en kapacitet som varierar med väderförhållanden. Det betyder att det behövs en kontinuerlig uppskattning av hur mycket som ledningar, transformatorer och kablar klarar. När behovet på överföringskapacitet är mer än komponenten klarar (mer än belastningsförmåga) då behövs det åtgärder. Dessa åtgärder kan bestå i att koppla bort komponenten, men det ska bara göras om inget annat hjälper. Istället ska det användas moderna metoder ("smarta elnät") som att minska en del av förbrukning eller produktion. Flexibilitetsmarknader kan spela en viktig roll i detta. Genom de stokastiska metoderna som har utvecklats i projektet kan det göras en bättre avvägning av risken på överbelastning och risken på onödig bortkoppling av förbrukning eller produktion. Det kommer att minska begränsning av överföring, till exempel mot en stor industrialläggning, till de timmar då det verkligen behövs. På sådant sätt kan koldioxidutsläpp från processen minimeras.

6.1.3 Stokastisk driftsäkerhet

En väldigt viktig bas för den säkra driften av transmissionsnätet är (N-1)-kriteriet. Kortfattat betyder det att det finns alltid tillräckligt med kapacitet i nätet för att klara bortfallet av en komponent. Vilken komponent som helst i nätet kan falla bort utan att det påverkar kunderna. Kriteriet har bidragit väldigt mycket till den höga tillförlitligheten av elnätet i de flesta industrialiserade länder. Utan ett tillförlitligt elnät skulle vi inte ha den nuvarande diskussionen om ytterligare elektrifiering.

Planering och drift baserade på (N-1)-kriteriet har dock två stora nackdelar:

- Metoden begränsar mängden ny produktion och förbrukning som kan anslutas till nätet. Skulle man inte ha kravet på reservkapaciteten, då skulle acceptansgränsen vara större.
- Det finns förhållanden av väder och/eller förbrukning då risken på ett stort avbrott ändå är högt, även vid denna reservkapacitet. En stor storm som kommer in från havet är ett sådant exempel.

Metoderna baserade på stokastisk driftsäkerhet, har dock möjligheter att minska begränsningar men också bedöma när det behövs ytterligare reservkapacitet. På samma sätt som dynamisk belastningsförmåga ger en tidsberoende överföringskapacitet, så ger stokastisk driftsäkerhet ett tidsberoende behov på reservkapacitet. På sådant sätt kan det kontinuerligt göra en avvägning mellan risken på ett avbrott och konsekvenserna av att till exempel behöva minska vindkraftsproduktion.

6.2 Samhällsrelevans

Största samhällsrelevans av projektresultat finns i konsekvenser för energisystemet, som behandlades i förra avsnittet.

Metoderna som behandlas i projektet kan dock också göra det enklare för mindre industrier att etablera sig. Just nu finns det i vissa fall begränsningar som gör att anslutning till elnätet blir dyr och/eller tar en lång tid. Genom, framförallt, dynamisk belastningsförmåga kan en del av sådana begränsningar tas bort.

Vid en bredare etablering av flexibilitetsmarknader, kan metoderna leda till en minskning av antalet gånger som flexibilitet behövs. Det i sin tur kan göra det enklare att hitta flexibilitetsresurser.

Även etablering av fordonsladdning kan bli enklare och billigare.

Genom att ersätta överbelastningsskydd i transmissionsnät med metoder baserade på dynamisk belastningsförmåga, kan vissa stora störningar förebyggas. Även stokastisk driftsäkerhet kan hjälpa till vid detta. Det har funnits två fall av systemuppdelning i det stora Europeiska transmissionsnät [26, 38] och tillämpning av metoderna som studerats i detta projekt kunna sannolikt ha förebyggt båda två.

En annan samhällskonsekvens av dynamisk belastningsförmåga är att det kan minska behovet att bygga ytterligare luftledningar.

6.3 Dynamisk belastningsförmåga

Potentialen av dynamisk belastningsförmåga vid vindkraftintegrering har diskuterats i litteraturen en hel del. Men potentialen för överföring till svenska städer bara i begränsad utsträckning. Det som behövs är en del fall-studier riktade mot städer då det finns flaskhalsar i överföringen; Malmö och Uppsala är de bäst-kända exempel. Som första steg kan det samlas in data för att uppskatta potentialen med dynamisk belastningsförmåga. Potentialen med dynamisk belastningsförmåga borde också tas med i studier efter integrering av fordonsladdning och efter anslutning av stora planerade industrianläggningar.

När dynamisk belastningsförmåga kombineras med nedstyrning eller liknande, då är det viktigt att ta med stokastiska metoder. Dessa behövs för att kunna göra en avvägning mellan risk på överbelastning och risk på onödiga åtgärder. Det utvecklas ett antal flexibilitetsmarknader i Sverige just nu och stokastiska modeller för dynamisk belastningsförmåga borde tas med för att bedöma behovet på flexibilitet eller andra åtgärder.

Fortsatt forskningsbehov på stokastiska modeller omfattar bland annat att bättre kartlägga osäkerheterna för de olika tillämpningar, att modellera osäkerheterna för de fall då ledningstemperaturen mätts, och att tillämpa metoderna på transformatorer och kablar.

Ett relevant forskningsbehov för att vidareutveckla den stokastiska modellen om dynamisk belastningsförmågan är att få sannolikhetsfördelningar för de olika osäkerheterna. Det finns olika fördelningar för olika tillämpningarna: planering dagen innan; drift med mätning av väderparametrar; drift med mätning av ledningstemperaturen. Dessa osäkerheter är ”aleatoriska osäkerheter”, då man kan få information om de genom att samla in data. Med andra ord, det som behövs är en insamlingskampanj av osäkerheterna. Det är också viktigt att ta med olika fel i systemet (till exempel enligt Figur 2) i sannolikhetsfördelningen för belastningsförmåga och i avvägningen. Här kan datainsamlingen vara en större utmaning eftersom det finns begränsat med anläggningarna då det kan samlas in data.

6.4 Överbelastningsskydd

En viktig slutsats från denna studie är att användning av dynamisk belastningsförmåga handlar också om ändring av konceptet med överbelastningsskydd. Klassiska konceptet har varit att koppla bort en komponent automatisk vid överbelastning; detektering av överbelastning skedde då med hjälp av överström-tidskurvor. I ett maskat nät kan utlösning av överbelastningsskydd leda till en kaskad av bortkopplingar med en stor störning som följd. Ett alternativ då denna risk är betydligt mindre är att använda sannolikheten på termisk överbelastning som en del av beslutsunderlag till nedstyrning av förbrukning eller produktion.

Här behövs det erfarenhet med sådana skyddsmetoder, till exempel genom att beräkna sannolikhet till överbelastning under en längre tid (ett eller flera år) i ett befintligt nät. Matning till en del svenska städer, se ovan, kan vara ett lämpligt fall även här.

6.5 Stokastisk driftsäkerhet

Studien om stokastisk driftsäkerhet har bara nyligen börjat, men redan nu kan det dras en viktig slutsats. Forskningen hittills har till största delen riktat sig mot utveckling av detaljerade komponentmodeller för att beräkna sannolikheterna och på metoder för att ranka olika felkombinationer. Det som dock har försumrats i forskningen är metoder för att använda resultat från beräkningarna under drift och driftplaneringen. Det är här som de största forskningsutmaningarna finns.

Modellen för HVDC har visats sig vara en viktig erfarenhetsbas för andra komponenter i elnätet. Det gäller bland annat skyddssystemet och andra reglerfunktioner som kommer upp mer med införandet av smarta elnät.

En stor utmaning med stokastisk driftsäkerhet i allmänt är insamling av relevanta komponentdata. Data för vanliga komponenter (som luftledningar och transformatorer) under vanlig drift är relativt enkelt eftersom det finns, eller i alla

fall borde finnas, stora mängder data. Utmaningen ligger framförallt med data för perioder med förhöjd felfrekvens. Även för mer sällsynta komponenter som HVDC är datainsamling en utmaning. Vi kommer här till den grundläggande frågan om vad sannolikheten egentligen är. Det finns forskare som påstår att en sannolikhet kan ha ett annat värde för olika personer beroende på vilken risk någon vill ta. Vid, till exempel, HVDC finns det ett begränsat antal anläggningar som alla är något annorlunda och då är frågan vilken statistik man kan basera sina beräkningar på.

6.6 Utbildning och användning av stokastiska metoder

En annan relevant utmaning är att överföra kunskaper till elnätsföretagen. Det gäller då först och främst de specifika metoderna, stokastisk driftsäkerhet, överbelastningsskydd och dynamisk belastningsförmåga. Av dessa tre är det bara dynamisk belastningsförmåga då det verkar finnas en viss acceptans hos elnätsföretagen. Det finns fortfarande begränsat med erfarenhet, men man är inte helt främmande mot metoden; det finns också tillräckligt med pågående forskning som är en källa för kunskaper. Vid överbelastningsskydd finns det ingen synlig forskning alls och det gör att det inte kommer in nya kunskaper som kan användas för att förbättra metoderna och för att utbilda elnätsföretagen. Inom stokastisk driftsäkerhet finns det begränsat med forskning pågående men metoderna är fortfarande långt bort från tillämpning i verkligheten. Här behövs det erfarenhet med tillämpning av metoderna under verkliga driften. Det är alldeles för tidigt för att börja tillämpa sådana indikatorer under driften, men det behövs ett antal projekt där indikatorer kontinuerligt beräknas under till exempel ett år.

7 Publikationslista

- [1] F. Hajeforosh, L. Abrahamsson, M. Bollen, Dynamic Line Rating Operational Planning: Issues and Challenges, CIRED 2019.
- [2] S. Hajeforosh and M. H. J. Bollen, Transmission Line Overloading Analysis Using Probabilistic Dynamic Line Rating, International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Liege, Belgium, 2020.
- [3] F. Hajeforosh, Z. Nazir, M. Bollen, Reliability aspects of battery energy storage in the power grid, ISGT-Europe, 2020.
- [4] Fatemeh Hajeforosh, Math Bollen, Dynamisk belastningsförmåga av luftledningar, Energiforsk Rapport 2020:710.
- [5] Fatemeh Hajeforosh, Dynamic line rating analysis in transmission lines: protection application, halvvägs rapport (intern dokument), Luleå tekniska universitet, 10 november 2020. Bilaga B till rapporten.
- [6] Fatemeh Hajeforosh, Math Bollen, Uncertainty Analysis of Stochastic Dynamic Line Rating, Electric Power Systems Research, vol. 194, May 2021, 107043.

- [7] Amena Khatun, Allowing more solar power connected to the grid, using thermal and ageing models of distribution transformers, Master thesis, Solar Energy Engineering, Högskolan Dalarna, May 2021. Supervised by Fatemeh Hajeforosh and Math Bollen.
- [8] Zunaira Nazir, Math Bollen, Operational risk assessment of transmission systems: a review, submitted to Int Journal of Electrical Power and Energy Systems, July 2021. Bilaga C till rapporten.
- [9] Fatemeh Hajeforosh, Math Bollen, Increasing the grid capacity for electric vehicle charging using dynamic rating, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, September 2021.
- [10] Fatemeh Hajeforosh, Math Bollen, reliability aspects of dynamic thermal rating in the power grid, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, September 2021.
- [11] Fatemeh Hajeforosh, Math Bollen, Uncertainties in radiation modelling for overhead lines and their impact on the ampacity, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, September 2021.
- [12] SeyedeFatemeh Hajeforosh, Amena Khatun, Math Bollen, Enhancing the hosting capacity of distribution transformers using dynamic component rating, submitted to Electric Power Systems Research. Bilaga D till rapporten.
- [13] Fatemeh Hajeforosh, Hamed Bakhtiari, Math Bollen, Optimal utilization of dynamic line rating in the presence of electric vehicles in power systems, paper in preparation, Bilaga E till rapporten.
- [14] Zunaira Nazir, Math Bollen, HVDC stochastic models, in preparation. Bilaga F till rapporten.

8 Referenser, källor

- [15] S. D. Foss, S. H. Lin and R. A. Fernandes, "Dynamic Thermal Line Ratings Part I Dynamic Ampacity Rating Algorithm," in IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1858-1864, 1983.
- [16] B. S. Howington and G. J. Ramon, "Dynamic Thermal Line Rating Summary and Status of the State-of-the-Art Technology," in IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, No. 3, pp. 851-858, 1987.
- [17] B.M.Weedy, "Dynamic current rating of overhead lines," Electric Power Systems Research, Vol. 16, No. 1, pp. 11-15, 1989.
- [18] D. A. Douglass and A.-A. Edris, "Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits," in IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1407-1418, 1996.
- [19] J. S. Engelhardt and S. P. Basu, "Design, installation, and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system," Proc. 1996

- Transmission and Distribution Conf. and Exp., Los Angeles, CA, USA, pp. 366-370, 1996.
- [20] S. D. Foss and R. A. Maraio, "Dynamic line rating in the operating environment," in *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, pp. 1095-1105, 1990.
- [21] E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, A. J. Mazon, and P. T. Leite. "Review of dynamic line rating systems for wind power integration," *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, Vol. 53, pp. 80-92, 2016.
- [22] B.P. Bhattarai, J.P. Gentle, Ti. McJunkin, P.J. Hill, K.S. Myers, A.W. Abboud, R. Renwick, D. Hengst, "Improvement of Transmission Line Ampacity Utilization by Weather-Based Dynamic Line Rating," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 33, No. 4, pp. 1853-1862, 2018.
- [23] L. Dawson, A.M. Knight, "Applicability of Dynamic Thermal Line Rating for Long Lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 33, No. 2, pp. 719-727, 2018.
- [24] A.V. Tarín-Santiso, A. Llamas, O. Probst, "Assessment of the potential for dynamic uprating of transmission lines in the Mexican National Electric Grid," *Electric Power Systems Research*, Vol. 171, pp. 251-263, 2019.
- [25] D. A. Douglass, "A Review of Dynamic Thermal Line Rating Methods with Forecasting," in *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 34, No. 6, pp. 2100-2109, 2019.
- [26] Continental Europe synchronous area separation in 24 Juny 2021, Entso-E.
- [27] Kundur, Prabha, Neal J. Balu, and Mark G. Lauby. *Power system stability and control*. Vol. 7. New York: McGraw-hill, 1994.
- [28] Liisa Pottonen, *A Method for the Probabilistic Security Analysis of Transmission Grids*, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Power Systems and High Voltage Engineering, Otamedia Oy, 2005.
- [29] L.T. Anstine et al., Application of probability methods to the determination of spinning reserve requirements to the Pennsylvania-New Jersey-Maryland interconnection, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 82, 1963, pp.720-735.
- [30] M. H. J. Bollen, L. Wallin, T. Ohnstad and L. Bertling, "On Operational Risk Assessment in Transmission Systems - Weather Impact and Illustrative Example," *Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Rincon, 2008, pp. 1-6.
- [31] Generally Accepted Reliability Principle with Uncertainty modelling and through probabilistic Risk assessment (Garpur), <https://www.sintef.no/projectweb/garpur>

- [32] S. A. B. de Almeida, R. Pestana and F. P. Maciel Barbosa, "The main causes of incidents in the Portuguese Transmission System — Their characterization and how they can be used for risk assessment," 2009 6th International Conference on the European Energy Market, Leuven, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEM.2009.5207218.
- [33] S. Perkin et al., "Framework for Threat Based Failure Rates in Transmission System Operation," 2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO), Beer-Sheva, 2016, pp. 150-158, doi: 10.1109/SMRLO.2016.34.
- [34] EN 60050, International Electrotechnical Vocabulary, www.electropedia.org
- [35] Hamed Bakhtiari, Jin Zhong, and Manuel Alvarez. "Predicting the stochastic behavior of uncertainty sources in planning a stand-alone renewable energy-based microgrid using Metropolis-coupled Markov chain Monte Carlo simulation." *Applied Energy* 290 (2021): 116719.
- [36] Enock Mulenga, On the hosting capacity of distribution networks for solar power, avhandling, Luleå tekniska universitet, oktober 2021.
- [37] Shimi Sudha Letha, Math Bollen, Estimation of Electric Vehicle Hosting Capacity of a Distribution Network based on Ambient Temperature, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, September 2021.
- [38] Continental Europe synchronous area separation in 8 January 2021, Entso-E.

9 Bilagor

Bilaga A. administrativ bilaga KÄNSLIG INFORMATION

Bilaga B. halvvägsrapport Fatemeh Hajeforosh. Här bifogas bara kappan; de fyra bifogade artiklar finns alla tillgängliga i litteraturen:

- Paper A: [1]
- Paper B: [2]
- Paper C: [6]
- Paper D: [9]

Bilaga C. Operational risk assessment of transmission systems: a review
KÄNSLIG INFORMATION

Bilaga D. Enhancing the hosting capacity of distribution transformers using dynamic component rating. KÄNSLIG INFORMATION

Bilaga E. Optimal utilization of dynamic line rating in the presence of electric vehicles in power systems. KÄNSLIG INFORMATION

Bilaga F. Draft manuscript on HVDC modelling. KÄNSLIG INFORMATION