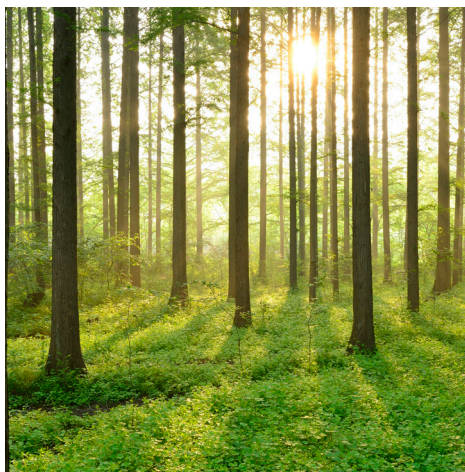


DYNAMISK BELASTNINGSFÖRMÅGA AV LUFTLEDNINGAR

RAPPORT 2020:710



Dynamisk belastningsförmåga av luftledningar

Överbelastningsskydd och tillförlitlighet

FATEMEH HAJEFOROSH – MATH BOLLEN

ISBN 978-91-7673-710-1 | © Energiforsk december 2020

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Detta projekt, *Stokastiska modeller för dynamisk belastbarhet av luftledning*, är resultatet av ett licentiatarbete som förväntas fortsätta och avslutas med en doktorandexamen. Projektet resulterar i nya framtagna modeller som visar hur det går att öka överföringsförmågan utan att bygga nya ledningar eller stationer och utan att äventyra driftsäkerhet och tillförlitlighet.

Elnätets överföringsförmåga i regionnätet begränsar hur mycket förbrukning och produktion som kan anslutas. Denna begränsning kan försvåra anslutning av t.ex. vindkraftsparker eftersom nya luftledningar behöver byggas. Ett nytt lösnings-förslag är användning av tekniken "dynamisk belastbarhet" där överförings-förmågan av en elledning kontinuerligt anpassas till väderförhållandet istället för att den är anpassad på värsta fallet. Överbelastning förknippas inte enbart med reläskydd utan även med övervakning i kontrollrum och skydd av säkringar. Resultaten i rapporten är användbara för elnätbolag som vill fördjupa sig inom området samt som underlag för nya studier på egna anläggningar. Rapporten berör både sannolikheter till överbelastning med olika toleransnivåer samt angreppssätt att beräkna när det är dags att förstärka nät istället för att upphandla flexibilitet.

Projektet är utfört i Skellefteå av doktoranden Fatemeh Hajeforosh på Luleå Tekniska Universitet och handlett av professor Math Bollen på Luleå Tekniska Universitet. Projektet tillhör programmet *Risk- och Tillförlitlighetsanalys* och är samfinansierat med Skellefteå Kraft AB.

Ett extra stort tack till referensgruppen, som på ett mycket givande sätt har bidragit till projektet:

- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft AB
- Arne Bergström, Vattenfall Eldistribution AB
- Erik Torkildsson, Vattenfall Eldistribution AB
- Claes Ahlrot, E.ON Energidistribution AB
- Erik Lejerskog, Ellevio AB
- Daniel Köbi, Jämtkraft Elnät AB
- Oscar Lennerhag, Independent Insulation Group Sweden AB
- Robert Saers, Hitachi ABB Power Grids AB

Programmets Risk- och Tillförlitlighetsanalys programstyrelse, som initierat, följt upp och godkänt projektet, består av följande ledamöter:

- Jenny Paulinder, Göteborg Energi AB (ordförande)
- Josefine Grundius, Ellevio AB
- Mari Jakobsson, Svenska kraftnät
- Hans Andersson, Vattenfall Eldistribution AB
- Kenny Granath, Mälarenergi Elnät AB
- Hampus Halvarsson, Jämtkraft AB
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft AB
- Ola Löfgren, Föreningen Industriell Elteknik (FIE)
- Carl Johan Wallnerstöm, Energimarknadsinspektionen
- Anders Richert, Elsäkerhetsverket

Stort tack också till de företag som har varit engagerade i programmet Risk- och Tillförlitlighetsanalys:

- Göteborg Energi AB
- Ellevio
- Svenska kraftnät
- Vattenfall Eldistribution AB
- Elinorr AB
- Mälarenergi Elnät AB
- Jämtkraft AB
- Skellefteå Kraft AB
- AB PiteEnergi
- Jönköping Elnät AB
- Borås Elnät AB
- Föreningen Industriell Elteknik (FIE)

Stockholm november 2020

Energiforsk AB

Susanne Stjernfeldt

Forskningsområde Elnät, Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Dynamisk belastningsförmåga är att sätt att möjliggöra en högre användning av överföringskapacitet av en luftledning utan att det finns en ökad risk att ledningen blir överbelastad. Från prognosen eller mätning av väderparametrar görs det en uppskattning av hur mycket ström en luftledning klarar.

Metoden har studerats förut och det pågår en hel del forskning kring detta. Det som dock får begränsat med uppmärksamhet är dynamisk belastningsförmågas roll i överbelastningsskydd, dess olika osäkerheter och tillförlitlighet. Det är dessa aspekter som var utgångspunkter för studien som presenteras i denna rapport.

Det visas att det finns en stor potential för dynamisk belastningsförmåga under vintermånaderna i Sverige, precis då som det behövs mer överföringsförmåga. Det möjliggör bland annat en större integrering av elbilsladdning i elnätet.

En metod för dynamisk belastningsförmåga i kombination med överbelastningsskydd har introducerats; sannolikheten att ledningen är överbelastad är kriteriet för att bedöma om det behövs åtgärder för att förebygga överbelastning. Denna stokastiska metod kan användas under driftplanering (till exempel dagen innan), under driften (till exempel för att bedöma driftsäkerheten) och som en skyddsåtgärd (i fall ingen av de förebyggande åtgärderna hjälper).

Belastningsförmågan och sannolikhet på överbelastning har beräknats för varje timme under en åttaårsperiod för en hypotetisk ledning till en hypotetisk stad i Norra Sverige, Belasteå. Alla ingångsparametrar var dock baserade på verklig data och inte hypotetiska alls.

Rapporten innehåller en diskussion angående en del förslag på tillämpningar och utvidgning av metoden. Där ingår det bland annat tillämpningar i det svenska elnätet, utveckling av liknade metoder för kablar och transformatorer, samt tillämpningar då ledartemperaturen mäts.

Summary

Dynamic line rating is a way of enabling a higher utilization of the transport capacity of an overhead line without there being an increased risk of the line becoming overloaded. From the forecasted or measured weather parameters, an estimate is made of how much current the overhead line can handle.

The method has been studied before and there is a lot of research going on about this. However, what gets limited attention is the role of dynamic line rating in overload protection, the various uncertainties and the reliability of the complete dynamic-line-rating system. These aspects were the starting points for the study presented in this report.

It is shown that there is great potential for dynamic line rating during the winter months in Sweden, just when more transport capacity is needed. Among other things, this enables additional integration of electric vehicle charging in the electricity grid.

A method for dynamic line rating in combination with overload protection has been introduced, where the probability that the line is overloaded is the criterion for assessing whether measures are needed to prevent overload. This stochastic method can be used during operational planning (for example day-ahead), during operation (for example to assess operational security) and as a protective measure (in case none of the other measures to prevent overloading helps).

The line rating and probability of overload have been calculated, for every hour, over an eight-year period, for a hypothetical line to a hypothetical city in Northern Sweden, Belasteå. All input parameters were based on real data and are not hypothetical at all.

The report contains a discussion regarding some proposals for applications and extension of the method. This includes applications in the Swedish grid, the development of similar methods for cables and transformers, as well as applications where the conductor temperature is measured.

Innehåll

1	Inledning	8
2	Exempel och datakällor	9
3	Dynamisk belastningsförmåga	10
3.1	Begränsningar i överföringsförmågan	10
3.2	Termiska modellen av en luftledning	11
3.3	Belastningsförmågan	11
3.4	Termerna i termiska balansen	12
3.5	Relation mellan vädret och belastningsförmåga	12
3.6	Tidsberoende av belastningsförmåga	13
3.7	Nyttan med dynamisk belastningsförmåga	14
4	Överbelastningsskydd	18
4.1	Belastningsförmågan och skydd	18
4.2	Skyddsfel – pålitlighet och säkerhet	18
4.3	Avvägning mellan pålitlighet och säkerhet	19
4.4	Sannolikhetsfördelningar av belastningsförmåga	21
5	Stokastiska modeller för fel vid dynamisk belastningsförmåga	23
6	Sannolikhet för överbelastning	25
7	Stokastisk dynamisk belastningsförmåga	27
7.1	Basprincipen	27
7.2	Percentilerna under en 24-timmars period	27
7.3	Hur ofta behövs det vidtas åtgärder	29
8	Diskussion, rekommendationer	32
8.1	Tillämpningar	32
8.2	Val av tröskelvärde	32
8.3	osäkerheter i belastningsförmåga	33
8.4	Jämförelse av prognosmetoder	34
8.5	Mätning av ledartemperaturen	34
8.6	Tillämpning på kablar och transformatorer	35
8.7	Vid fortsatt Ökning av förbrukning	35
9	Slutsatser	36
10	Referenser	37

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar resultat av ett projekt på Luleå tekniska universitet, med titeln "Stokastiska modeller för dynamisk belastbarhet av luftledningarna", som finansierades av Energiforsk inom riskanalysprogrammet. Projektet utfördes tillsammans med projektet "Stokastiska modeller för framtidens smarta transmissionsnät", som finansierades av Skellefteå Kraft Elnät och Energimyndigheten.

Projektet utfördes av Fatemeh Hajeforosh (doktorand), Zunaira Nazir (doktorand) och Math Bollen (professor, huvudhandledare). Sarah Rönnberg är bihandledare till Fatemeh Hajeforosh. Manuel Alvarez är bihandledare till Zunaira Nazir.

Rapporten baseras till största delen på halvvägsrapporten som skrevs av Fatemeh Hajeforosh [1] och på artiklarna från projektet, som publicerades hittills, [2] och [3].

Rapportförfattarna fick återkoppling på rapportens utkast av Claes Ahlrot (Eon) och Oscar Lennerhag (Independent Insulation Group).

2 Exempel och datakällor

För studierna som utfördes i projektet, och då resultat visas i denna rapport, har det använts en del data. Det gäller då väderparametrar för en stad i Norra Sverige, förbrukningsdata av samma stad, produktion av en vindpark inte allt för långt bort från staden, och produktion från solcellsanläggningar. Vi kommer att referera till staden som Belasteå, utan att ytterligare ange mer information om den, utöver att det är en stad i Norra delen av Sverige. Information om stadens förbrukning erhålls från elnätsföretaget som ansvarar för matningen till staden. Ägaren av vindparken gav oss data om produktion från deras anläggning. Väderdata kom från SMHI:s offentliga hemsida (www.smhi.se) medan data om produktion från solcellsanläggningar räknades ut av Renewables Ninja (www.renewables.ninja [4]) från satellitdata om molnighet och atmosfärens genomskinlighet.

Matningen till Belasteå är i verkligheten inte överbelastad, så det finns just nu ingen anledning att använda dynamisk belastningsförmåga. Men det förväntas en ökning i förbrukning, till exempel från elbilar, från befolkningstillväxt och från elektrifiering av industrin. För att kunna visa möjligheterna med dynamisk belastningsförmåga har förbrukningen ökats på ett artificiellt sätt och ledningarnas spänningsnivå minskat. Själva resultaten av studien som visas i rapporten kan därför inte tillämpas på en verklig situation, de är enbart tänkta att illustrera möjligheterna med dynamisk belastningsförmåga och beräkningsmetoderna.

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 [5][6][8] och flera grundläggande artiklar skrivs om ämnet på 1990-talet [8][9][10]. På senare tid fick dynamisk belastningsförmåga betydande uppmärksamhet för integrering av vindkraft; grundidén var att hög produktion från vindkraft skulle inträffa för höga vindhastigheter vilket skulle innebära en högre belastningsförmåga av ledningar [11].

Tillämpningen av dynamisk belastningsförmåga i kraftsystemet med dess fördelar är fokus för flera artiklar [12][13][14]. En översikt över några praktiska implementeringar av metoden presenterades nyligen i [15]. Trots olika fördelar som rekommenderas i litteraturen kommer det alltid att finnas en osäkerhet i belastningsförmågan. 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. I resten av rapporten kommer vi att prata mer om osäkerheter och risker, men först mer om själva metoden för att beräkna ledningens belastningsförmåga.

3.1 BEGRÄNSNINGAR I ÖVERFÖRINGSFÖRMÅGAN

Det finns två typer av gränser på överföringsförmågan för en luftledning: termiska gränser och stabilitetsgränser. I detta projekt har vi bara studerat de termiska gränserna; dessa ställs genom att det finns en högsta tillåten temperatur av ledarna som är del av luftledningen. Blir temperaturen för hög kan två saker hända vilka bör undvikas:

- Ledarna expanderar och blir för långa och kommer därför att hänga för nära marken; detta leder till en ökad risk för skador på bebyggelse under ledningen (ifall sådan finns), personskador och jordfel när ledaren kommer i kontakt med växter under ledningen.
- Ledarna kan utsättas för ett materialtekniskt fenomen som heter glödning¹ ("annealing" på engelska) [16][17][18]. Det händer vanligen vid en högre temperatur än gränstemperaturen² enligt första punkten. Glödning är relevant framförallt vid kortslutningsfel då det blir en snabb ökning av ledartemperaturen utöver drifttemperaturen [19].

¹ Glödning används också konstruktivt som värmebehandlingsmetod i tillverkning av metaller. Godset upphettas till viss temperatur, varefter det långsamt får svalna. Används för att ta bort hårdhet eller spänning i metallen [20].

² Glödning nämns i flera artiklar i samband med belastningsförmågan av ledningar. En av referensgruppens medlemmar angav dock att det ska till höga temperaturer för att ledaren ska glödgas och få en bestående utvidgning.

3.2 TERMISKA MODELLEN AV EN LUFTLEDNING

När det är ledningstemperaturen som sätter gränsen för en luftlednings överföringsförmåga behövs det en termisk modell för att beräkna temperaturen av ledaren. Modellen som används utgår från att det finns ett antal värmekällor (som ökar mängden termisk energi, eller värme, i ledaren) och ett antal sätt att kyla ner ledaren (som minskar mängden termisk energi i ledningen). Ändringen i temperaturen beror då på skillnaden mellan uppvärmning och nedkylning, samt på ledarens temperaturkoefficient.

$$m c_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + q_j - q_c - q_r$$

Symbolerna har följande betydelse:

m : massa per längdenhet av ledaren

c_p : specifika värmen av ledaren

T_c : ledartemperatur

q_s : uppvärmning genom strålning från solen

q_j : uppvärmning genom ledarströmmen

q_c : nedkylning genom konvektion

q_r : nedkylning genom strålning

De olika termerna på högersidan av ekvationen kommer att behandlas i något mer detalj nedan.

I studierna som var underlag till denna rapport har det antagits att ledaren är i termisk balans: nedkylning är lika med uppvärmning och ledartemperaturen är konstant. Då är vänstersidan av ekvationen lika med noll och följande gäller:

$$q_s + q_j = q_c + q_r$$

Tre av fyra termer i ekvationen är beroende på ledartemperaturen, och relationen med temperaturen är olinjär för två av termerna. För att räkna ut temperaturen vid en viss ström behövs en numerisk lösning av ekvationen.

3.3 BELASTNINGSFÖRMÅGAN

Som tidigare nämnts krävs en numerisk lösning av ekvationen för att räkna ut temperaturen. För det motsatta problemet, det vill säga att räkna ut strömmen som ger en viss temperatur, i stationärt tillstånd, finns det dock en enkel ekvation. Anledningen till detta är att bara en av fyra termer (uppvärmning genom ledarströmmen) är beroende på strömmen. Om vi skriver:

$$q_j = R \cdot I^2$$

Resistansen R är en funktion av ledartemperaturen. Nu kan strömmen lösas på ett enkelt sätt.

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R}}$$

Detta strömvärde, för givna väderförhållanden, kommer att refereras till i rapporten som "momentan belastningsförmåga" eller bara "belastningsförmåga" av luftledningen.

3.4 TERMERNA I TERMISKA BALANSEN

Termiska balansen, som visades ovan, består av fyra termer. Ekvationer för att beräkna termerna från väderparametrarna finns bland annat i IEEE 738 [4] och i en CIGRE teknisk broschyr [22]. Uppvärmningen på grund av strömmen beskrevs redan ovan.

Uppvärmningen på grund av solinstrålning beror på ledarytans absorptionskoefficient (hur mycket del av solinstrålning som absorberas av ytan), på solens position på himlen i relation till ledaren, på molnighet och annan dämpning i atmosfären. Absorptionskoefficienten varierar med tiden; den är låg för nya ledningar och ökar efter några år. Det är ledarens yta som antar en annan färg som gör att absorptionen ändras. Ökningen beror bland annat på mängden nedsmutsning i luften. Molnighet och dämpning i atmosfären är svårt att bedöma och IEEE-modellen tar inte med dem. Det används istället en standardrelation för genomskinlighet av atmosfären som funktion av höjden av solen över horisonten.

Nedkylning på grund av konvektion är den mest komplicerade termen. Enligt IEEE-modellen finns det tre olika uttryck: ett för vindhastighet noll, ett för låga vindhastigheter och ett för höga vindhastigheter. Alla tre räknas ut och högsta värdet används som konvektionsterm i beräkningarna.

Nedkylning på grund av strålning beror på ledartemperaturen och omgivningens temperatur. I beräkningsmodellen antas det att omgivningstemperaturen är lika som lufttemperaturen i närheten av ledaren. Denna term är proportionell mot ledartemperaturen upphöjd till fyra och spelar därmed en viktig roll vid stora temperaturskillnader mellan ledare och omgivningen.

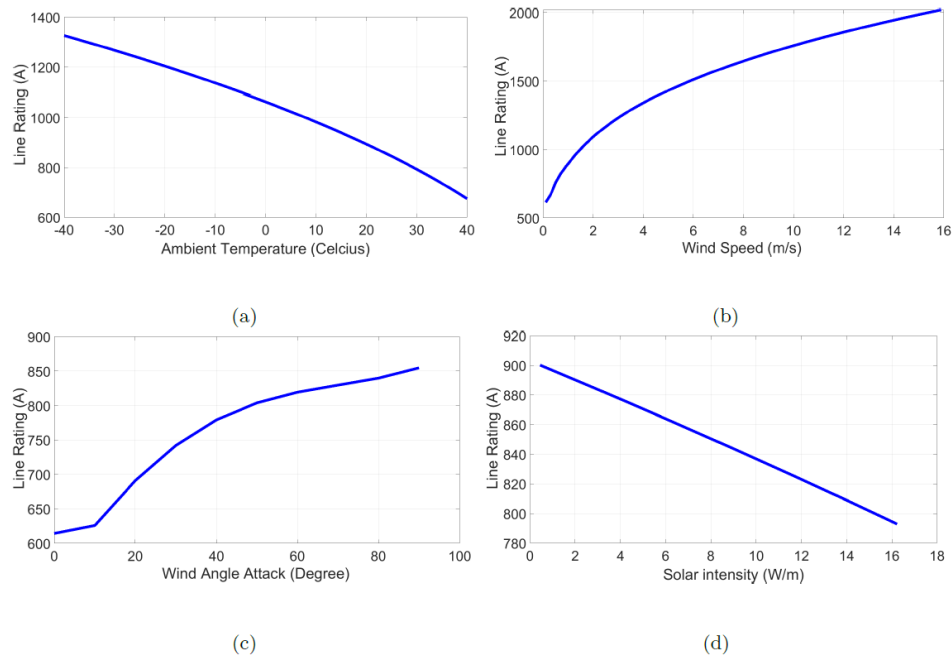
För detaljerade uttryck refereras det till halvvägsrapporten [1] och IEEE-standarderna [4].

3.5 RELATION MELLAN VÄDRET OCH BELASTNINGSFÖRMÅGA

Potentialen av dynamisk belastningsförmåga visas i Figur 1:

- belastningsförmågan minskas med omgivningstemperatur, halveras mellan -40 och +40 °C;
- belastningsförmågan ökas med vindhastigheten, framförallt för låga vindhastigheter,
- belastningsförmågan nästan dubblas mellan vindstill och 2 m/s;
- belastningsförmågan ökas när vinden kommer mer rakt mot ledningen än parallellt till den, runt 40%;
- belastningsförmågan minskas med solinstrålningen, något över 10%.

Figuren visar att framförallt vindhastigheten och i mindre utsträckning omgivningstemperaturen påverkar belastningsförmågan.



Figur 1. Ledningens belastningsförmåga som funktion av omgivningstemperaturen (a), vindhastighet (b), riktning av vinden jämfört med ledningen (c) och solinstrålning (d).

3.6 TIDSBEROENDE AV BELASTNINGSFÖRMÅGA

Även om ekvationerna som används för att beräkna belastningsförmågan har bred acceptans inom elkraftindustrin finns det ändå olika sätt att tillämpa dem.

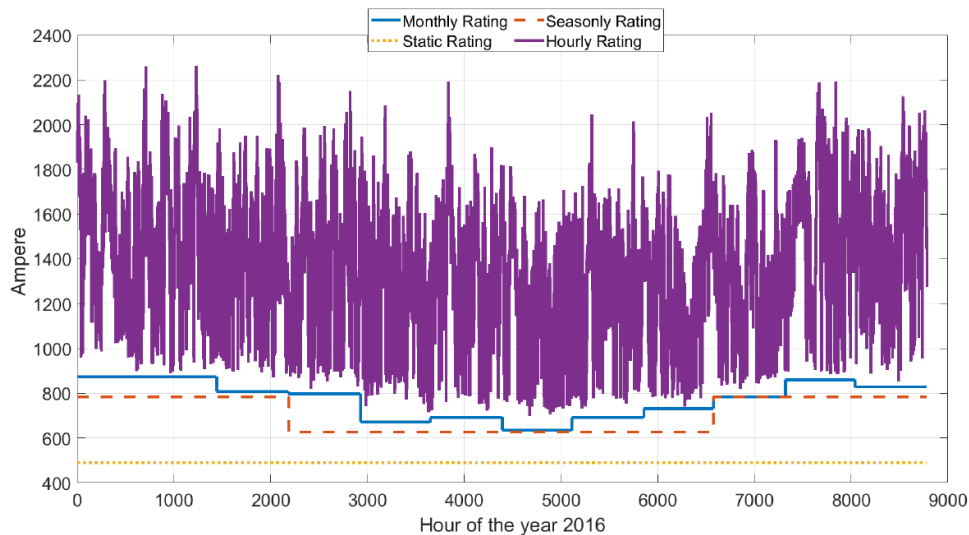
Vanligaste sättet är att beräkna den "statiska belastningsförmågan", då det antas vissa extrema värden för väderparametrarna för att beräkna belastningsförmågan. Ett annat sätt som är också ganska vanligt är att ta sådana extrema värden för både sommarhalvåret och vinterhalvåret. Sådant är framförallt viktigt för länder som Sverige, då topplastimmen uppstår under vinterhalvåret.

Utöver det finns det "dynamisk belastningsförmåga" då belastningen beräknas över kortare perioden, till exempel en timme, baserat på mätningar eller prognos av väderparametrar. Det finns en del olika implementeringar av detta, men vad alla metoder har gemensamt är att ledningens belastningsförmåga är tidsberoende.

Inom projektet har vi använt oss av uppmätta väderparametrar över en åtta-årsperiod (2011-2018), från SMHI, för Belasteå. I Figur 2 visas fyra olika metoder för att bestämma ledningens belastningsförmåga. Beräkningarna utfördes för en ledare av typ Drake, 281 mm², temperatur 75 °C, emissions- och absorptionskoefficient 0,6.

- Statisk belastningsförmåga beräknades med extrema värden för väderparametrar: 0 m/s vindhastighet; maximal solinstrålning; 40 °C omgivningstemperatur.

- Säsongsvärden beräknades utifrån det lägsta värdet av överföringsförmågan över alla timmar under sommar- och vinterhalvåret, över åtta-årsperioden.
- Månadsvärden beräknades utifrån det lägsta värdet av överföringsförmågan över alla timmar under angiven månad, över åtta-årsperioden.
- Timvärden beräknades utifrån värdet av belastningsförmågan för varje timme under ett år.



Figur 2. Belastningsförmågan av en luftledning, i Belasteå på olika tidskalor.

Det finns ett antal observationer från figuren som kan vara bra att nämna här:

- Timvärden för ledningens belastningsförmåga visar en stor variation under året. Höga och låga värden inträffar under året, men framförallt låga värden är lägre under sommaren än under vintern. De beror på omgivningstemperaturen under timmar med låga vindhastigheter.
- Belastningsförmågan för sommarhalvåret, beräknad enligt ovan, är lägre än den för vinterhalvåret. Men även den för sommarhalvåret är högre än statiska värdet utgående från extrema väderförhållanden. Man kan tolka det som att extremvärden sällan inträffar, eller att de i alla fall inte inträffade under den studerade åttaårsperioden.
- Genom att använda månadsvärden får man icke försumbara öknings i överföringsförmågan, utöver säsongsvärden.

3.7 NYTTAN MED DYNAMISK BELASTNINGSFÖRMÅGA

Det finns två olika sätt att använda den extra överföringsförmåga som visas i Figur 2 för att kunna tillfredsställa ett ökat behov på effekt. Första sättet är att använda relationen mellan vädret och överföringsbehovet. Exemplet som har använts ofta för att illustrera nyttan med dynamisk belastningsförmåga gäller vindkraft. Hög produktion från en vindkraftsanläggning finns när det blåser och det är också då som ledningen kyls bra och överföringsförmågan är hög. Då behövs det inte några extremvärden för att räkna ut den statiska belastningsförmågan.

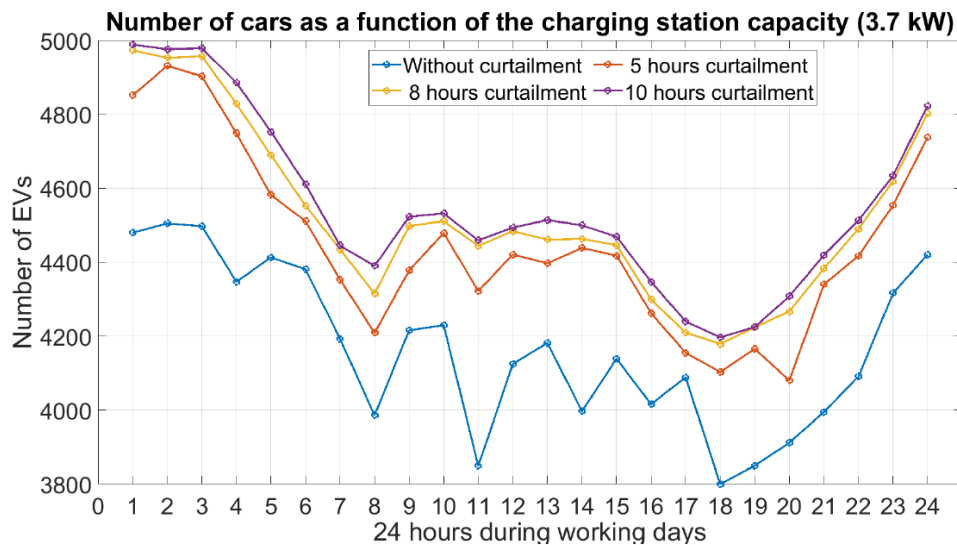
En liknande möjlighet finns i matning till svenska städer, då högsta förbrukningen inträffar på de kallaste dagarna, då det finns bra kylning av ledningarna och därmed en hög överföringsförmåga.

För att bedöma hur mycket som kan vinnas på detta sätt har det använts förbrukningsdata för Belasteå under samma åtta-årsperiod som det fanns väderdata för i förra avsnittet. Samma luftledning som förut 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 acceptansgräns³ 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 3 och Figur 4 som den blå kurvan ("without curtailment"). Figurerna 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 i Figur 3 och Figur 4.

³ Begreppet "acceptansgräns" (eller "hosting capacity" på engelska) infördes 2004 som del av ett europeiskt projekt om distribuerad generering [23] och har sedan dess använts på bred skala, även för ny förbrukning. Acceptansgränsen är mängden ny förbrukning eller ny produktion som nätet klarar utan åtgärder eller vid specifika åtgärder.

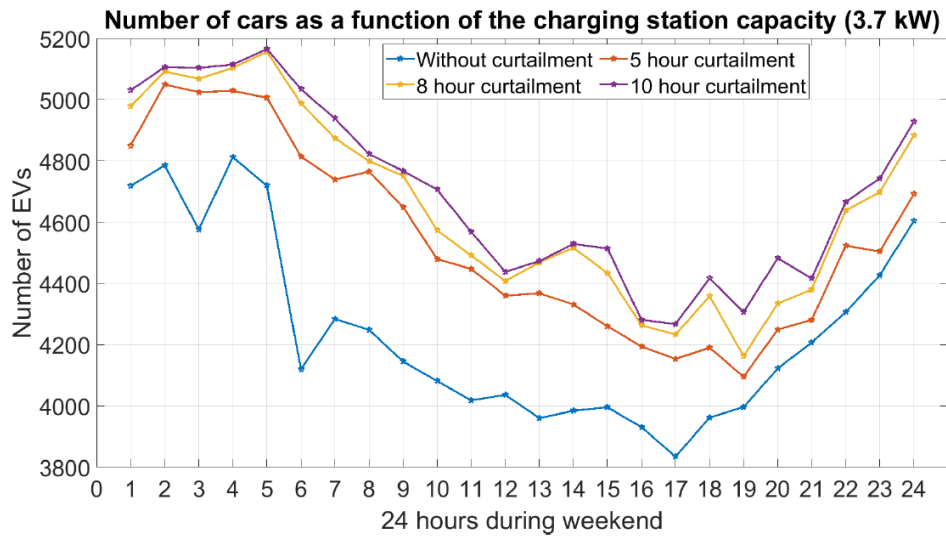


Figur 3. Antalet elbilar (på 3,7 kW) som kan laddas samtidigt, utöver den vanliga lasten av Belasteå, innan luftledningen blir överbelastad, arbetsdagar.

En viktig observation från Figur 3 är att det kan laddas 3800 elbilar samtidigt varje timme av dagen under vardagarna. Samma observation kan också presenteras som att förbrukningen kan ökas med $3800 \times 3,7 \text{ kW} = 14,1 \text{ MW}$, varje timme av dagen utan att ledningen blir överbelastad. Observera att toppförbrukningen, utan elbilsladdning, är 19,7 kW. Det betyder att högsta förbrukningen kan ökas med 70 %. Denna extra marginal har delvis att göra med att väderparametrar som används för att beräkna den statiska belastningsförmågan inte inträffar i verkligheten, vilket visades i Figur 2. Med det kan inte förklara hela marginalen. Det finns också ett stort bidrag av att högsta förbrukningen inträffar vid låga temperaturer.

Figuren visar också att det finns utrymme för att ladda omkring 600 bilar ytterligare (något över 2 MW) under natten.

Att acceptera nedstyrning av förbrukningen ger ytterligare utrymme för att öka förbrukningen, eller i detta fall att ansluta flera elbilar. Figuren visar också att det finns begränsat med nytta i att acceptera 10 timmar nedstyrning om året istället för 5 timmar. Observera att 10 timmar nedstyrning betyder nedstyrning 10 gånger om året under den specifika timmen på arbetsdagar.



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

Resultaten för helgdagar, som visas i Figur 4, är ganska lika som för veckodagar. Det finns utrymme för minst 3800 bilar att ladda samtidigt under dagen och ca 800 ytterligare under natten. Potentialen av nedstyrning på förmiddagen är något större under helgdagar än på arbetsdagar.

4 Överbelastningsskydd

4.1 BELASTNINGSFÖRMÅGAN OCH SKYDD

Ledningens belastningsförmåga är nära relaterad till överbelastningsskydd av ledningen. Det innebär inte att belastningsförmågan är precis samma sak som skyddet, men båda begreppen är nära relaterade.

Överbelastningsskyddet aktiveras när strömmen överskrider ledningens belastningsförmåga tillräckligt mycket under en för lång tid. Skyddet kan vara automatiskt, i form av en överströmrelä 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 kommer att använda begreppen "skydd" och "reläskydd" i rapporten både för automatiska och för manuella åtgärder för att förebygga eller begränsa ledningens överbelastning. I vissa fall kommer vi också att använda 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 ligger utanför denna rapport.

4.2 SKYDDSFEL – PÅLITLIGHET OCH SÄKERHET

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 [24]).
- Säkerhet mot oönskad funktion ("security") av reläskydd definieras som "sannolikheten för ett skydd för 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" [24]).

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 säkerhet samtidigt. Här kan det också läggas till att det inte går att med säkerhet 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 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 detta 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. 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 säkerhet.

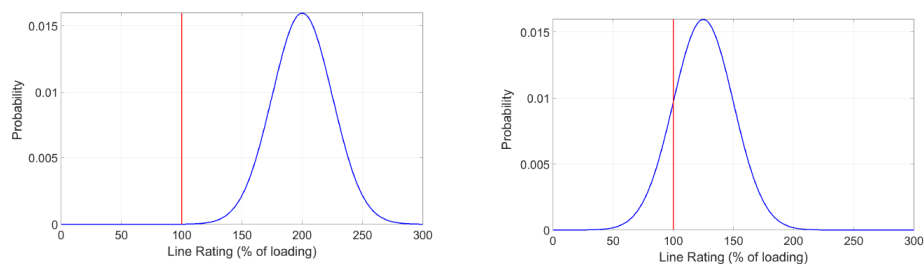
Klassiska överbelastningsskydd hade en hög pålitlighet: statiska belastningsförmågan är nästan alltid lägre än momentana belastningsförmågan, varför en överbelastning med hög sannolikhet leder till funktion av skyddet. Men säkerheten är låg, vid funktion av skyddet finns det en hög sannolikhet att ledningen 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 Kapitel 6.

4.3 AVVÄGNING MELLAN PÅLITLIGHET OCH SÄKERHET

Som det nämnts tidigare, är ledningens belastningsförmåga inte helt känd. Det betyder matematiskt att belastningsförmågan ska behandlas som en slumpmässig variabel ("random variable") och att den ska kvantifieras genom en sannolikhetsfördelning istället för ett fast värde. Den blåa kurvan i Figur 5

representerar täthetsfunktionen⁴ för sannolikhetsfördelningen av belastningsförmågan. Det antas här, bara för att illustrera, att detta är en normalfördelning. Strömmen genom ledningen antas här vara känd och den ligger på 100%. En överbelastningssituation uppstår när det faktiska värdet av belastningsförmågan är mindre än strömmen genom ledningen, dvs när belastningsförmågan ("line rating") är mindre än 100%. Sannolikheten för överbelastning är då lika med ytan under den blåa kurvan till vänster av den röda linjen⁵. Det förväntade värdet av belastningsförmågan valdes till 200% (vänster) och 125% (höger) av belastningsförmågan, med en standardavvikelse av 25% i båda fallen. I vänstra fallet är sannolikheten för överbelastning mycket liten och i det högra fallet är sannolikheten ungefär 17%. Skulle det inte vidtas åtgärder, då är det en 17% sannolikhet att det hade behövts åtgärder (bristande funktion); skulle det dock vidtas åtgärder, då är det en 83% sannolikhet att åtgärder inte hade behövts (oönskad funktion). Som det nämndes förut är summan av sannolikheten lika med 100%.



Figur 5. Jämförelsen mellan strömmen genom en ledning (100 %, röd vertikal linje) och sannolikhetsfördelningen av ledningens belastningsförmåga (blå kurvan).

För att kunna bedöma vad som ska göras, att vidta åtgärder eller inte vidta åtgärder, behövs det kännedom om konsekvenserna av båda besluten.

När en ledning är överbelastad och inga åtgärder vidtas kan detta få ett antal konsekvenser. Den första inverkan blir att ledartemperaturen kommer att stiga över sitt tillåtna värde och ledarens nedhäng blir större än acceptabelt. Detta är en säkerhetsfråga för personer och allt annat som finns under ledningen. Det ökar också risken för att ledaren kommer för nära vegetationen med ett jordfel som resultat. Ett sådant fel inträffar när linjen redan är hårt belastad och påverkan av felet blir därmed allvarligare. I ett radiellt system resulterar felet i ett avbrott för en högbelastad ledning. I ett maskat system kommer belastningen på denna ledning att tas över av andra (parallella) ledningar. Dessa ledningar kan i sin tur bli överbelastade. Eftersom detta inträffar under hög belastning, finns det till och med en risk för instabilitet och ett avbrott för många kunder. Under felet kommer ledartemperaturen att öka ännu mer, vilket möjligen resulterar i glödgning där ledarmaterialet försvagas.

⁴ "probability density function", kallas även "frekvensfunktion" på svenska.

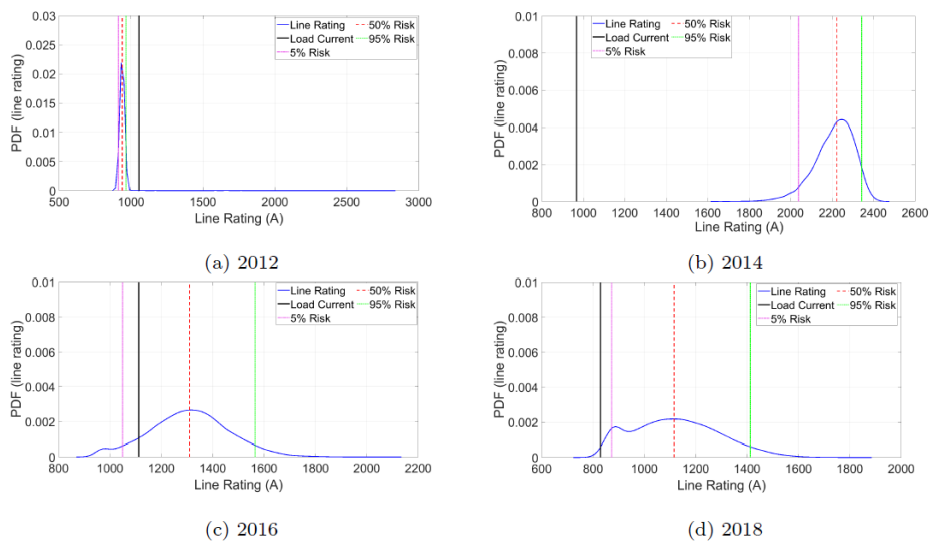
⁵ Matematiskt: integralen från noll till 100% av täthetsfunktionen.

Den andra typen av fel, att vidta åtgärder när det inte behövs (oönskad funktion av skyddet), kommer att ha en omedelbar inverkan, antingen på kunderna eller på systemet. Bortkoppling av ledningen riskerar igen överbelastning och instabilitet. I ett maskat system bör bortkoppling av en linje normalt inte leda till ett omfattande avbrott, enligt (N-1) kriteriet.

Onödig nedstyrning av förbrukning eller produktion kommer att ha en inverkan, vanligtvis ekonomiskt, på de kunder som drabbas av nedstyrningen. Om en sådan onödig nedstyrning sker regelbundet kan denna påverkan bli oacceptabel. Åtgärder på grund av överbelastning (antingen verklig överbelastning eller en felaktigt bedömd överbelastning) kan också bestå av tjänster som köps av nätoperatören. Detta kan till exempel vara i form av gasturbiner som startar. Den onödiga åtgärden kommer att ha ekonomiska konsekvenser för nätoperatören, beroende på marknadsmekanismer och tariffer.

4.4 SANNOLIKHETSFÖRDELNINGAR AV BELASTNINGSFÖRMÅGAN

I Figur 5 visas en antagen normalfördelning som representerar belastningsförmågan, men verkliga fördelningar varierar med tid och är ofta inte alls normalfördelningar. Några exempel finns i Figur 6, baserat på vädret i Belasteå för samma datum och tid under fyra år. Uppmätta väderparametrar antogs som förväntade värden, och det antogs en standardavvikelse lika med 2°C , 1 m/s och 10° för omgivningstemperatur, vindhastighet och vindriktning.



Figur 6. Sannolikhetsfördelning av belastningsförmågan och strömmen för samma datum och tidpunkt under fyra olika år. Observera skillnaderna i horisontala axlar mellan figurerna. Vertikala linjer anger 5, 50 och 95 % sannolikhet för att ledningen är överbelastad.

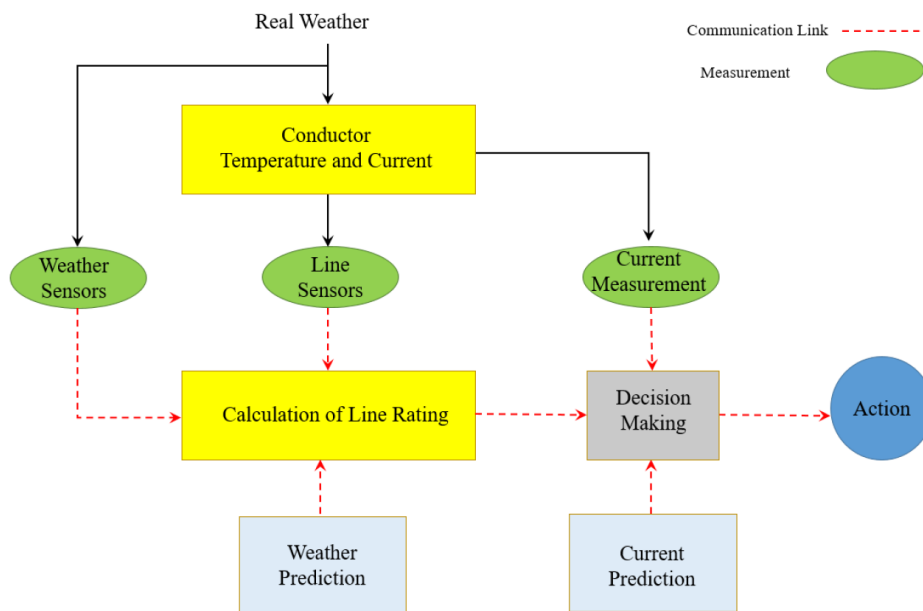
Figurerna visar att det kan finnas en stor variation i sannolikhetsfördelningen, även för dessa små värden av standardavvikelsen. Strömmen genom ledningen är dock ganska lika för dessa fyra timmar. Sannolikheten för att ledningen var överbelastad är också helt olika mellan åren. Osäkerheten i belastningsförmågan var liten under 2012 och sannolikheten att ledningen var överbelastad var nära

100 %. För samma timme under 2014 fanns det en större osäkerhet i belastningsförmågan, men hela fördelningen låg så pass mycket över strömmen att sannolikheten för överbelastning var nära noll. Både i 2016 och 2018 var sannolikheten för överbelastning låg, men ändå några procent.

5 Stokastiska modeller för fel vid dynamisk belastningsförmåga

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 7 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 och användning under själva driften (som skydd). Denna generiska modell har använts i [1] för att titta på tillförlitlighet från olika synvinklar. Streckade linjer representerar kommunikationskanalen mellan två block.



Figur 7. Generisk modell för dynamisk belastningsförmågan vid en luftledning.

Den generiska modellen i Figur 7 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 belastningsförmågan, 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.

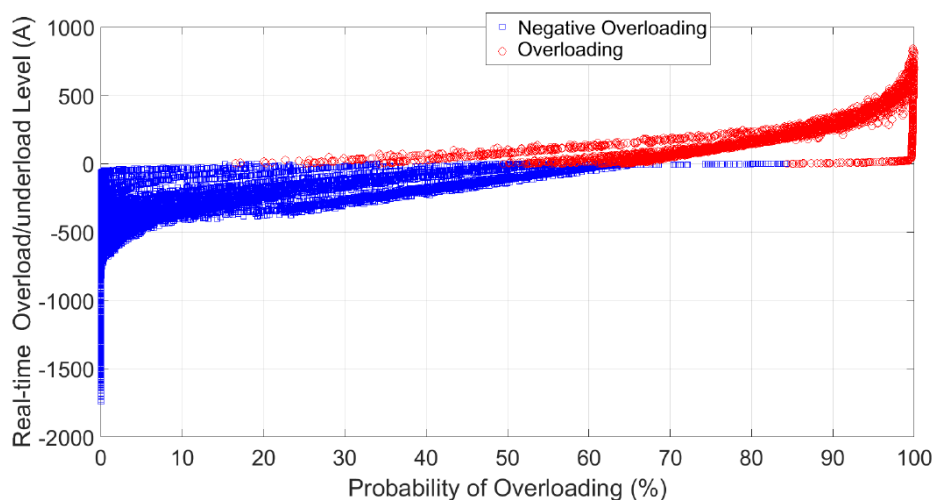
För mer detaljer om de olika möjliga fel som kan uppstå i ett system för dynamisk belastningsförmåga refereras till halvvägsrapporten [1] och ytterligare publikationer som kommer ut från projektet.

6 Sannolikhet för överbelastning

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 för att kunna illustrera metoden.

Figur 8 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.

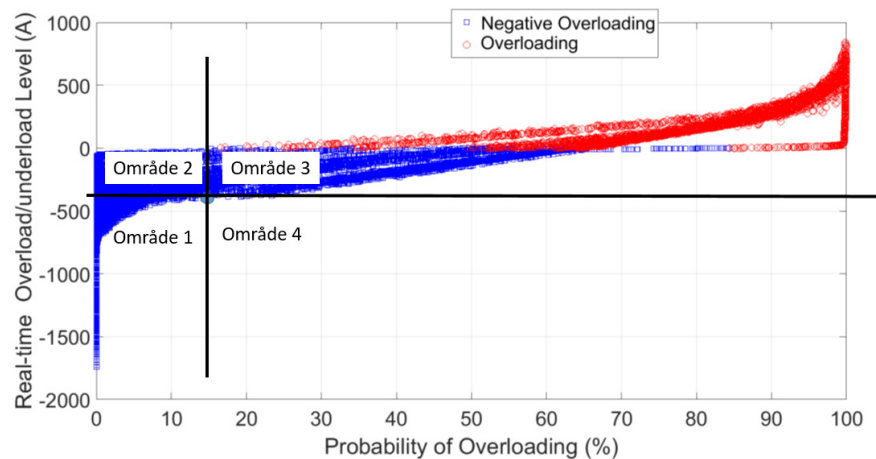
Den deterministiska belastningsförmågan är det beräknade värdet för varje timme från uppmätta väderdata. Sannolikheten för överbelastning och marginal har beräknats för totalt 70 128 timmar under åttaårsperioden. De röda cirkelarna i figuren indikerar överbelastning (strömmen överstiger den deterministiska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



Figur 8. Relationen mellan sannolikhet för överbelastning och marginalen mellan ledningens belastning och den uppskattade 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.

Konsekvenserna av användning av en sådan fast marginal visas i Figur 9. Den vertikala svarta linjen är 15-% sannolikhetsgränsen. Om vi antar att sannolikheten för bristande funktion inte får överskrida 15 % ska åtgärder tas för alla punkter till höger om den vertikala linjen (område 3 och område 4). Den horisontala svarta linjen är 400-A strömgränsen. Använder vi en fast marginal under den deterministiska belastningsförmågan kommer det att vidtas åtgärder för varje timme då strömmen är över den horisontala linjen (område 2 och område 3).



Figur 9. Deterministiska marginaler för att garantera en viss sannolikhet.

De två svarta linjerna delar upp planet i fyra områden, angivna i figuren:

- Det vidtas inga åtgärder i område 1, och det behövs inga åtgärder, så skyddet uppför sig korrekt.
- I område 2 vidtas det åtgärder, men de behövs inte, det är oönskad funktion.
- Område 3 innehåller korrekt funktion av skyddet.
- Det finns inga punkter i område 4, det är så som gränserna bestämdes, men skulle det finnas punkter där, då skulle det vara bristande funktion⁶.

Att ta en sådan marginal skulle garantera en låg sannolikhet för överbelastning (hög pålitlighet av skyddet), men samtidigt en hög sannolikhet för oönskad åtgärder som nedstyrning av förbrukning (fortfarande en låg säkerhet på oönskad funktion). En marginal, utöver resultatet av den deterministiska dynamiska belastningsförmågan, skulle sannolikt inte ge mycket extra utrymme jämfört med den statiska belastningsförmågan.

⁶ Här skulle man kunna göra en avvägning mellan oönskad funktion (område 2) och bristande funktion (område 4) och på så sätt komma fram till en "optimal inställning". Den stokastiska metoden, som introduceras i nästa kapitel, har dock bättre möjligheter.

7 Stokastisk dynamisk belastningsförmåga

7.1 BASPRINCIPEN

Det visades i förra kapitlet, Figur 8 och Figur 9, att sannolikheten för överbelastning varierar mycket samtidigt som det inte finns en tydlig korrelation mellan denna sannolikhet och skillnaden mellan ledningsströmmen och belastningsförmågan beräknad från väderparametrar.

Från detta har vi dragit slutsatsen att det behövs något alternativ till fasta marginaler för att kunna bedöma när det behövs åtgärder för att förebygga överbelastning. Alternativet som behandlas i detta kapitel använder sannolikheten för överbelastning direkt för att bedöma när det behövs åtgärder.

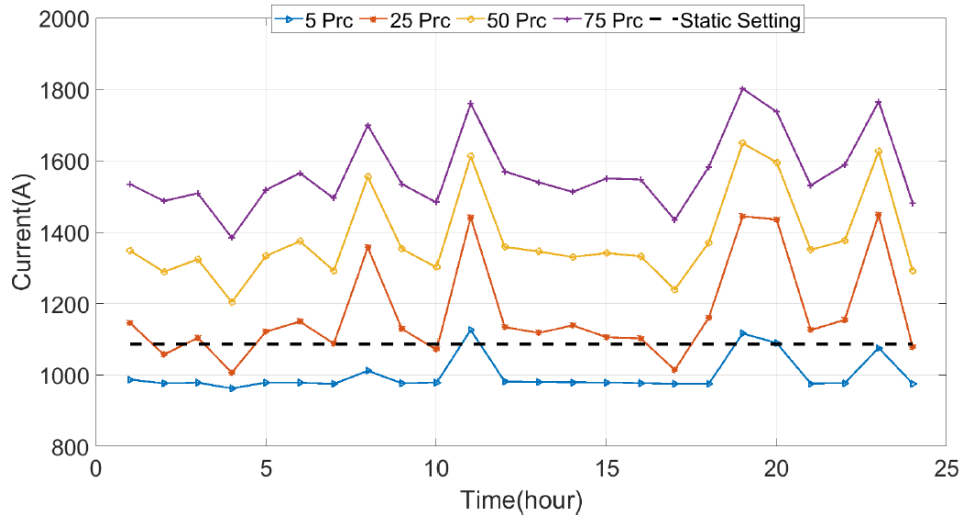
Sammanfattningsvis kan alternativet beskrivas enligt följande, i förhållande till andra befintliga eller föreslagna metoder för överbelastningsskydd. Majoriteten av metoderna beräknar den (statiska eller momentana) belastningsförmågan eller ledartemperaturen. Åtgärder vidtas när ledningsströmmen kommer för nära eller överstiger den momentana överbelastningsförmågan under alltför lång tid eller när ledartemperaturen (uppmätt eller beräknad) överstiger ett visst tröskelvärde. Alternativet som presenteras här betraktar (beräknad eller förutsagd) belastningsförmåga av ledningen som en slumpmässig variabel. Från den uppmätta eller förutsagda strömmen och sannolikhetsfördelningen för belastningsförmågan beräknas sannolikheten att ledningen är eller kommer att överbelastas. Ett beslut om behovet av att vidta åtgärder bygger på denna sannolikhet.

7.2 PERCENTILERNA UNDER EN 24-TIMMARS PERIOD

Sannolikhetsfördelningen har beräknats, som nämndes förut, för varje timme baserat på uppmätta väderparametrar i Belasteå. Resultat för ett dygn, under vintern 2018, visas i Figur 10. Fyra percentiler visas där (5e, 25e, 50e och 75e) samt det statiska värdet. Vid överbelastningsskydd baserat på stokastisk belastningsförmåga är det dessa percentiler som blir tröskelvärden då åtgärder mot överbelastning tas. Som vi har nämnt förut kan det vara bortkoppling av ledningen, nedstyrning av förbrukning, men också till exempel start av en produktionsenhet för att minska strömmen genom ledningen.

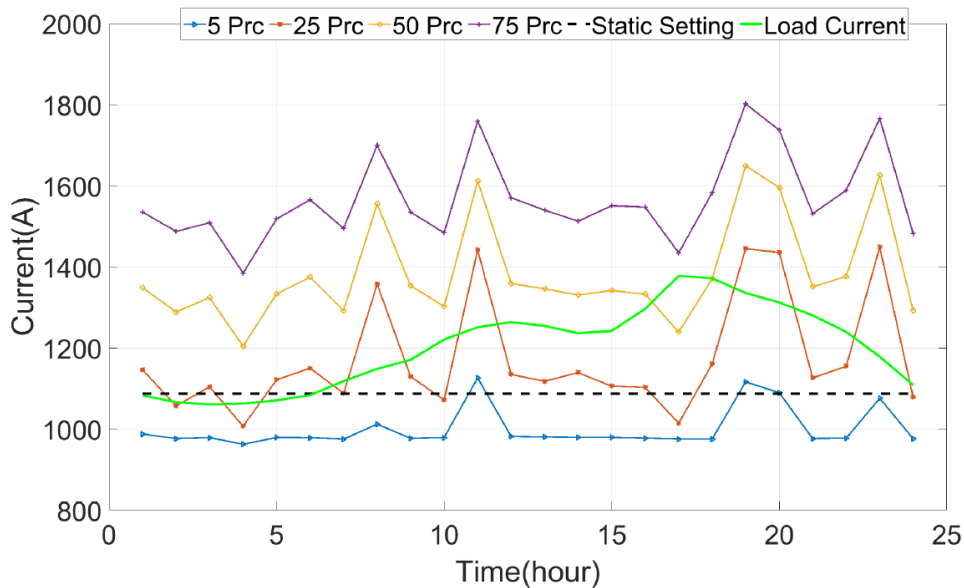
Det visas att valet av tröskelvärde (val av percentil i figuren) har en stor påverkan på hur stor ström som tillåts flyta genom ledningarna. Sett från kraftsystemets perspektiv finns det en stark koppling mellan vilken risk för överbelastning som accepteras och när det behövs vidtas åtgärder. Något som är speciellt viktigt att påpeka är att en låg acceptabel risk, som 5 % i detta exempel, skulle betyda att det tillåts mindre ström genom ledningen än när det statiska gränsvärdet används. Här ska det även beaktas att det var begränsade osäkerheter i väderparametrar som antogs för att beräkna sannolikhetsfördelningen. Ju större osäkerheter det finns ju mindre ström kommer att tillåtas genom ledningen, när det finns låg acceptans för överbelastning. Mindre osäkerheter, till exempel genom bättre

prognosmetoder, gör att det kommer att tillåtas högre ström genom ledningen, vid samma acceptans för överbelastning.



Figur 10. Variation och olika percentiler för stokastisk dynamisk belastningsförmågan under en vinterdag i 2018, utgående från vädret i Belasteå.

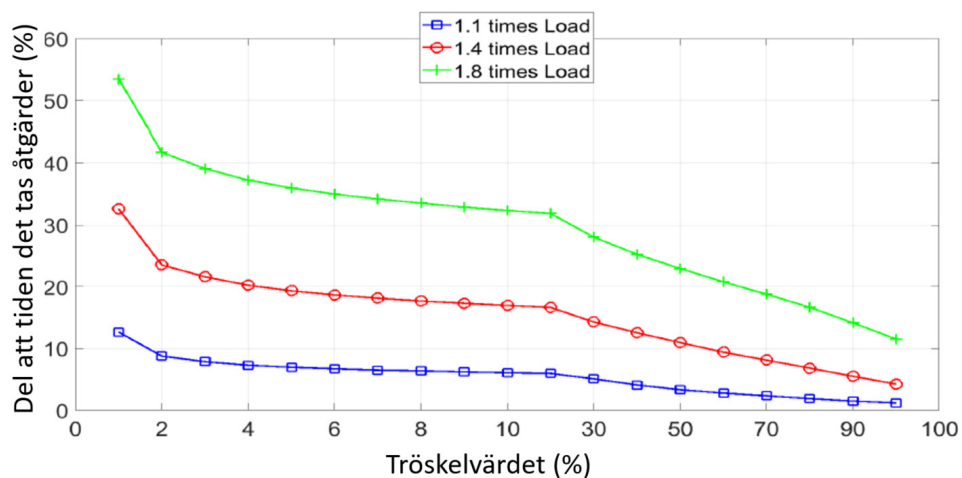
Samma vinterdag 2018 som i Figur 10 har använts för att jämföra strömmen genom ledningen med de olika tröskelvärdena. Resultat visas i Figur 11, där den gröna kurvan anger strömmen genom ledningen. Hur ofta det kommer att vidtas åtgärder beror mycket på acceptansen för överbelastning: vid 5 % som gräns, då behövs det åtgärder hela dagen; vid 25 % en stor del av dagen; vid 50 % bara under en timme; och vid 75 % behövs det inga åtgärder alls.



Figur 11. Jämförelse av strömmen (gröna kurvan) med olika percentiler för stokastisk dynamisk belastningsförmåga (under samma vinterdag som figuren innan).

7.3 HUR OFTA BEHÖVS DET VIDTAS ÅTGÄRDER

Det nämndes i förra avsnittet att valet av tröskelvärde (hur stor sannolikheten för överbelastning får vara) har en stor påverkan på när det kommer att vidtas åtgärder. För att kvantifiera detta har det beräknats hur ofta åtgärder skulle komma att vidtas för olika tröskelvärden. En del av resultaten visas i Figur 12. Det som har beräknats är hur ofta under åttaårsperioden som sannolikheten att ledningen är överbelastad överstiger ett visst tröskelvärde. 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.)



Figur 12. Andel av tiden det kommer att vidtas åtgärder mot överbelastning som funktion av tröskelvärdet i sannolikhet för överbelastning då det tas åtgärder; för tre olika belastningsnivåer av Belasteå under åttaårsperioden.

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 dock 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.

Resultaten presenteras på ett annorlunda sätt i Tabell 1, där det visas hur en ökning av stadens förbrukning kommer att kräva åtgärder oftare, oberoende av vilket tröskelvärde som används. Valet av tröskelvärde har dock, även här, en stor påverkan på hur ofta åtgärder kommer att vidtas.

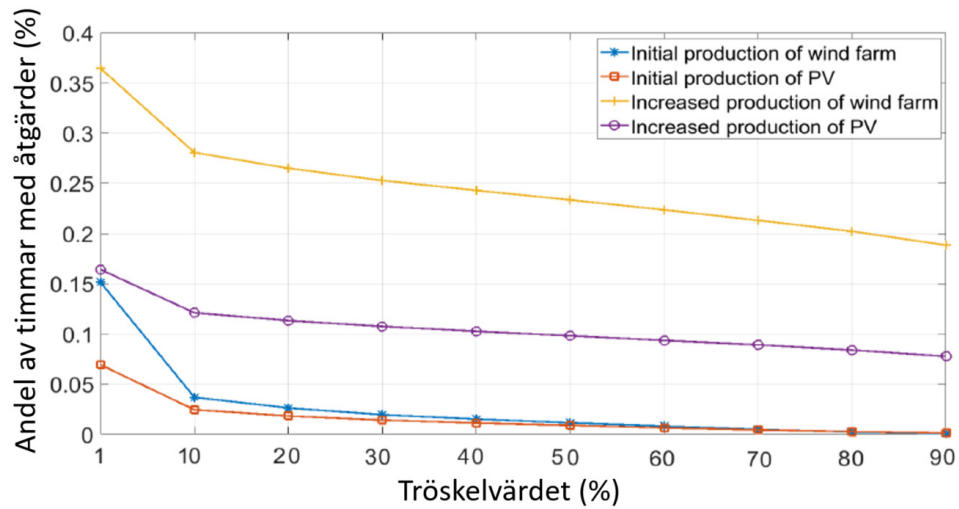
Tabell 1. Antalet timmar per år då det kommer att vidtas åtgärder, vid ökad förbrukning, för olika tröskelvärden av överbelastningsskydd. "SLR" står för statisk belastningsförmåga; "DLR" står för dynamisk belastningsförmåga då det inte tas med någon osäkerhet i väderparametrar; sista tre raderna refererar till olika sannolikhet för överbelastning som gränsvärde.

Overload \ Loads	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.8	2.0
<i>SLR(h/yr)</i>	724	1248	1814	2385	2925	3420	4590	5143
<i>DLR(h/yr)</i>	87	191	333	499	676	890	1626	2159
<i>DLR – 1%(h/yr)</i>	502	1108	1625	2193	2857	3279	4687	5383
<i>DLR – 5%(h/yr)</i>	263	609	902	1258	1693	1993	3153	3727
<i>DLR – 20%(h/yr)</i>	227	521	767	1069	1458	1708	2790	3331

På samma sätt som det bara kan accepteras en viss risk för överbelastning, kommer det också finnas ett gränsvärde för hur ofta åtgärder som nedstyrning av förbrukning (till exempel laddning av elbilar eller elintensiva experiment på universitet) kommer att accepteras av samhället. Acceptansgränsmetoden, som utvecklades för distribuerad generering, kan också användas här för att bedöma vid vilken ökning av förbrukningen som åtgärder såsom nedstyrning av förbrukning inte längre räcker till. Det är då som det behövs investering i nya ledningar, kablar, transformatorer, stationer, osv. Målet med kraftsystemet är att se till att det finns el tillgängligt, vilket innebär att en begränsning av förbrukningen inte ses som en lösning.

En liknande studie utfördes för integrering av vindkraft och solkraft. För vindkraft har underlaget utgått från mätningar av produktion från en befintlig 45 MW vindpark. För solkraft har produktionen genererats från satellitdata med hjälp av Renewables Ninja [4]. Resultaten visas i Figur 13. Två olika nivåer av produktion har antagits här. För basfallet blir behovet av åtgärder lågt när en risk av 10 % eller högre accepterats. Vid större anläggningar ökar behovet av åtgärder för alla nivåer av acceptabel risk. På samma sätt som förut har det antagits att ökning av produktionen är lika (i procent) för årets alla timmar. Det är ett rimligt antagande för vind- och solkraft. Det ska också påpekas att andelen timmar då det kommer att vidtas åtgärder är betydligt mindre (under 1 %) i detta exempel än i exemplet

om förbrukning. Samma resonemang vad gäller acceptansgränsmetoden gäller dock här också.



Figur 13. Andel av tiden då det kommer att tas åtgärder mot överbelastning som funktion av tröskelvärdet, för vind och solkraft nära Belasteå.

8 Diskussion, rekommendationer

Detta kapitel innehåller och del diskussioner baserat på material i de tidigare kapitlen. Vi har försökt att hålla även detta kapitel så objektivt som möjligt, men det kommer ändå att finnas en del av våra personliga synpunkter med.

8.1 TILLÄMPNINGAR

Det finns några möjliga tillämpningar av dynamisk belastningsförmåga för svenska elnätsföretag, som kommer från detta forskningsprojekt. Möjliga tillämpningar för integrering av stora vindkraftsanläggningar har diskuterats av flera förut. Det som har diskuterats betydligt mindre, sannolikt för att det är begränsat till Sverige och ett fåtal andra länder, är att dynamisk belastningsförmåga kan användas för att öka den tillåtna förbrukningen under kalla dagar. Det är speciellt relevant för Sverige eftersom den högsta förbrukningen finns under kalla vinterdagar, då det finns ett märkbart utrymme för att kunna öka belastningsförmågan. En av de förväntade ytterligare ökningarna av förbrukningen är för laddning av elbilar. Elbilars förbrukning är temperaturberoende så att årets högsta förbrukning från elbilsaddning kan förväntas i samma period då resten av förbrukningen också är som högst.

En möjlig tillämpning i praktiken är att kontinuerligt göra en bedömning av den momentana överföringsförmågan av ledningen (från prognoser eller mätning av vädret) vilken används i kontrollrummet för att bedöma om det behövs åtgärder eller inte. På detta sätt kan, till exempel, antalet gånger en flexibilitetsmarknad ska aktiveras minskas eller även hållas till noll.

En annan tillämpning är att beräkna månadsvärden på ledningens överföringsförmåga, till exempel från åtta år av väderdata, som det gjordes i denna rapport.

Tillämpningen av den stokastiska metoden, som är främsta bidraget av forskningsprojektet, finns i driftplanering, i överbelastningsskydd, och i drift av nätet. I driftplanering kan det göras en beräkning av sannolikheten för överbelastning för ledningen och om sannolikheten anses vara för stor, då kan det tas förebyggande åtgärder, som motköp, nedstyrning, flexibilitetsmarknader, eller i värsta fall roterande bortkopplingar. Under varje drifttimme kan sannolikheten för överbelastning beräknas från uppmätta väderparametrar och även här kan det tas beslut i kontrollrummet om möjliga åtgärder. Till slut kan ett reläskydd koppla bort last eller produktion ifall sannolikheten för överbelastning blir för hög. Här behövs givetvis koordinering mellan de olika åtgärderna.

8.2 VAL AV TRÖSKELVÄRDE

Hur mycket effekt som kan överföras på en luftledning innan det vidtas åtgärder är starkt beroende av vilken risk som anses vara acceptabel. Det gäller inte bara för stokastiska utan också för deterministiska metoder samt för statisk belastningsförmåga. Vid deterministiska metoder är det däremot betydligt mindre

tydligt vad risken egentligen är. Det gör det svårare att göra en avvägning mellan riskerna och konsekvenserna.

Hur stor risk som kan accepteras beror helt på vad konsekvenserna av överbelastningen är. Gäller det regelverket som inte tillåter att avståndet till marken kommer under ett visst värde, då kan det bara accepteras en liten risk. Är det dock så att regelverket bara gäller dimensioneringskriterier, då blir det en annan fråga. Gäller det risk för glödning eller risk för ett jordfel, då är det en avvägning som elnätsföretaget får göra.

Det som också ska tas med i avvägningen är vad konsekvenserna blir av att utföra åtgärder. Gäller det att tillfälligt starta en dyr produktionsenhet för att minska belastningen ("motköp"), då är det en kostnadsfråga för nätoperatören. Gäller det flexibilitetsmarknader, då blir det marknadspriset och kundens villighet att ställa upp som ska tas med i bedömningen. Gäller det nedstyrning av förbrukning, till exempel i form av fränkopplingsbara tariffer, då ska även acceptans på detta hos kunderna tas med.

Vid tillämpning av stokastiska metoder för överbelastningsskydd kan beslut om åtgärder tas automatiskt av reläskyddet för ledningen, men beslutet kan också tas av personal i kontrollrummet. Vi anser att lämplig tillämpning av metoden är att ha information i kontrollrummet om sannolikhet på överbelastning, under nuvarande drift, eller på sannolikheten att driftsäkerhetskraven inte uppfylls⁷. På sådant sätt kan personal i kontrollrummet göra ovannämnda avvägningar.

8.3 OSÄKERHETER I BELASTNINGSFÖRMÅGAN

I denna rapport har vi antagit en viss osäkerhet i väderparametrar för att illustrera konceptet med en sannolikhetsfördelning av ledningens belastningsförmåga. Det har inte gjorts några känslighetsstudier, men även utan dessa är det rimligt att anta att resultaten kommer att bero mycket på osäkerheterna. Det som antogs i rapporten var en representation av osäkerhet i väderprognosen eller i mätningarna. Vi gjorde ingen skillnad mellan användning av metoden dagen innan, några timmar i förväg, eller under drift. Det är dock tydligt att helt andra osäkerheter spelar roll. Framtida studier behövs för att få riktvärden om vilka osäkerheter i väderparametrar som ska tas med i studier. Osäkerhet i väderprognoser är något som drabbar oss alla, framförallt prognosen dagen innan, så det finns säkert en hel del information om detta. Information om osäkerheterna några timmar i förväg finns också, men den är kanske mindre tillgänglig.

Det som delvis saknas är information om osäkerheterna i vädermätningar vid ledningen. Temperatur, vindhastighet, solinstrålning och vindriktning kan variera en hel del längs ledningen. Det är denna osäkerhet som ska tas med i sannolikhetsfördelningen om metoden används under drift (dvs som överbelastningsskydd).

Det som inte heller har tagits med i rapporten är osäkerheter i emissions- och absorptionskoefficient. Faktiska värden är faktiskt inte så väl kända i verkligheten och de kan variera en hel del längs ledningen. Absorptionskoefficienten gäller för

⁷ (N-1)-kriteriet, som säger att bortfall av en ledning inte ska leda till ett elavbrott.

den synliga delen av spektrumet och en inspektion längs ledningen skulle kunna ge en ganska bra uppskattning. För emissionen är det dock strålning i den infraröda delen av spektrumet som är relevant, och då är det inte så enkelt att göra en uppskattning. Osäkerheterna i dessa koefficienter ska tas med också vid beräkning av sannolikhetsfördelningen.

Här ska det påpekas att ingen av ovannämnda tillämpningar kräver investeringar i nätet, med möjligt undantag av vädermätningar i närheten av ledningen. Genom att göra mätningar av ledartemperaturen (direkt eller indirekt) kan osäkerheterna minskas och en högre ström kan därför tillåtas innan det behövs vidta åtgärder.

8.4 JÄMFÖRELSE AV PROGNOSEMETODER

Det finns olika metoder i litteraturen för att förutse ledningens belastningsförmåga. Den stokastiska metoden i denna rapport kan användas för att jämföra metoderna. Det som i slutändan är viktigt, och det som prognosmetoderna ska jämföras på, är hur mycket högre ström genom ledningen som kan tillåtas utan att sannolikheten för överbelastning ökar.

8.5 MÄTNING AV LEDARTEMPERATUREN

En del metoder för dynamisk belastningsförmåga använder mätningar av ledartemperaturen som input. Genom att jämföra den uppmätta temperaturen med den högst tillåtna temperaturen behövs det inte någon beräkning av belastningsförmågan. Sådana metoder har därmed tydliga fördelar, men det finns en del nackdelar och begränsningar också.

Mätning av ledartemperaturen vid en luftledning på högspänning är fortfarande en teknisk utmaning. Det finns en del osäkerheter och möjliga fel i mätningen och det kan bli avbrott i kommunikationslänken. Vid flera år av erfarenhet kommer systemet säkert att få en högre tillförlitlighet i framtiden.

Ledartemperaturen kan variera längs ledningen, på grund av variationer i väderparametrar, så det behövs mätningar vid flera punkter.

Mätning av ledartemperatur kan användas under drift, men under driftplanering finns möjligheten inte. Sådant behövs till exempel dagen innan för att bedöma om ledningens överföringsförmåga begränsar marknader. Då är det bara väderprognoser som kan användas.

En annan anledning att man inte kan förlita sig enbart på mätning av ledartemperaturen är (N-1)-kriteriet. Under driften behövs det information om driftsäkerheten: kommer ledningen att bli överbelastad om en annan ledning kopplas bort? För att kunna göra en sådan bedömning behövs det ett värde på ledningens belastningsförmåga, som då kräver en beräkning.

Det finns en metod, nämnd i litteraturen, då man delvis kan kringgå detta. Från den uppmätta ledartemperaturen, omgivningstemperaturen från vädertjänsten eller från egna mätningar, och strömmen genom ledningen, beräknas det en ekvivalent vindhastighet. Det är den vindhastighet som skulle ge ledartemperaturen för denna ström och denna omgivningstemperatur. Den

ekvivalenta vindhastigheten kan då användas för att beräkna ledningens belastningsförmåga. Även här kan det tas med osäkerheter för att få en sannolikhetsfördelning för belastningsförmågan. Till slut blir det samma stokastiska metod, dock med en (förhoppningsvis) lägre osäkerhet.

8.6 TILLÄMPNING PÅ KABLAR OCH TRANSFORMATORER

Den stokastiska metoden som introduceras för luftledningarna i rapporten kan också tillämpas på kablar och transformatorer. Det finns en del skillnader i väderpåverkan och osäkerheterna, men grundprinciperna är likadana.

Den stora skillnaden är dock att konsekvenserna av överbelastning är annorlunda än för luftledningarna. Överbelastning av kablar och transformatorer leder till en accelererad åldring i isolationen; risken för ett isolationsfel ökar varje gång det blir en överbelastning. Det betyder att konsekvenserna av överbelastning är irreversibla, men också att en mindre överbelastning då och då kan tillåtas. Det gör avvägningen mer komplicerad då historien måste beaktas, men det möjliggör också att avvägningen kan göras helt på ekonomiska grunder, eftersom åldring kan översättas i en minskning av komponentens värde.

8.7 VID FORTSATT ÖKNING AV FÖRBRUKNING

När förbrukningen av, till exempel, en stad fortsätter att öka då kommer det alltid att finnas en punkt då åtgärder måste tas. Klassiska åtgärder är då att investera i mer primär infrastruktur (ledningarna, kablar, transformatorer, stationer). Med hjälp av moderna tekniker (mätsystem, kommunikation, kontroll) går det att tillfälligt begränsa strömmen genom ledningen för att förbygga överbelastning. Det kan vara genom nedstyrning av vissa kunder som det finns ett avtal med i förväg, genom flexibilitetsmarknader, eller i värsta fall genom roterande bortkopplingar.

Genom att använda dynamisk belastningsförmåga, deterministisk eller stokastisk, går det att tillåta en högre tillväxt i förbrukning innan det behövs åtgärder. Genom moderna tekniker går det även att tillåta en högre tillväxt genom att minska förbrukningen vissa timmar om året. Men även här finns det gränser i vilken tillväxt som kan tillåtas. Till slut behövs det ny primär infrastruktur.

Acceptansgränsmetoden, som utvecklades för distribuerad generering, kan också här tillämpas för att bedöma när det är dags att börja investera i ny primär infrastruktur.

9 Slutsatser

Dynamisk belastningsförmåga har studerats förut och det pågår en hel del forskning kring detta. Det som dock får begränsat med uppmärksamhet är den dynamiska belastningsförmågans roll i överbelastningsskydd, dess olika osäkerheter och tillförlitlighet. Det är dessa aspekter som var utgångspunkter för studien som presenteras i denna rapport.

Det visas att det finns en stor potential för dynamisk belastningsförmåga under vintermånaderna i Sverige, precis när det behövs mer överföringsförmåga. Det möjliggör bland annat en större integrering av elbilsladdning i elnätet.

En metod för dynamisk belastningsförmåga i kombination med överbelastningsskydd har introducerats; sannolikheten att ledningen är överbelastad är kriteriet för att bedöma om det behövs åtgärder för att förebygga överbelastning. Denna stokastiska metod kan användas under driftplanering (till exempel dagen innan), under driften (till exempel för att bedöma driftsäkerheten) och som en skyddsåtgärd (i fall ingen av de förebyggande åtgärderna hjälper).

Det finns en del möjliga tillämpningar av dynamisk belastningsförmåga i Sverige, både med och utan att det tas med stokastiska aspekter. En del framtida forskningsinriktningar är: att utveckla metoder för att, i kontrollrummet, avväga mellan pålitlighet och säkerhet; att ta med ytterligare osäkerheter i sannolikhetsfördelningen för belastningsförmågan; osäkerheter vid metoder baserade på mätning av ledartemperaturen; tillämpning på kablar och transformatorer; samt acceptansgränsmetoder för att bedöma hur länge man kan skjuta upp byggandet av nya ledningar, stationer, osv.

10 Referenser

- [1] Fatemeh Hajeforsh, Dynamic line rating analysis in transmission lines: protection application, Luleå University of Technology, Electric Power Engineering, half-way report, 10 November 2020.
- [2] Seyede Fatemeh Hajeforosh, Math Bollen, Lars Abrahamsson, Dynamic line rating operational planning: issues and challenges, 25th International Conference on Electricity Distribution, June 2019, Madrid.
- [3] SeyedeFatemeh Hajeforosh, Math Bollen, Transmission line overloading analysis using probabilistic dynamic line rating, 2020 International Conference on Probabilistic Mtehods Applied to Electric Power Systems.
- [4] Stefan Pfenninger, Iain Staell, , Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data," *Energy*, Vol. 114, pp. 1251-1265, 2016.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] B.M.Weedy, "Dynamic current rating of overhead lines," *Electric Power Systems Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 11-15, 1989.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] D. O. Koval and R. Billinton, "Determination of Transmission Line Ampacities by Probability and Numerical Methods," in *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 7, pp. 1485-1492, 1970.
- [17] V. T. Morgan, "Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of overhead conductors," in *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 345-352, 1996.
- [18] V. T. Morgan, "The Loss of Tensile Strength of Hard-Drawn Conductors by Annealing in Service," in *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 700-709, 1979.
- [19] F. Jakl and A. Jakl, "Effect of elevated temperatures on mechanical properties of overhead conductors under steady state and short-circuit conditions," in *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 242-246, 2000.
- [20] Bonniers Uppslagsbok, 2007.
- [21] IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors, IEEE Std. 738-1993.
- [22] Guide for thermal rating of calculations of overhead lines, CIGRE TB 601, 2014.
- [23] Math Bollen, Mats Häger, "Power quality: interactions between distributed energy resources, the grid, and other customers," Leonardo Energy (2005).
- [24] EN 60050, International Electrotechnical Vocabulary, www.electropedia.org

Sökord

Dynamisk belastningsförmåga, luftledningar, överbelastningsskydd, tillförlitlighet.

DYNAMISK BELASTNINGSFÖRMÅGA AV LUFTLEDNINGAR

Genom att anpassa belastningsförmågan av komponenter i elnätet till rådande väderförhållanden kan nätet utnyttjas i en betydligt högre grad. Det gäller framförallt i Sverige, då den högsta elförbrukningen sker under kalla vinterdagar.

Dynamisk belastningsförmåga för luftledningar kombineras i rapporten med kunskaper om överbelastningsskydd och tillförlitlighetsberäkningar. Sannolikheten för att en ledning är överbelastad eller kommer att bli överbelastad används som ett kriterium för att bedöma om åtgärder krävs för att förebygga överbelastning eller minskad driftsäkerhet.

Resultaten visar att den här metoden kan användas för att öka mängden elektrisk energi som kan överföras, utan att tillförligheten minskar för kunderna och utan investeringar i elnätet.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se