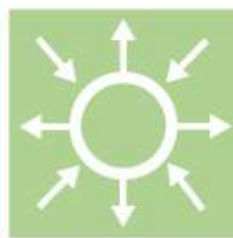




Risikanalysbaserat ramverk för projektplanering och underhållsoptimering

Elforsk rapport 13:46



Carl Johan Wallnerström

December 2012

ELFORSK

Risikanalysbaserat ramverk för projektplanering och underhållsoptimering

Elforsk rapport 13:46

Förord

Denna rapport är framtagen av programmet "Riskanalys II" som drivs av Elforsk. Programmets programstyrelse består av följande ledamöter:

Horst Blüchert, Elsäkerhetsverket;
Eva Sundin, Vattenfall Eldistribution AB;
Ola Ivarsson, E.ON Elnät Sverige AB;
Kjell Oberger, Fortum Distribution AB;
Håkan Jarer, Svenska Kraftnät;
Jenny Paulinder, Göteborg Energi AB;
Pär Erik Petrusson, Jämtkraft AB;
Sven-Åke Polfjärd, Föreningen Industriell Elteknik;
Remy Kollessar, Energimarknadsinspektionen;
Susanne Olausson, Elforsk AB.

Finansiärer i programmet är:

Vattenfall Eldistribution AB;	Skellefteå Kraft Elnät AB;
Elsäkerhetsverket;	Umeå Energi Elnät AB;
E.ON Elnät Sverige AB;	Jönköping Energi Nät AB;
Fortum Distribution AB;	C4 Elnät AB;
Svenska Kraftnät;	Öresundskraft AB;
Göteborg Energi AB;	Gävle Energi AB;
Jämtkraft AB;	Sundsvall Energi Elnät AB;
Borås Elnät AB;	AB Borlänge Energi.
Föreningen Industriell Elteknik;	

Projektet "Riskanalysbaserat ramverk för projektplanering och underhållsoptimering" har utförts av postdoktoral forskare på deltid (25-50 %) mellan november 2011 och november 2012, på Kungliga Tekniska högskolan, Skolan för Elektro- och Systemteknik, avdelningen Elektroteknisk teori och konstruktion (avdelningschef professor Rajeev Thottappillil), forskargruppen RCAM (ledd av doktor Patrik Hilber). Omräknat till heltid motsvarar det 4 månaders arbete. Utförare är doktor Carl Johan Wallnerström

Tidigare har Elforsk riskanalysprogram finansierat doktorandstudier utförda av undertecknad med titeln "Risks related to the introduction of reliability-centered asset management (RCAM) for electrical distribution systems and the effect of regulatory models", resulterat i avhandlingen "On Incentives affecting Risk and Asset Management of Power Distribution". Riskanalys är ett av forskargruppen RCAMs kärnområden och detta projekts finansiering har dels givit möjlighet till att utveckla idéer från avslutat doktorandprojekt, dels möjliggjort bidrag till fortsatt fokus på riskanalys inom forskargruppen.

Jag vill framförallt tacka doktor Patrik Hilber och Elforsk Riskanalysprogram med Susanne Olausson som programansvarig som möjliggjort detta projekt samt Sabina Stenberg (Svenska Kraftnät) vars examensarbete bidragit till många intressanta resultat som varit till stor nytta för projektet. Även Johanna Rosenlind, Olle Hansson (Fortum Distribution) och många andra.

Carl Johan Wallnerström, december 2012

Sammanfattning

Ett kortare (motsvarande 4 månader) postdoktoralt projekt inom ramen för Elforsk riskanalysprogram har utförts av forskargruppen RCAM vid Kungliga Tekniska högskolan. Huvudmålet är att vidareutveckla och dra nytta av resultat från avslutat doktorsprojekt för att ge kontinuitet inom forskningsområdet. Denna rapport inkluderar en introduktion till ämnet, en svensk översättning av riskanalysbaserat ramverk för projektplanering och underhållsoptimering med tillhörande exempel (vilket även har publicerats som två engelska vetenskapliga artiklar), en kort sammanfattning av några övriga artiklar skrivna helt eller delvis under projektiden samt en avslutande del som inkluderar förslag på framtida forskning inom riskanalys.

I många länder, däribland Sverige, har kravet på att hitta en god balans mellan å ena sidan kostnadseffektivitet, å andra sidan god tillförlitlighet i eldistributionssystem ökat som en följd av kvalitetsregleringar, skärpta lagar samt politiskt och medialt tryck. För att möta dessa krav finns det ett behov av att utveckla och implementera mer avancerade analysmetoder. En svår utmaning är att utforma dessa så att de både ger tillfredställande resultat och samtidigt att de inte är för avancerade att implementera i verksamheten hos ett elnätsbolag. En vanlig ansats för att analysera kundavbrottsrisker i eldistributionsnät är tillförlitlighetsanalys. Traditionellt använder sådana analyser medelvärden och tar därmed inte hänsyn till hela spannet av konsekvenser (exempelvis kostnad för långa avbrott >12 timmar). I detta dokument föreslås ett analysramverk som kan inkludera fler konsekvenser och där komplexitetsnivå lätt kan anpassas till vad som är mest lämplig i varje specifikt fall. Två huvudmål är att beakta fler risker och att fördela resurser mer kostnadseffektivt.

Grundidén är att dela upp omfattande analyser i flera mindre delanalyser och sedan i ett sista steg sammanställa resultat. Föreslagna metoder kan användas fristående eller kombineras med tidigare föreslagna sårbarhetsmetoder. Uppdelningen i mindre analyser kan illustreras som en matris med olika systemtillstånd på ena axeln och olika resursallokeringsförslag på den andra. Föreslaget analysramverk exemplifieras i rapporten genom att det har implementerats på ett verkligt eldistributionssystem. Det visar sig att resursallokeringsalternativ (t.ex. investeringsförslag) som framstår som mest attraktiva om analys baseras på traditionella metoder, i själva verket har för hög risk när fler aspekter tas i beaktning. Det visar på risker med att använda medelvärden och styrkan i föreslagna metod. Dessutom har genomförd fallstudie visat att, redan för elnätsföretagen tillgänglig information, kan användas även för mer detaljerade analyser än vad som brukar användas idag.

Summary

A shorter (equivalent to 4 months full time) postdoctoral project, supported by Elforsk, has been conducted by the research group RCAM, at the Royal Institute of Technology (KTH). The main objective is to develop and benefit from results of a completed doctoral project to provide continuity in the research. This report includes an introduction to the subject, a Swedish translation of a proposed risk analysis based framework for cost-effective resource allocation applied to power distribution systems including an example (also published as two English scientific papers), a brief Swedish summary of some other papers and a closure part which includes proposals for future research.

There is an international tendency toward increased demand for both cost-efficiency and high reliability of power distribution systems. To meet these demands, asset management methods, including reliability analyses, have been developed. These reliability analyses often utilize only mean values and hence do not take into consideration the consequences of severe events. This report proposes an analysis framework. The aim is to identify more risk categories, to allocate resources more cost-effectively and to be possible to adjust the level of complexity to be suitable to use within the organization of distribution system operators. The suggested framework is exemplified and evaluated by implementing it within the analyses of a real power distribution system.

The main concept is to divide comprehensive projects into minor analyses and then, in a final step, compile the results. The proposed analysis framework can be used independently or combined with earlier proposed vulnerability methods. The latter provides a two-dimensional analysis framework. It is shown that totally different investment alternatives could be preferred depending on whether a traditional analysis method using average values is employed compared with the proposed analysis framework, which also considers severe system states. This demonstrates the risks involved in using average values and the strength of the proposed method. Furthermore, it is shown that already available information can be used for improved asset management decision support.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	RCAM	3
1.3	För- och nackdelar av olika detaljnivå på indata	3
1.4	Mål och avgränsningar	4
1.5	Resultat	4
2	Beskrivning av riskanalysbaserat ramverk	5
2.1	Analysramverk för mer kostnadseffektiv resursallokering	5
2.1.1	Introduktion	5
2.1.2	Övergripande koncept	5
2.1.3	Förslag på användningsområden	6
2.1.4	Föreslagit analysramverk – översikt	7
2.2	Sammanfattning av sårbarhetsanalysmetod	7
2.2.1	Metodöversikt	7
2.2.2	Metodsteg	8
2.2.3	Systemtillståndskategorier:	8
2.3	Analysmetod för jämförelse mellan olika investeringsscenarioer	8
2.3.1	Metodsteg	8
2.3.2	Förslag på generell ekonomisk analys	8
2.3.3	Råd vid val av riskanalysmetod(er)	9
2.3.4	Övriga viktiga frågeställningar som bör beaktas	9
3	Utvärdering och exempel	10
3.1	Fallstudie – utvärdering av sårbarhetsanalysmetod	10
3.2	Exempel på användning av analysramverk	13
3.2.1	Beskrivning av analyserat system	13
3.2.2	Definiera systemtillstånd	14
3.2.3	Investeringsförslag	14
3.2.4	Ekonomiska antaganden	14
3.2.5	Val av riskanalysmetoder	15
3.2.6	Indata och antaganden	18
3.2.7	Genomförda analyser med riskanalysbaserat ramverk	19
3.2.8	Föreslagen åtgärd baserat på analysresultat	22
4	Svensk sammanfattning av artiklar skrivna under projektperioden	23
4.1	Färdigskrivna januari-september 2012	23
4.2	Artiklar som skall presenteras på Cired 2013	24
5	Avslutning	26
5.1	Slutsatser – ett riskanalysbaserat ramverk	26
5.2	Förslag på fortsatt forskning inom riskanalys	26
5.2.1	Risker och möjligheter med Dynamic Rating	26
5.2.2	Resursmodell som funktion av tid	27
5.2.3	Hitta en god balans mellan kostnad och tillförlitlighet	27
5.2.4	Ny RCAM-doktorand finansierad av Elforsk Riskanalysprogram ..	27
6	Referenser	28

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Distribution av elektricitet är att betrakta som ett naturligt monopol och är med stor sannolikhet det moderna samhällets viktigaste infrastruktur. För att möta pågående klimatutmaningar kommer en tillförlitlig infrastruktur av god elförsörjning förmodligen spela en ännu viktigare roll i framtiden. Dessutom finns det en internationell trend mot ökade krav på kostnadseffektivitet till följd av nya incitament från kvalitetsreglering av nättariffer [1], [2]. Därför måste det finnas en god balans mellan målen att å ena sidan ha hög tillförlitligheten och å andra sidan vara kostnadseffektiv [3], något som motiverar införandet av mer omfattande analysmetoder såsom riskanalys. Det kan handla om att komplettera grova kvalitativa uppskattningar med kvantitativ analys under drift eller genomföra underhålls- och investeringsplanering baserat på mer avancerade analyser. Dessutom har nya myndighetskrav i vissa länder (t.ex. Storbritannien och Sverige) gjort det obligatoriskt att hantera konsekvenser av långa avbrott separat i risk- och sårbarhetsanalyser [4].

En viktig aspekt är att eldistribution har, jämfört med andra infrastrukturer, flera speciella egenskaper som måste beaktas vid t.ex. tillförlitlighetsanalys [5]-[10]. En annan utmaning är att det i Sverige finns ca 150 elnätbolag, vilka är av varierande storleksordning och med helt olika ägarstrukturer – vilket kan göra det svårt att ta fram analysmetoder lämpliga för alla [11].

De direkta ekonomiska konsekvenserna av den svenska lagstiftningen presenteras i Tabell 1 och illustreras i Figur 1. Exemplet visar att konsekvensen av ett avbrott av genomsnittlig avbrottlängd väsentligt kan avvika från genomsnittlig konsekvens av samtliga avbrott eftersom avbrottskostnad inte är linjärt beroende med avseende på avbrottstid [11].

Tabell 1 – konsekvens för elnätsbolag vid kundavbrott av olika längd

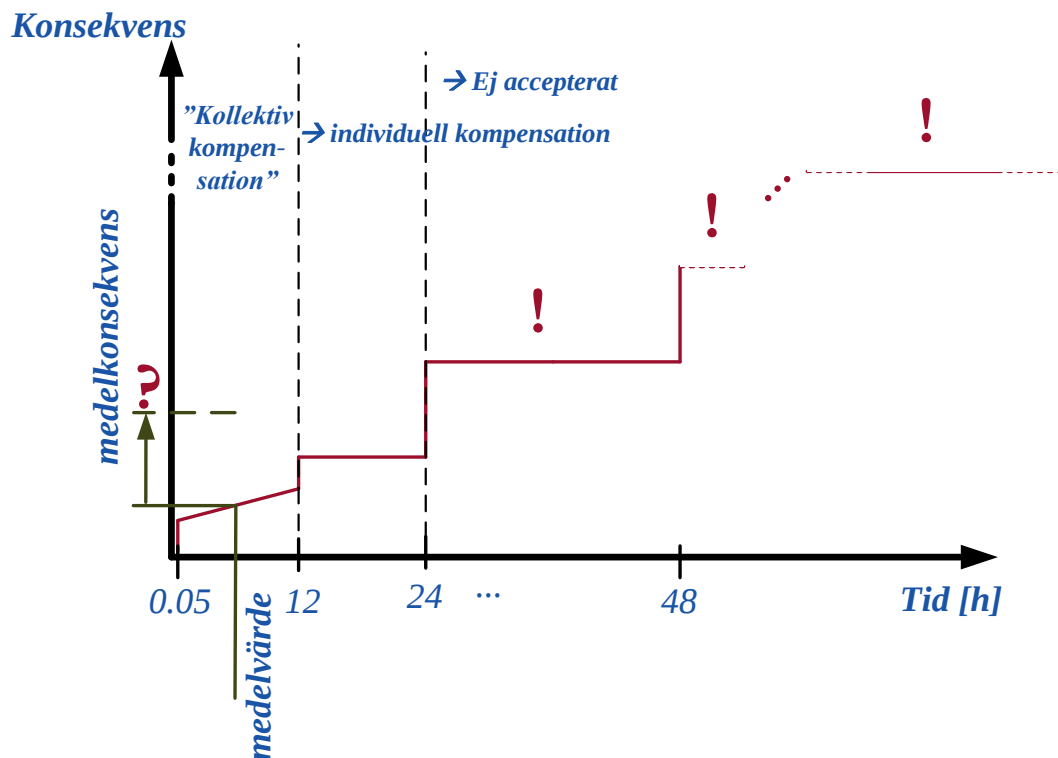
Avbrottslängd	Kundkompensation [SEK]	Minsta kundkompensation [SEK]¹
<0.05 timmar (3 minuter)	Numera obligatorisk inrapportering, möjlighet att integrera i framtida reglering	
0.05-12 timmar	Indata till nätreglering, kan påverka intäktsram (kollektivt påverka kundtariffer)	
12-24 timmar	12.5 % av α	2 % av β
24-48 timmar ²	37,5 % av α	4 % av β
Varje påbörjad 24-timmars-period ²	+ 25 % av α	+ 2 % av β
...	...	...
Max ²	300 % av α	-

α = Drabbade kunds årliga nättariff.

β = Prisbasbelopp (44 500 SEK år 2013)

¹Avrundas alltid upp till närmaste jämna 100-tal $\rightarrow$ 2 % β (= 890 SEK) avrundas till 900 SEK

²Potentiellt ytterligare konsekvenser på grund av funktionskrav från 2011, där avbrott >24 timmar inte accepteras

**Figur 1 – Ekonomisk konsekvens som funktion av kundavbrottstid**

1.2 RCAM

Tillförlitlighetsbaserad underhållsstyrning (RCM) är en systematisk kvalitativ underhållsplaneringsmetod, först framtagen av flygindustrin för att hantera balansen mellan höga säkerhetskrav och höga stilleståndskostnader vid underhåll [12]. Metoden har därefter även implementerats i andra branscher [13]. På KTH, Skolan för Elektro- och Systemteknik, har forskning pågått i drygt 10 år med att utveckla kvantitativa analysmetoder för elkraftsystem att använda vid projektplanering (t.ex. underhållsplanering) [14].

Den övergripande visionen går under namnet RCAM (Reliability Centered Asset Management), vilket även är namnet på forskargruppen. Visionen är att inspireras av RCM-metoden, men med tillägget att utveckla konceptet med mer avancerade kvantitativa analysmetoder [15]-[24]. Under september 2011 avslutades ett doktorandprojekt finansierat av Elforsks tidigare riskanalysprogram 2006-2010 [25]-[33] och från september 2012 pågår ett nytt doktorandprojekt inom RCAM finansierat av Elforsk Riskanalysprogram 2011-2015 [34].

1.3 För- och nackdelar av olika detaljnivå på indata

Tabell 2 – För- och nackdelar av olika detaljnivå på indata till riskanalys

Strategi	Fördelar	Nackdelar
1. Endast använda ett medelvärde	Enkelt att räkna på och lättillgänglig data; dessutom väletablerade metoder.	Tar inte alla tänkbara konsekvenser i beaktning, endast medelvärdets konsekvens.
2. Uppskatta statistisk fördelning baserat på ett medelvärde	Kan ta med alla konsekvenser och lättillgänglig data	Mer komplex än första strategin. Är inte med säkerhet en god modell av verkligheten
3. Dela upp i flera felkategorier	Relativt enkel, lätt att justera komplexitetsnivå beroende på syfte och tillgång till data. Tar hänsyn till fler konsekvenskategorier.	Mer arbete med datainsamling. Diskret modell, tar inte med hela spannet av konsekvenser.
4. Uppskatta en bättre matematisk fördelning	Ger resultat nära verkligheten.	Komplex och tidskrävande. Kräver mycket data.

I praktiken används främst medelvärden i analys, t.ex. när olika tillförlitlighetsindex såsom SAIDI och SAIFI beräknas. Fördelarna är framförallt att det är etablerade metoder som kräver relativt lite arbete. En konkret nackdel är att medelvärden inte tar hänsyn till hela spannet av potentiella konsekvenser, vilket har blivit allt mer aktuellt i och med införandet av kundavbrottsersättning för långa avbrott och funktionskravet

om 24 timmar. Tabell 2 illustrerar olika strategier och deras för- respektive nackdelar. Det riskanalysbaserade ramverk för projektplanering och underhållsoptimering som presenteras i denna rapport, bygger främst på strategi 2

1.4 Mål och avgränsningar

Inom ramen för tidigare riskanalysprojekt [35] identifierades två områden som extra intressanta från industrin. Detta projekt fokuserar på första punkten: *”Utveckling av metoder för investeringsoptimering med avseende på risk, tillförlitlighet, ekonomi och funktion.”*

Projektet har två huvudsakliga mål:

- Vidareutveckla och dra nytta av resultat från avslutat doktorsprojekt för att anpassa och ge kontinuitet till kommande doktorandprojekt med målsättningen att ge kortare uppstart och snabbare konkreta resultat.
- Sprida kunskap, både till branschen och till akademiska kretsar om kommande utmaningar och möjligheter för eldistributionsföretag samt bidra till konkreta förslag som kan komma branschen till del. Det inkluderar dels att visa på nytta av att redan nu implementera mer avancerade analysmetoder, dels vetenskapligt presentera mer avancerade metoder som kan vara framtida visioner för branschen.

1.5 Resultat

1. Färdigställa och skicka in artikel till vetenskaplig tidskrift som är en vidareutveckling av resultat som tidigare publicerats i [11]. Utfall: *artikel med titeln ”Cost-effective Resource Allocation applied to Power Distribution Systems”, är i skrivande stund inskickad till vetenskaplig tidskrift.*
2. Samverkan med examensarbetare [36] så att arbetet styrs mot att producera resultat relevanta för forskning och utveckling inom riskanalys. Utfall: *exempelvis baseras två artiklar skrivna till PMAPS 2012 till stora delar på resultat från examensarbetet (se avsnitt 4.1) och resultat från examensarbetet har varit input i exemplifierad fallstudie som presenteras i avsnitt 3.2.*
3. Slutrapport som ger en svensk sammanfattning av riskanalysbaserat ramverk (publicerade på engelska i två vetenskapliga artiklar – se punkt 1), kort sammanfattning av övrigt genomfört arbete och förslag på fortsatt arbete. Utfall: *denna rapport.*

Ursprungligen var målsättningen att producera resultat i samarbete med ny doktorand, men då start av doktorandprojekt blev kraftigt uppskjutet, har detta lagts till framtida arbete till förmån för punkt 1-3.

2 Beskrivning av riskanalysbaserat ramverk

2.1 Analysramverk för mer kostnadseffektiv resursallokering

2.1.1 Introduktion

Omvärldsanalys

Kvantitativa analysmetoder som använder tillförlitlighetindex för kostnadseffektiv resursallokering inom elkraft har tidigare föreslagits i akademiska tidskrifter [37] [38]. Dessutom finns det sedan tidigare tillförlitlighetsmodeller som delar in elkraftsystem i två eller tre väderkategorier [39] [40] [41]. Sårbarhetsanalys av elkraftsystem som använder riskbaserade metoder har publicerats tidigare, men dessa fokuserar ofta på transmissionsnivå [42] [43] [44] vars förutsättningar ur ett tillförlitlighetsperspektiv är signifikant annorlunda jämfört med lägre spänningsnivåer. Det finns kvantitativa tillförlitlighetsmetoder för att prioritera underhållsåtgärder i elkraftsystem, t.ex. [45] [40], medan föreslaget analysramverk är utformat för att kunna fördela resurser mer allmänt. Sammanfattningsvis är det innovativa i föreslagna metoder dess flexibilitet, exempelvis möjlighet att beakta fler risk- och sårbarhetsaspekter och fortfarande vara rimligt att använda för ett vanligt elnätsföretag.

Introduktion till föreslaget analysramverk

Ett analysramverk presenteras i detta kapitel och exemplifieras och utvärderas i kapitel 3 genom analyser gjorda på ett verkligt eldistributionsnät i Sverige (samarbete med Fortum Distribution AB). En grundtanke med introducerat analysramverk är att dela upp omfattande analyser i mindre delar och sedan sammanställa resultat. Ett mål är att fördela resurser (t.ex. arbetskraft, finansiella resurser eller reservkomponenter) mer kostnadseffektivt. Ett annat viktigt mål är att kunna fånga konsekvenser som traditionella analyser baserade på medelvärden (nackdelen med att endast använda medelvärden illustreras i kapitel 1) inte beaktar (exempelvis konsekvens av långa avbrott), utan att för den delen behöva använda avancerade matematiska modeller – endast använda existerande indata och kompetens som elnätsföretag förfogar över.

2.1.2 Övergripande koncept

En sårbarhetsanalysmetod, där elkraftdistributionssystem generellt kan delas upp i flera systemtillstånd, inte nödvändigtvis väderrelaterade, har tidigare föreslagits i avslutat doktorandprojekt finansierat av Elforsk riskanalysprogram 2006-2010 [11][24] och sammanfattas på svenska i avsnitt 2.2. Olika resursfördelningsalternativ analyseras med avseende på olika systemtillstånd. Ett systemtillstånd kan vara en tidskategori,

vädertillstånd eller en försvagning i systemet (t.ex. del bortkopplad för planerat underhåll).

Analysmetod för jämförelse mellan olika resursallokeringsalternativ föreslås i 2.3 och kan dels användas fristående, dels kombineras med tidigare publicerad sårbarhetsmetod. Det senare ger ett tvådimensionellt analysramverk, som delar upp en stort komplex analys i flera mindre delar som sedan är lättare att hantera, vars resultat sedan sammanställs. Den största fördelen är emellertid att fler riskkonsekvenser än genomsnittet beaktas, till exempel identifiering av oacceptabla risker.

Tillförlitlighet i eldistributionssystem beskrivs och analyseras oftast med genomsnittliga tillförlitlighetaindex såsom (SAIDI) [tid/år, kund] [7]. Problemet är att den genomsnittliga situationen sällan förekommer i verkligheten [4]. Genom att dela eldistributionsnät i olika systemtillstånd, med avseende på olika risknivåer, kan mycket annan information erhållas, exempelvis information om hur systemet beter sig i ansträngda vädersituationer (förhöjd sårbarhet). Denna information kan användas för kostandeseffektiv resursallokering och investeringsplanering, dvs. genom att studera en mer realistisk modell av eldistributionsnätet kan investeringar och dylikt riktas för bästa effekt.

2.1.3 Förslag på användningsområden

Analysresultat kan till exempel användas för att:

- Ta fram kostnadseffektiva investerings- och underhållsplaner.
- Utvärdera om extra beredskap (t.ex. mer personal) bör övervägas som en följd av vissa kategorier av väderprognoser eller generellt under vissa årstider.
- Uppskatta en lämplig mängd reservdelar och resurser som kan delas med andra nätägare.
- Uppskatta lagom beredskap under obekvämt arbetstid.
- Undersöka om när planerat underhåll är som mest lämpligt, dvs. när systemet har så lite sårbarhet som möjligt.
- Identifiera oacceptabla sårbarheter/risker.

2.1.4 Föreslagit analysramverk – översikt

Tabell 3 – Föreslaget analysramverk

Systemtillstånd:			...			
Resurs- allokering			...			
1 oförändrat	0	A_1	A_{11}	A_{12}	...	A_{1N}
2		A_2	A_{21}	A_{22}	...	A_{2N}
3		A_3	A_{31}	A_{32}	...	A_{3N}
$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\searrow$	$\square$
M		A_M	A_{M1}	A_{M2}	...	A_{MN}

Analysramverk för kostnadseffektiv resursallokering kan beskrivas som en matris vilken illustreras i Tabell 3. Varje matrisrad representerar ett resursallokeringsalternativ (avsnitt 2.2) och varje matriskolumn representerar ett tillstånd (S_i) (avsnitt 2.3). I kapitel 3 exemplifieras föreslagen modell med analys på ett verkligt eldistributionsnät.

är kostnadsskillnad mellan att inte göra någon förändring och alternativ i , ett värde som kan vara såväl positivt som negativt (t.ex. vid analys av besparingar). Varje matrisruta (A_{ij}) illustrerar en mindre analys (jämfört med A_i), som skulle kunna utföras separat. Sambandet mellan A_i (genomsnitt) och mindre specifika analyser ges av ekvation 1.

(1)

2.2 Sammanfattning av sårbarhetsanalysmetod

Detta avsnitt sammanfattar en sårbarhetsmetod, tidigare publicerats av författaren till denna rapport som en del av en doktorsavhandling från 2011 [11] [24]. För mer detaljerad läsning av metod och exempel hänvisas till nämnda avhandling eller artikel. Publicerad sårbarhetsanalysmetod kan både användas självständigt eller som en del ("kolumnerna") i ett tvådimensionellt analysramverk (illustreras av Tabell 3).

2.2.1 Metodöversikt

Övergripande idé är att identifiera och utvärdera möjliga systemtillstånd av eldistributionsnät med kvantitativa tillförlitlighetsanalyser. Resultat kan användas till att fördela tillgängliga resurser (både personal och utrustning) bättre, t.ex. vid underhåll och för att utvärdera om ytterligare beredskap bör införas vid vissa prognostiserade väderförhållanden.

2.2.2 Metodsteg

1. Bestämma lämplig noggrannhet och omfattning.
2. Identifiera lämpliga systemtillstånd.
3. Beräkna riskindex för varje systemtillstånd.
4. Utföra en statistisk validering.
5. Använda resultat för kostnadseffektiv resursfördelning, dvs. som input till investerings- och underhållsplanering.

2.2.3 Systemtillståndskategorier:

Tre kategorier av systemtillstånd har identifierats:

- Tidskategorier, se exempel i kapitel 3, Figur 2.
- Väderkategorier, se exempel i kapitel 3, Figur 3.
- Minskad systemprestanda, till exempel när en extra transformator är bortkopplad för planerat underhåll.

2.3 Analysmetod för jämförelse mellan olika investeringsscenarion

Detta avsnitt beskriver en analysmetod som både kan användas självständigt och som en del ("raderna") i et tvådimensionella analysramverk som illustreras av Tabell 3.

2.3.1 Metodsteg

Inkluderade steg (hela metoden exemplifieras i kapitel 3, inom parantes anges i vilket avsnitt respektive steg behandlas):

1. Undersöka och modellera systemet (avsnitt 3.2.1).
2. Definiera väl avvägda systemtillstånd (avsnitt 3.2.2).
3. Ta fram förslag på resursallokeringsalternativ som skall jämföras (avsnitt 3.2.3).
4. Göra ekonomiska antaganden (avsnitt 3.2.4); förslag på generell ekonomisk analysmetod ges i detta kapitel, avsnitt 2.3.2.
5. Välja lämplig riskanalysmetod för respektive systemtillstånd (avsnitt 3.2.5). Se även avsnitt 2.3.3 i detta kapitel.
6. Ta fram lämpliga indata och gör övriga antaganden (avsnitt 3.2.6).
7. Genomföra analys (avsnitt 3.2.7).
8. Utvärdera och använd resultat (avsnitt 3.2.8).

2.3.2 Förslag på generell ekonomisk analys

Syftet är att identifiera strategier som tar hela den ekonomiska livslängden i beaktning, dvs. det rekommenderas att utföra livscykelkostnadsanalys [24]; se ekvation 2.

(2)

Där:

- C_{LCC} är total livscykelkostnad.
- z [%] är företagets internränta.
- C_i är summan av uppskattade kostnader år i (intäkter modelleras som negativa kostnader).
- R är restvärdet efter den ekonomiska livslängden (eller restkostnad som i förekommande fall modelleras som ett negativt restvärde).
- L är beräknad ekonomisk livslängd.

2.3.3 Råd vid val av riskanalysmetod(er)

Tillförlitlighetsanalys är en vanlig riskanalysmetod att använda för att bedöma risk för kundavbrott i eldistributionsnät [7]. En god tillförlitlighetsanalys kräver många historiska felhändelser och är därför inte tillämplig i riskanalysammanhang med låga sannolikheter och stora konsekvenser [24]. Följaktligen:

- Tillförlitlighetsanalys rekommenderas som riskanalysmetod för att mäta konsekvensen av avbrott under normala förhållanden.
- Andra riskanalysmetoder, som till exempel att använda en riskmatris, bör vidtas för att bedöma konsekvenserna av allvarigare händelser (låg sannolikhet, men hög konsekvens).

2.3.4 Övriga viktiga frågeställningar som bör beaktas

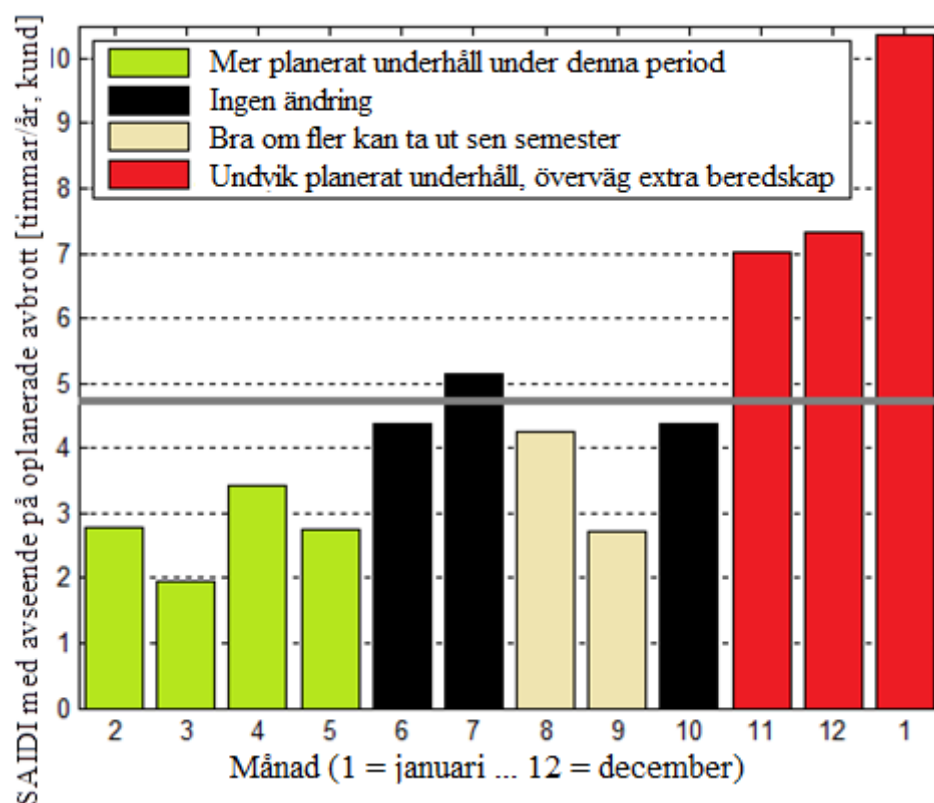
- *Är det möjligt att dra nytta av investeringen i varje systemtillstånd?* Till exempel i ett system med mestadels luftledning kan investering i brytare och/eller frångiljare ge signifikant förhöjd tillförlitlighet vid normala väderförhållanden, men ingen eller mindre riskreducerande effekt under extrema väderförhållanden eftersom flera delar av systemet då påverkas samtidigt. Byta luftledning mot jordkabel har emellertid en betydande inverkan på risknivån oavsett väderförhållande. Denna aspekt ingår i de analyser som exemplifieras i avsnitt 3.2.
- *Finns det andra möjliga för- och nackdelar som inte behandlas i genomförda analyser?* Exempel är personalfrågor och tillgång till reservdelar. Inget av detta har tagits med i presenterat exempel. Se t.ex. förslag på fortsatt arbete i avsnitt 5.2.

3 Utvärdering och exempel

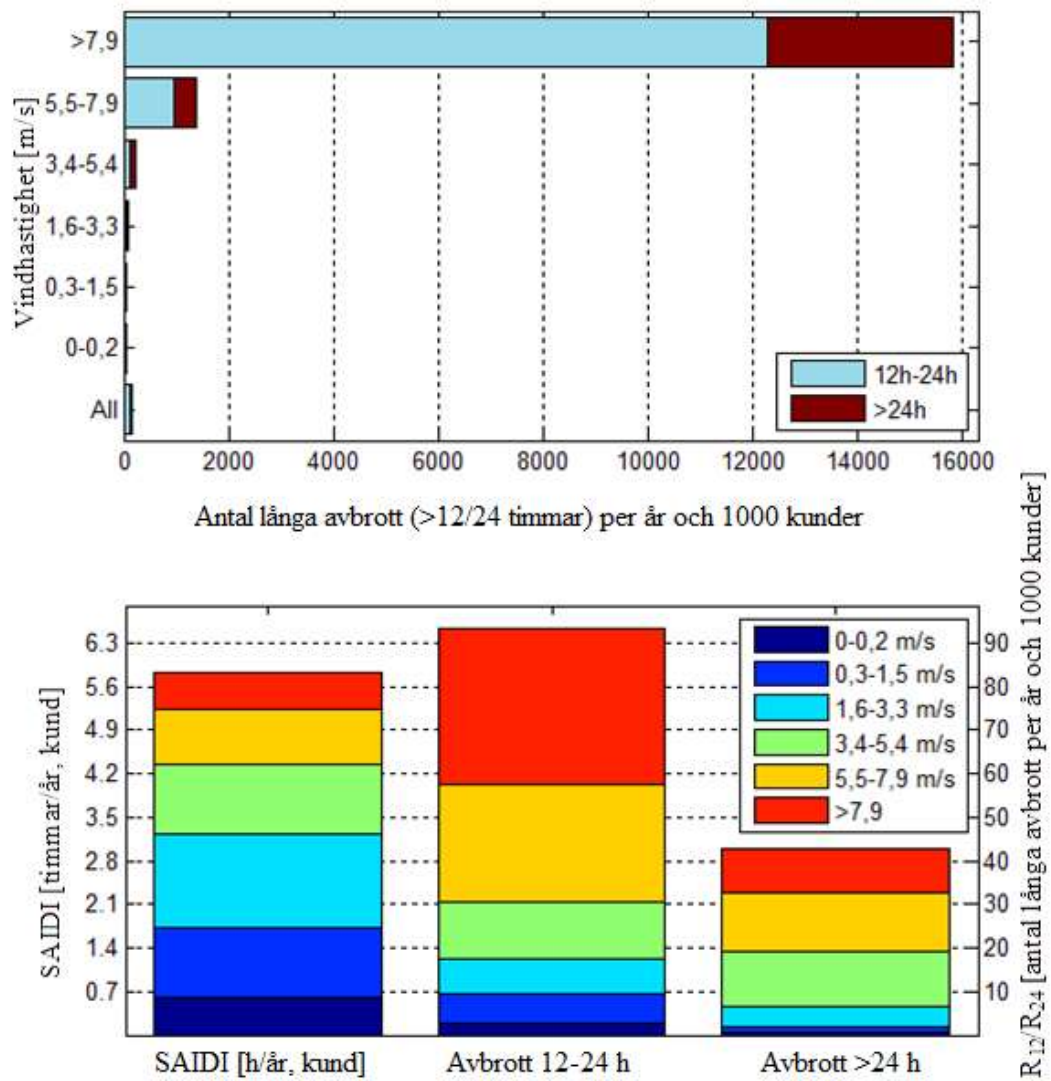
3.1 Fallstudie – utvärdering av sårbarhetsanalysmetod

För att utvärdera föreslagen sårbarhetsanalysmetod som beskrivs i avsnitt 2.2 har en fallstudiestudie utförts baserat på timvis väderdata under åtta år och på cirka 65 000 detaljerade felrapporter under samma period för två eldistributionsnät i Sverige. Denna studie har tidigare presenterats på engelska som en del av tidigare doktorandprojekt [24], men några intressanta resultat sammanfattas här eftersom föreslagen sårbarhetsanalysmetod är en del av föreslaget analysramverk.

Månader, veckodagar och timmar har jämförts och sårbarhet med avseende på flera väderfenomen har utvärderats. Av studerade väderfenomen är det blott kraftigt snöfall och starka vindar, särskilt i kombination, som väsentligt påverkar tillförlitligheten (även blixtnedslag har med stor sannolikhet signifikant påverkan, men ingick inte i genomförd fallstudie). Temperatur (frost), regn och snödjup har en relativt låg eller ingen effekt. Av de resultat som publiceras i [11] [24], redovisas tre exempel i detta avsnitt: tillförlitlighet som funktion av månad, inklusive en idé om hur resultat kan användas i underhållsplanering (se Figur 2), risk och tillförlitlighet (både genomsnittlig tillförlitlighet och risken för långa avbrott) vid olika vindhastigheter (se Figur 3) och risk och tillförlitlighet vid de systemtillstånd som har identifierats som de mest kritiska (se Tabell 4).



Figur 2 – Konkret exempel på hur resultat från föreslagen sårbarhetsanalysmetod kan användas i verkligheten



Figur 3 – Sårbarhet vid olika vindstyrkor

Tabell 4 – Sårbarhet med avseende på riskkategorier

Risk-kategori ¹	Andel av tiden [%]	[h/år, kund]	[avbrott/år, kund]	Kundavb. >12 h/år per 1000 kunder	Kundavb. >24 h/år per 1000 kunder
All	100	4.7	5.6	136	43
Övrig tid	95.11	3.1	4.9	36	15
Kraftig vind	1.16	23.8	14.5	709	124
Snöfall	3.06	28.7	18.5	1513	527
Vind & snö ²	0.09	144	45.1	5040	8 ²
Extremt	0.58	87.5	28.2	7324	1883

¹Exakta definitioner i [11].

²Eftersom denna kategori var ovanlig (0,09 % av tiden) har resultaten hög statistisk osäkerhet (t.ex. torde detta förklara det relativa låga värdet på avbrott >24 timmar)

3.2 Exempel på användning av analysramverk

3.2.1 Beskrivning av analyserat system

Analyserade investeringsförslag i detta kapitel utföres på ett eldistributionsnät ägt av Fortum Distribution AB. De investeringsförslag som används som exempel har tidigare analyserats i utfört examensarbete [38] med traditionell analysmetod (medelvärden). Genom att kombinera analyser från [11] tillsammans med nya analyser har en fullständig studie baserat på föreslaget analysramverk genomförts.

Analyserat eldistributionsnät valdes i samråd med Fortum Distribution AB och motiveras enligt följande: (a) från en tillförlitlighetsperspektiv har det historiskt sett varit en av de mest problematiska delarna och (b) större investeringar har nyligen genomförts. Tanken är att utföra hypotetiska investeringsanalyser på denna systemdel såsom det var före verkliga investeringar (byte av en stor mängd av luftledning med jordkablar). År 2001 har använts som referensår i utförda analyser; då hade denna del av systemet 61 km luftledning, 15 km jordkabel och 303 kunder. Idag, efter stora investeringar, har mängden luftledning minskat med 69 %.

3.2.2 Definiera systemtillstånd

Tabell 5 – Definition av vädertillstånd som används i genomförd analys

Väder- tillstånd	Tillstånd Tabell 4	i P [%]	Tillförlitlighetsindex: SAIDI [h/år, kund] R_x [avbrot > X h/år, 1000 kunder]
Övrigt väder	1	95.11	SAIDI = 3.1, R_{12} = 36, $R_{24}-R_{12}$ = 21, R_{24} = 15
Hårt väder	2-3	4.22	SAIDI = 27.3, R_{12} = 1 289, $R_{24}-$ R_{12} = 877, R_{24} = 412
Extremt väder	4-5	0.65	SAIDI = 95.6, R_{12} = 6998, $R_{24}-$ R_{12} = 5 383, R_{24} = 1 615
<i>Medel</i>	<i>Alla, 1-5</i>	<i>100</i>	<i>SAIDI = 4.7, R_{12} = 136, $R_{24}-R_{12}$ = 93, R_{24} = 43</i>

SAIDI (medeltillförlitlighet), R_{12} och R_{24} (mått på risk för långa avbrott över 12 respektive 24 timmar) definieras i avsnitt 3.2.5. Använda väderkategorier presenteras i Tabell 5, vilka baseras på vädertillstånd i Tabell 4.

3.2.3 Investeringsförslag

- Oförändrat, dvs. såsom eldistributionsnätet var år 2001. Den potentiella vinsten av alla andra alternativ utvärderas och jämföres sedan med detta alternativ med livskostnadsanalys (se avsnitt 2.3.2).
- Ersätta luftledningarna med nedgrävda kablar, dvs. som system är i dag. 69 % av luftledningarna ersättes med jordkabel.
- Uppgradera manuella fränksiljare till fjärrstyrda.
- Lägga till en brytare.
- Lägga till en sekundär matningspunkt.

3.2.4 Ekonomiska antaganden

Generella antaganden:

- Ekonomisk livslängd: 40 år, samma som används av Energimarknadsinspektionen.
- Företagets internränta används (dvs. inte samma som i tariffregleringen).

Kostnader och intäkter som har inkluderats i genomförd analys:

- *Investeringskostnad:* Initial kostnad, t.ex. arbete och material för jordkabel samt rivning av gamla ledningar.
- *Ändrat utfall i tariffreglering:*
 - *Tillförlitlighetsfunktion:* Ändrad tillförlitlighet, SAIDI och SAIFI (SAIDI bidrar mest), med avseende på avbrott 0.05-12 timmar kan leda till positiva och negativa kvalitetsjusteringar.

- Tillförlitligheten jämföres med nivå från föregående reglerperiod, vilket medför att ändrad tillförlitlighet endast påverkar intäktsram under fyra år.
- *Ändrad kompensation för kapitalkostnader:* Kapitalkostnad för en komponent består av avskrivning och kostnad för bundet kapital. En kapacitetsbevarande princip tillämpas genom att använda konstant real annuitet – och att kompensationen är densamma oavsett komponentens ålder (även komponenter äldre än antagen ekonomisk livslängd ersättes lika). Nätägare som lyckas behålla komponenter länge utan nedsatt funktionalitet belönas således (indirekt uppmuntras god underhållsplanering). Denna del har en signifikant inverkan på analysresultaten. Investeringar som inkluderar införandet av fler komponenter "belönas", medan rivning av gamla komponenter "bestraffas".
 - *Reparationskostnader:* Att lägga till och ta bort utrustning kan påverka genomsnittlig underhållskostnad både negativt och positivt. Dessa kostnader baseras på intervjuer med personer som arbetar med analyserat eldistributionsnät.
 - *Kundavbrottsersättning för långa avbrott:* Om investeringsalternativet påverkar risk för avbrott >12 timmar påverkas resultatet, se Figur 1.

Kostnader som inte har inkluderats i genomförd analys:

- *Eventuella extra direkta kostnader utöver kundavbrottsersättningen till följd av att bryta funktionskravet om 24 timmar:* Dessa konsekvenser beaktas emellertid i genomförd riskanalys, se avsnitt 3.2.5.
- *Påverkan på företagets "goodwill":* omfattande och/eller ett stort antal avbrott kan skada företagets varumärke. Många företag verkar på andra konkurrensutsatta marknader såsom försäljning (tillskillnad mot nätverksamheten som är ett naturligt monopol).
- *Eventuella kostnader och intäkter efter ekonomisk livslängd (40 år).*
- *Eventuella kostnader för övriga kvalitetsaspekter:* exempelvis korta avbrott <0.05 timmar (som numera måste rapporteras även om de för närvarande inte ger direkt ekonomisk konsekvens i tariffregleringen).

3.2.5 Val av riskanalysmetoder

En god tillförlitlighetsanalys kräver många historiska felhändelser, vilket är fallet för avbrott 0,05-12 timmar. Avbrott >12 timmar, med allvarliga konsekvenser (se Figur 1), men med relativt låg sannolikhet, saknar adekvat statistik för att tillförlitlighetsanalys skall vara tillräckligt. Därför kompletteras analys av långa avbrott med en annan riskanalysmetod.

Tillförlitlighetsmetod

SAIDI (som t.ex. definieras i [7]) är ett väletablerat tillförlitlighetensindex som används i denna studie för att illustrera genomsnittlig tillförlitlighet. Endast avbrott på mellan 0,05 och 12 timmar inkluderas i likhet med rådande tariffreglering [24] [46] (längre avbrott hanteras separat). När tillförlitlighetsindex för ett systemtillstånd S studeras, räknas det om till enheten år för att det alltid skall vara samma enhet, dvs. beräknas hur tillförlitligheten hypotetiskt hade varit om systemet under ett helt år befunnit sig i tillstånd S (även om det är orealistiskt). Om Y % av SAIDI kan spåras till

systemtillstånd S , beräknas SAIDI, givet tillstånd S (SAIDI^S) såsom visas i ekvation 3.

$$\frac{\sum_{i=1}^n \text{SAIDI}_i}{N} \quad (3)$$

En ny tillförlitlighetsindexkategori, R_T , introducerades i [11]. R_T är flexibel för att kunna anpassas till olika lagar eller företagsmål med avseende långa avbrott. R_T är det genomsnittliga antalet avbrott längre än T timmar under ett år per 1 000 kunder:

$$R_T = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Antal avbrott} > T}{N} \quad (4)$$

I ekvation 4 är summan av alla kundavbrott längre än T timmar i lastpunkt i (LP_i) under ett år och N_i är antal kunder i LP_i . I Sverige är 12 och 24 timmar viktigast att beakta (se t.ex. Figur 1), dvs. R_{12} och R_{24} , medan 18 timmar, dvs. R_{18} , är gränsen för första ersättningsnivå i Storbritannien. Om ett avbrottsintervall, $T1$ till $T2$, är av intresse (t.ex. 12-24 timmar), kan ett mått för detta tillhandahålls genom att beräkna $R_{T1} - R_{T2}$.

Kompletterande riskanalys för att utvärdera långa avbrott:

En enkel, men vanligen använd, definition av riskvärde [47] exemplifieras i ekvation 5, där P är ett värde associerat med en bestämd sannolikhetskategori och C är ett värde associerat med en bestämd konsekvenskategori. Ett riskvärde kan sedan användas som underlag för att avgöra om och i sådana fall hur en risk skall åtgärdas eller för att jämföra riskreducering med avseende på olika investeringsalternativ.

$$R = P \times C \quad (5)$$

En vanlig strategi för att bedöma en risk eller jämföra och prioritera risker är användning av riskmatriser [48]. Sannolikhet och konsekvens beräknas/uppskattas först och delas sedan in i bestämda kategorier. Kategoriseringen kan göras antingen kvalitativt eller kvantitativt. Erhållna sannolikhets- och konsekvenskategorier ger två axlar med en resulterande tvådimensionell matris, med beräknad risk och/eller föreslagna åtgärder i varje fält. Föreslagna sannolikhets- och konsekvenskategorier som används i denna studie visas i Tabell 6.

Tabell 6 – Sannolikhets- och konsekvenskategorier

Sannolikhetskategorier		Konsekvenskategorier	
<i>Antal långa avbrott per 1000 kunder och år, se ekvation 4</i>	<i>P</i>	<i>Avbrottslängd [timmar]</i>	<i>C</i>
<5	0	<0.05	0
5-15	1	0.05-12	Tillförlitlighets- analys
15-30	2	12-24	2
30-50	3	>24 ¹	4
50-100	4	>24	5
>100	5		

¹Högre chans att det finns förmildrande omständigheter vid extremt väder. Från Energimarknadsinspektionens hemsida: "Funktionskrav Elavbrott får enligt ellagen inte vara längre än 24 timmar. Endast i undantagsfall får elnätsföretaget frångå det kravet. Undantaget gäller när elnätsföretaget inte rimligtvis har kunnat förvänta avbrottet eller att följderna av avbrottet inte rimligen hade kunnat undvikas. De allra flesta avbrott ligger dock inom nätföretagets kontrollansvar."

I exemplet som presenteras här, antas 0,6 % av tiden, den med mest "extremt" väder, ge en ökad sannolikhet för att rättfärdiga förmildrande omständigheter. Baserat på Tabell 4 och Tabell 6, kan genomsnittligt konsekvensvärde beräknas till 4,75 enligt ekvation 6:

(6)

Ide om gränser vid investeringsplanering:

- *Riskvärde <8:* basera beslut i första hand på övriga analyser, om två investeringar ger resultat av samma storleksordning kan detta värde emellertid vara utslagsgivande.
- *Riskvärde 8-12:* välj i första hand bort detta alternativ. Om alternativ med riskvärde <8 saknas eller om dessa är signifikant sämre med avseende på andra faktorer kan alternativ med riskvärde 8-12 ändå väljas. I sådana fall bör det övervägas att modifiera alternativet och/eller göra fler investeringar.
- *Riskvärde >12:* välj aldrig detta alternativ. Om inga tillfredställande alternativ finns, ta fram nya investeringsförslag.

Potentiella riskvärden och föreslagna strategier med avseende på dessa illustreras i Tabell 7 som en riskmatris.

Tabell 7 Riskmatris avseende långa avbrott

Kons:	2	4	4.75	5
Sannolikhet:				
1	2	4	4.75	5
2	4	8	9.50	10
3	6	12	14.25	15
4	8	16	19.00	20
5	10	20	23.25	25

3.2.6 Indata och antaganden

Ekonomisk indata

Ekonomiska indata såsom kostnader, räntor och ekonomisk livslängd baseras på intervjuer med Fortum Distribution AB; presenteras i [38].

Tillförlitlighetsindata

Beräkning av SAIDI för varje investeringsförslag med avseende systemets genomsnittsvärde presenteras i [38]. Värdena för långa avbrott för varje systemtillstånd baseras på Tabell 4. Utifrån innehåll i Tabell 4 kan flera observationer och beräkningar göras som är relevanta för denna studie. För att åstadkomma en bättre översikt, är tillförlitligheten för varje kategori översatt till en procentsats, där genomsnittet är satt till index = 100 %. Detta illustreras i Tabell 8.

Tabell 8 – Varje systemtillstånds tillförlitlighet i förhållande till genomsnittet

Väder	P [%]	SAIDI (0,05-12 h)	Avbrott 12-24 h	Avbrott >24h
Medel	-	100 %	100 %	100 %
Normal	95.11	66 %	23 %	35 %
Hårt	4.22	581 %	943 %	958 %
Extremt	0.67	2 034 %	5 788 %	3 756 %

Tabell 9 – Felfrekvens för avbrott >12 timmar

	Outages >12 hours	Share
Luftledning	0.0089 f/km, yr	95.35 %
Jordkabel	0.0002 f/km, yr	0.41 %
0,4 kV-nät inkl. nätstation	0.0025 f/l.p., yr	4.24 %

Tillförlitlighetsdata i Tabell 9 baseras på felhändelser under 8 år från samma elnät som den nät-del som analyseras i denna studie (data är visserligen inhämtat från ett större område). En observation från Tabell 5 är att 71 % av alla avbrott över 12 timmar är mellan 12 och 24 timmar och därmed är resterande 29 % är över 24 timmar.

Antagande om hur långa avbrott påverkas av investering i jordkabel

Från Tabell 9 går det att utläsa att det är 45,5 gånger högre sannolikhet att 1 km luftledning leder till ett avbrott på över 12 timmar jämfört med 1 km jordkabel. Dessutom bidrar luftledning till mer än 95 % av alla långa avbrott. Därför approximeras antalet långa avbrott förändras proportionellt mot förändringen i andelen luftledning.

3.2.7 Genomförda analyser med riskanalysbaserat ramverk

Översikt

Baserat på Tabell 5 och resultat från [38], har varje systemtillstånd med dess tillhörande sannolikhet och varje projektförslag med tillhörande Δ kostnad, lagts in i modellen som illustreras av Tabell 3, se Tabell 10.

Tabell 10 – Resursallokeringsmodell för detta exempel

Vädertillstånd:					
Resursallokering					
i) Oförändrat	0	A_1	A_{11}	A_{12}	A_{13}
ii) Kablifiering		A_2	A_{21}	A_{22}	A_{23}
iii) Fjärrstyrda fråns.		A_3	A_{31}	A_{32}	A_{33}
iv) Extra brytare		A_4	A_{41}	A_{42}	A_{43}
v) Alternativ matning		A_5	A_{51}	A_{52}	A_{53}

Traditionell analys som använder medelvärden

Här redovisas hur beräkningar avseende kolumnerna "medel" och "normal" i Tabell 11 är utförda.

Antaganden:

- Genomsnittligt SAIDI för varje investeringsförslag baseras på [38]. SAIDI för väderkategorin "normalt" omvandlas från genomsnittliga värden med hjälp av Tabell 8 [11].
- Långa avbrott:
 - Vid kablifiering antas mängden långa avbrott minska proportionellt med andelen luftledning i nätet (motiveras i avsnitt 3.2.6). I denna analys är minskningen 69 %.
 - För övriga investeringar antas andelen långa avbrott minska proportionellt mot minskningen av SAIDI vid väderförhållandena.

Traditionellt baseras investerings- och underhållsplanering på metoder som bygger på medelvärden. I bästa fall beräknas ekonomiska konsekvenser med avseende på avbrottskostnad (reparation, reglering och kundavbrottsersättning) i kostnadsanalyser och investeringsalternativ jämföres med hjälp av livcykelkostnadsberäkningar. I genomförd analys baserat på medelvärden finns det blott ett alternativ som är bättre än att inte

göra någonting alls, nämligen installera fjärrfrånskiljare. En bidragande orsak är bidraget från kapitalbasen i nuvarande tariffreglering. Det alternativ som företaget i verkligheten valde (kablifiering) är ytligt sett det signifikant minst lönsamma.

Jämförelse mellan olika investeringsalternativ, endast baserat på medelvärden, inkluderar inte eventuella effekter av att bryta mot funktionskravet om 24 timmar eller abstrakta kostnader såsom att störstörningar eller att många avbrott kan skada varumärket – eller öka politiska trycket (hårdare reglering och lagar på lång sikt). För att fånga fler konsekvenser kompletteras genomförd tillförlitlighetsanalys med riskanalys (se avsnitt 3.2.5) och redovisas i Tabell 11.

Endast kabelinvesteringensförslaget gav ett helt tillfredsställande resultat, men samtidigt är denna investering signifikant dyrare än alla andra och i detta fall är fjärrstyrda frånskiljare fortfarande det minst sämsta alternativet eftersom ett riskvärde på 9,5 kan godtas om alla alternativ med riskvärde <8 är signifikant dyrare (se avsnitt 3.2.5). Det bör dock övervägas att komplettera eller modifiera föreslaget alternativ (fjärrfrånskiljare) för att minska riskvärdet förutsatt att det inte blir för dyrt.

Hårt och extremt väder

Här redovisas hur beräkningarna avseende kolumnerna "hårt väder" och "extremt väder" i Tabell 11 är utförda.

Antaganden:

- *Kabelinvesteringsalternativet:*
 - Samma antaganden som vid normalt väder (eftersom jordkabel är mindre väderkänslig), dvs. minskad sannolikhet av långa avbrott med 69 %.
 - Förändring av SAIDI beräknas med hjälp av Tabell 8.
- *Övriga investeringar:*
 - Vid "extremt väder" antas att dessa inte minskar risken överhuvudtaget, vilket motiveras av att stora delar av nätet drabbas samtidigt.
 - Vid "hårt väder", antas dessa investeringar halvera sin förmåga till riskreducering. Detta beräknas med hjälp av att ta medlet från att å ena sidan beräkna riskindex med hjälp av Tabell 8 och å andra sidan de riskindex som erhålls i grundfallet (inga investeringar).

Summering av resultat

Tabell 11 kompletterar Tabell 10 genom redovisning av risk- och tillförlitlighetsanalysresultat i varje matricell.

Tabell 11 – Beräkning av risk och tillförlitlighet

P	Medel (traditionell) ¹ 100 %	Normal v. 95.11 %	Hårt väder 4.22 %	Extremt v. 0.67 %
i) Oförändrat	SAIDI = 10,49, R ₁₂ -R ₂₄ = 93, R ₂₄ = 43. Risk² = 15	SAIDI = 6,92, R ₁₂ -R ₂₄ = 21,00, R ₂₄ = 15,00	SAIDI = 60,95, R ₁₂ -R ₂₄ = 877,00, R ₂₄ = 412,00	SAIDI = 213,37, R ₁₂ -R ₂₄ = 5383,00, R ₂₄ = 1615,00
ii) Kablifiering	SAIDI = 6,21, R ₁₂ -R ₂₄ = 29, R ₂₄ = 13. Risk² = 4,75	SAIDI = 4,10, R ₁₂ -R ₂₄ = 6,51, R ₂₄ = 4,65	SAIDI = 36,08, R ₁₂ -R ₂₄ = 271,87, R ₂₄ = 127,72	SAIDI = 126,31, R ₁₂ -R ₂₄ = 1668,73, R ₂₄ = 519,25
iii) Fjärrstyrda fränskiljare	SAIDI = 5,81, R ₁₂ -R ₂₄ = 51, R ₂₄ = 24. Risk² = 9,50	SAIDI = 3,83, R ₁₂ -R ₂₄ = 11,73, R ₂₄ = 8,40	SAIDI = 47,35, R ₁₂ -R ₂₄ = 678,97, R ₂₄ = 320,96	SAIDI = 213,37, R ₁₂ -R ₂₄ = 5383,00, R ₂₄ = 1615,00
iv) Extra brytare	SAIDI = 9,36, R ₁₂ -R ₂₄ = 83, R ₂₄ = 38. Risk² = 14,25	SAIDI = 6,18, R ₁₂ -R ₂₄ = 19,09, R ₂₄ = 13,30	SAIDI = 57,67, R ₁₂ -R ₂₄ = 829,85, R ₂₄ = 388,02	SAIDI = 213,37, R ₁₂ -R ₂₄ = 5383,00, R ₂₄ = 1615,00
v) Alternativ matning	SAIDI = 9,87, R ₁₂ -R ₂₄ = 88, R ₂₄ = 41. Risk² = 14,25	SAIDI = 6,51, R ₁₂ -R ₂₄ = 20,24, R ₂₄ = 14,35	SAIDI = 59,15, R ₁₂ -R ₂₄ = 853,42, R ₂₄ = 402,39	SAIDI = 213,37, R ₁₂ -R ₂₄ = 5383,00, R ₂₄ = 1615,00

¹Notera att kolumnen med medelvärde bygger på traditionella beräkningar och inte inklusive alla antaganden som gjorts för hårt och extremt väder → , men lika med "nya" medelvärde presenterat i Tabell 12.

²Endast högsta riskvärde redovisas (risk för avbrott >24 timmar ger i samtliga fall högre riskvärde än risk för avbrott 12-24 timmar trots att det förstnämnda har lägre sannolikhet – orsaken är att lägre sannolikhet uppvägs av betydligt högre konsekvens).

Ett av de sista stegen i föreslaget analysramverk (se kapitel 2) är att sammanställa resultat från genomförda mindre delanalyser. Nya genomsnittsvärden, baserat på resultat från alla systemkategorier, redovisas i Tabell 12 och utvärderas i avsnitt 3.2.8.

Tabell 12 – sammanställt resultat med avseende på alla delanalyser

	<i>Nya medelvärden baserat på föreslaget analysramverk</i>	<i>Medelvärden baserat på traditionell analys</i>
Kablifiering	Samma resultat som med traditionell analys	SAIDI = 6.21, $R_{12}-R_{24} = 29$, $R_{24} = 13$, Riskvrde = 4,75
Fjärrstyrda frånskiljare	SAIDI = 6,97 (+ 1,16) $R_{12}-R_{24} = 75,9 (+ 24,9)$ $R_{24} = 32.4 (+ 8,9)$ Riskvärde = 14,25 (+4,75)	SAIDI = 5,81, $R_{12}-R_{24} = 51$, $R_{24} = 24$, Riskvärde = 9,50
Övriga investeringsförslag	Avfärdade (för hög risk) med traditionell analysmetod (se Tabell 11), <i>erhåller ännu sämre resultat med ny metod.</i>	

3.2.8 Föreslagen åtgärd baserat på analysresultat

När hänsyn tas till risk för långa avbrott och djupare analyser av olika systemtillstånd görs, är investeringsförslaget om att införa fjärrfrånskiljare inte längre attraktivt, vilket visas i Tabell 12. Trots kostnaden, är investering i jordkabel det enda förslag som uppfyller alla krav. Därför bör antingen alternativet att ersätta luftledning med kablar väljas eller ett nytt investeringsförslag utformas, t.ex. ersätta färre luftledningar (endast de mest utsatta) och kombinera detta med andra investeringar.

4 Svensk sammanfattning av artiklar skrivna under projektperioden

4.1 Färdigskrivna januari-september 2012

Cost-effective Resource Allocation applied to Power Distribution Systems, inskickad till vetenskaplig tidskrift hösten 2012

Artikeln är en naturlig fortsättning på [11], vars resultat även kan användas självständigt. Artikeln sammanfattas på svenska i kapitel 2 och 3.

A Pre-Study towards Investigating the Art of Choosing Right Level of Input Data, presented at PMAPS 2012, Istanbul

I artikeln [49] föreslås en metod för att jämföra befintliga analysmetoder med andra metoder (eller förbättringar av nuvarande metod) utan att utföra några skarpa förändringar i företagets organisation. Idén är att jämföra nyligen utförda riskreducerande investeringar, baserat på nuvarande analysmetoder, med resultat från en hypotetisk investeringsplanering som bygger på andra metoder – exempelvis att testa in mer omfattande tillförlitlighetsanalys.

Artikeln presenterar resultat från ett samarbetsprojekt mellan industrin och akademien för att undersöka svårigheter med att välja rätt detaljnivå på de indata som används inom tillförlitlighetsanalys och lyfta fram att det är en svår och viktig utmaning att fortsätta undersöka i framtida projekt. Syftet är också att å ena sidan ge akademiskt referensmaterial från "verkligheten", å andra sidan att inspirera branschen att se över sina nuvarande analysmetoder och vid behov genomföra förbättringar.

Fault Management at a Distribution System Operator, presented at PMAPS 2012, Istanbul

Artikeln [50] beskriver metodiskt alla steg i hantering av fel i eldistributionssystem hos en nätägare; från upptäckt till restaurering. Skillnader beroende på tillgänglig utrustning jämföres, till exempel automatiska kontra manuella frångiljare. I tillförlitlighetmodeller av eldistributionsnät antas ofta en medeltid för reparation/omkoppling. Resultat i artikeln baseras mestadels på intervjuer med personer som arbetar med felhantering på olika företagspositioner.

Ett syfte är att ge en detaljerad beskrivning av arbete med felhantering, vilket skall kunna användas som referens vid utvecklingen mer omfattande analysmetoder. En annan möjlig användning är att förbättra nuvarande arbetsprocess utan dyra investeringar i ny utrustning genom att lära mer om och kartlägga nuläget. Studier som denna minskar klyftan mellan teoretiska modeller som utvecklas på universitet och verkligheten ute på företag, vilket troligen är artikelns viktigaste bidrag.

The new Swedish regulation of power distribution system tariffs – a description and an initial evaluation on its risk and asset management incentives, presented at NORDAC 2012

Från och med 2012 har Sverige en ny reglering av elnätstariffer. En rimlig intäktsram för nätägarna bestäms inför regleringsperioder om 4 år. Syftet med artikeln [46] är att övergripande beskriva ny reglering, särskilt dess tillförlitlighetsaspekter. En första ytligt undersökning/utvärdering på incitament med avseende på riskhantering och investeringsplanering presenteras. Ett nyligen utfört examensarbete [36] av en av författarna visar att den nya tariffregleringen har en signifikant inverkan på nätägarens incitament att utföra olika investeringar. Exempelvis "belönas" införandet av fler komponenter, medan rivning gamla komponenter "straffas".

4.2 Artiklar som skall presenteras på Cired 2013

Implementation and evaluation of commonly used risk analysis methods applied to a regional power distribution system, abstract accepterat till CIRED 2013, Stockholm

Sedan 2006 måste varje nätägare årligen rapportera resultat från en risk- och sårbarhetsanalys avseende tillförlitligheten i deras eldistributionssystem samt en åtgärdsplan. Det har drivit på utveckling och forskning, vilket bl.a. resulterat i riktlinjer och förslag om risk- och sårbarhetsmetoder lämpliga att använda.

Artikeln beskriver riskhantering avseende Gotlands regionnät. Gotland Energi misstänker att befintliga riskanalysmetoder (däribland de förslag som tidigare tagits fram inom ramen för Elforsk riskanalysprogram 2006-2011) inte passar deras specifika förutsättningar. Artikeln kommer kort beskriva existerande riskanalysmetoder som kan vara relevanta att använda, sammanfatta och utvärdera utförd riskhantering. Syftet är att hitta en metod lämplig för riskanalys i Gotlands regionnät, vilket skulle kunna resultera i en rekommendation av att använda: (a) en eller en kombination av befintliga metoder (b) justera och/eller komplettera befintliga metoder eller (c) utveckla nya metoder om befintliga inte visar sig vara tillräckligt tillfredsställande.

Genomfört projekt är ett samarbete mellan ett universitet (KTH) och ett företag (Gotland Energi som ägs av Vattenfall). Genom att beskriva ett verkligt fall och kombinera erfarenheter från ett företag med akademisk kunskap, kan befintliga metoder utvärderas och, om det behövs, kompletteras och utvecklas. Resultaten kan förhoppningsvis vara till nytta både för företag som utför riskanalyser och för dem som utvecklar nya metoder.

Benefits of reliability centred asset management, abstract accepterat till CIRED 2013, Stockholm

Artikeln sammanfattar olika forskningsprojekt som bedrivs av forskargruppen RCAM och försöker knyta ihop dessa. En liknande artikel presenterades 2010 [23], men sedan dess har mycket nytt hänt. Den mesta av forskningen handlar direkt eller indirekt om riskanalys av elkraftsystem och dess komponenter.

Artikeln ger en översikt över nyutvecklade risk- och tillförlitlighetstekniker som är tillgängliga för systemansvariga för eldistributionssystem. Efter att ha identifierat förutsättningarna för att använda dessa tekniker, identifieras metoder för att övervinna hinder. Det viktigaste resultatet är att visa på vad värdet kan vara av att använda detaljerade risk- och tillförlitlighetsanalys. Sammanfattningsvis visas att välunderbyggda metod- och modellval kan ge signifikant ökning systemets prestanda till lägre en total kostnad.

5 Avslutning

5.1 Slutsatser – ett riskanalysbaserat ramverk

Ett riskanalysbaserat ramverk för projektplanering och underhållsoptimering föreslås. Målet är att fördela resurser mer kostnadseffektivt och att beakta risker (exempelvis konsekvens av avbrott >24 timmar) som ofta inte fångas upp av analysmetoder baserade på medelvärden. En metod som kräver mer resurser i praktiken (indata och personal) än vad den ger i mervärde, är obefogad att introducera även om den teoretiskt ger goda resultat. Därför har introducerat analysramverk utformats så att komplexitetsnivå kan justeras för användning ute på företag och beroende på hur noggranna resultat som erfordras.

Olika resursallokeringsalternativ kan jämföras med avseende på olika specifika systemtillstånds risk- och sårbarhet; exempelvis hur olika förslag fungerar vid hårt väder. Föreslaget analysramverk exemplifieras i rapporten genom att det har implementerats på ett autentiskt eldistributionssystem. Det visar sig att resursallokeringsalternativ (t.ex. investeringsförslag) som framstår som mest attraktiva om analys baseras på traditionella metoder, i själva verket har för hög risk när fler aspekter tas i beaktning. Det visar på risker med att använda medelvärden och fördelar med föreslagen metod. Dessutom har genomförd fallstudie visat att, redan för elnätsföretagen tillgänglig information, kan användas även för mer detaljerade analyser än vad som brukar användas idag.

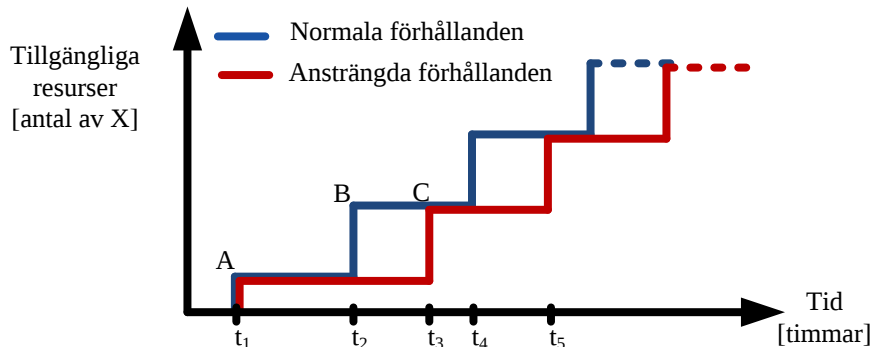
5.2 Förslag på fortsatt forskning inom riskanalys

5.2.1 Risker och möjligheter med Dynamic Rating

Med Dynamic Rating menas förenklat att ha "dynamiska" gränser på t.ex. maximal last istället för "statiska". Ett konkret exempel är om luftledningars gräns är satt med avseende på nedhäng en varm, vindstilla sommardag medan det i Sverige är som högst behov av överföringskapacitet när det är riktigt kallt. Om gränserna istället är dynamiska, att exempelvis högre last accepteras på vintern, kan dyra investeringar skjutas upp eller undvikas helt. Ett annat exempel är nätförstärkningar vid anslutning av vindkraftparker, gränser för transformatorers maximala last eller vilka omkopplingar som kan tillåtas i nätet för att undvika långa avbrott. Dynamic Rating är ett brett ämnesområde som spänner från så skilda områden som teoretisk materialfysik till att affärsmässigt räkna på kostnad, risk och vad som är juridiskt tillåtet. Det är ett ämnesområde som många företag inom elkraftsbranschen har pekat ut som intressant [51] och där det potentiellt kan finnas stora vinster, men det handlar också att kunna väga dessa mot eventuella risker – så riskanalys är en central del. Från december 2012 utförs ett postdoktoralt forskningsprojekt på KTH inom forskargruppen RCAM om Dynamic Rating finansierat av SweGRIDS. Projektet utgör en förstudie med målet att kartlägga framtida önskemål och behov av forskning och utveckling.

5.2.2 Resursmodell som funktion av tid

Övergripande idé illustreras översiktligt av Figur 4 och skulle kunna utvecklas och testas i samarbete mellan KTH och elnätsföretag.



Figur 4 – Resurser som funktion av tid

I Figur 4 representerar x-axeln tid och y-axeln representerar mängd av en viss resurs. Den blå (övre) linjen illustrerar predikterad situation under normala förhållanden och den röda (nedre) linjen samma sak men under förhållanden då nätet har förhöjd sårbarhet (t.ex. hårt väder eller semestertider).

Till exempel, om resursen gäller mobiliserad personal att skicka ut vid avbrott, kan Figur 4 tolkas enligt följande: efter t_1 timmar (A) = antal som för tillfället arbetar som kan sättas in med kort varsel för åtgärd; efter t_2 = som A + annan egen personal i beredskap (B), eller om det är svåra förhållanden, finns de tillgängliga efter något längre t_3 (C); efter t_4/t_5 timmar = som B + de mest tillgängliga externa som går att ringa in och så vidare. Ett annat exempel är antalet reservtransformatorer, där nätinnehavaren har ett visst antal i eget lager, där det finns ytterligare transformatorer som normalt är tillgängliga att hyra/låna från närliggande nätägare – men inte nödvändigtvis om ett stort område påverkas av en allvarlig händelse samtidigt och närliggande nätägare behöver dem själv; sen kanske det finns reservkomponenter som ägs av samma koncern men på annan ort osv.

5.2.3 Hitta en god balans mellan kostnad och tillförlitlighet

Fler fallstudier som undersöker den svåra balansen mellan å ena sidan kostnadseffektivitet och å andra sidan hög tillförlitligheten skulle vara intressant att bedriva i samarbete mellan företag och universitet. Särskilt eftersom efterfrågan på pålitlig leverans av elektricitet med största sannolikhet kommer att öka i framtiden.

5.2.4 Ny RCAM-doktorand finansierad av Elforsk Riskanalysprogram

Kombinerad riskanalys av primär och sekundärutrustning. Sedan november 2012 Sajeesh Babu.

6 Referenser

- [1] Mielczarski W. (editor) et al, "Complex Electricity Markets", Warsaw, May 2006, ISBN 83-921636-7-2.
- [2] Mielczarski W. (editor) et al, "Development of Electricity Markets", Lodz, May 2005, ISBN 83-921636-2-1.
- [3] R. E. Brown and B. G. Humphrey, "Asset management for transmission and distribution", *Power and Energy Magazine*, IEEE, vol. 3, issue 3, pp- 39-45, May-June 2005.
- [4] C. J. Wallnerström, L. Bertling and Le Anh Tuan, "Risk and reliability assessment for electrical distribution systems and impacts of regulations with examples from Sweden", *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, vol. 1, pp. 87-95, 2010.
- [5] Billinton R., "Historic Performance-Based Distribution System Risk Assessment", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1759-1765, October 2004.
- [6] Janjic A. D. and Popovic D. S., "Selective Maintenance Schedule of Distribution Network Based on Risk Management Approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 597-604, May 2007.
- [7] Billinton R. and Allan R., *Reliability Evaluation of Power Systems*, New York, US (2nd Edition, Plenum) 1996.
- [8] Bertling L., "Reliability-Centered Maintenance for Electric Power Distribution Systems", Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), School of Electrical Engineering, ISBN 91-7283-345-9, Stockholm 2002.
- [9] Nordgård D. E. et al., "A Risk Based Approach to Distribution System Asset Management and a Survey of Perceived Risk Exposure Among Distribution Companies", the 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, 21-24 May 2007.
- [10] Neimane V., "On development planning of electricity distribution networks", Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), School of Electrical Engineering, Stockholm 2001.
- [11] C. J. Wallnerström and P. Hilber, "Vulnerability Analysis of Power Distribution Systems for Cost-effective Resource Allocation", *IEEE Transaction on Power Systems*, *IEEE Trans. on power systems*, vol. 27, pp. 224-232, 2012.
- [12] Moubray J., 1991, "Reliability-centred Maintenance" Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [13] A. von Mayer, "Electric Power Systems – a conceptual introduction", ISBN 978-0-471-17859-0, 2006.
- [14] L. Bertling, R. Eriksson, R. N. Allan, 2005, "A reliability-centred asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems" TPWRS-00271-2003.R3, *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [15] J. Nilsson, "On Maintenance Management of Wind and Nuclear Power Plants", Licentate Thesis, KTH, September 2009.

- [16] F. Besnard, "On Optimal Maintenance Management for Wind Power Systems", Licentate Thesis, KTH, November 2009.
- [17] P. Hilber, "Maintenance Optimization for Power Distribution Systems", Doctoral Thesis, TRITA-EE 2008:012, ISSN-1653-5146, ISBN 978-91-628-7464-3, EE, KTH, Stockholm, Sweden, Mars 2008.
- [18] J. Setréus, S. Arnborg, R. Eriksson, L. Bertling, "Components' Impact on Critical Transfer Section for Risk Based Transmission System Planning", Proceedings on IEEE PowerTech 2009 Conference, June 2009.
- [19] J. Setréus, "On Reliability Methods Quantifying Risks to Transfer Capability in Electric Transmission Systems", Licentiate Thesis, KTH, May 2009.
- [20] Lindquist T., "On reliability and maintenance modelling of ageing equipment in electrical power systems", Doctoral Thesis, TRITA-EE 2008:016, ISSN-1653-5146, ISBN 978-91-628-7465-0, EE, KTH, Stockholm, Sweden, April 2008.
- [21] P. Hilber, J. Rosenlind, "Prerequisites for Transformer Lifetime Modeling Towards a Better Understanding", PMAPS 2010, June 2010.
- [22] Hilber P., Miranda V., Matos M and Bertling L" Multiobjective Optimization Applied to Maintenance Policy for Electrical Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 22, No. 4, November 2007.
- [23] P. Hilber, C. J. Wallnerström, J Rosenlind, J Setréus and N. Schönborg, "Risk analysis for power systems - overview and potential benefits", CIRED Workshop, Lyon, France, June 2010.
- [24] Carl Johan Wallnerström, On Incentives affecting Risk and Asset Management of Power Distribution, Royal Institute of Technology (KTH), september 2011, PhD Thesis
- [25] P. Hilber, L. Bertling and B. Hällgren, "Effects of Correlation Between Failures and Power Consumption on Customer Interruption Cost," in Proc. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Stockholm, 2006.
- [26] C. J. Wallnerström and L. Bertling, "Learning from Experiences of the prior Swedish Electrical Distribution System Regulation – Reference Material when Developing the Future Regulatory Incentives", Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe 2010, Göteborg, Sweden, October 2010
- [27] C. J. Wallnerström and L. Bertling, "Laws and Regulations of Swedish Power Distribution Systems 1996-2010 – Learning from novel approaches as less good experiences", CIRED Workshop, Lyon, France, June 2010
- [28] C. J. Wallnerström and L. Bertling, "A Sensitivity Study of the Swedish Network Performance Assessment Model Investigating the Effects of Changes in Input Data", the 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, 21-24 May 2007

- [29] C. J. Wallnerström and L. Bertling, "Investigation of the Robustness of the Swedish Network Performance Assessment Model," *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 23, pp. 773-780, May 2008
- [30] C. J. Wallnerström, A. Isenberg, J. Setréus and P. Hilber, "The Potential of Using Equivalent Comparison Standards to judge Effectible Costs in Electrical Distribution Tariff Regulation", *CIED* 2011, June 6-9 2011, Frankfurt, Germany
- [31] C. J. Wallnerström, J. Hasselström, P. Bengtsson and L. Bertling, "Review of the Risk Management at a Distribution System Operator", 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), May 25-28 2008, Rincón, Puerto Rico
- [32] C. J. Wallnerström and L. Bertling, "Risk Management Applied to Electrical Distribution Systems", *CIED*, Prague, 2009
- [33] C. J. Wallnerström, J. Setréus, P. Hilber, F. Tong and L. Bertling, "Model of Capacity Demand under uncertain Weather", *PMAPS*, Singapore, June 2010
- [34] Ansökan doktorandprojekt: Kombinerad riskanalys av primär och sekundärutrustning, till Elforsk riskanalysprogram, inskickat hösten 2011
- [35] P. Hilber et. al. "Riskanalys för elkraftsystem, forskning vid KTH", *Elforsk rapport 10:101*, Nov 2010.
- [36] S. Stenberg, "Evaluating the detail level of reliability analyses used in the investment planning at Fortum Distribution AB", M.Sc. Thesis, KTH, 2012.
- [37] P. Wang and R. Billinton, "Reliability Cost/Worth Assessment of Distribution Systems Incorporating Time-Varying Weather Conditions and Restoration Resources," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, NO. 1, pp. 260-265, Jan. 2002.
- [38] S. Stenberg, "Evaluating the detail level of reliability analyses used in the investment planning at Fortum Distribution AB", M.Sc. Thesis, KTH, 2012.
- [39] R. Billinton and G. Singh "Application of adverse and extreme adverse weather: modelling in transmission and distribution system reliability evaluation," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol 153, pp. 115-120, Jan. 2006.
- [40] L. Bertling, R. Allan and R. Eriksson, "A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems," *IEEE Trans. on power systems*, vol. 20, pp. 72-82, Feb. 2005.
- [41] Y. Zhou, A. Pahwa and S. Yang, "Modeling Weather-Related Failures of Overhead Distribution Lines," *IEEE Trans. on power systems*, vol. 21, pp. 1683-1690, Nov. 2006.
- [42] A. Wang, Y. Luo, G. Tu and P. Liu, "Vulnerability Assessment Scheme for Power System Transmission Network Based on Fault Chain Theory, *IEEE Trans. on power systems*, vol. 26, pp. 442-450, Feb. 2011.
- [43] X. Yu and C. Singh, "A Practical Approach for Integrated Power System Vulnerability Analysis With Protection Failures," *IEEE Trans. on power systems*, vol. 19, pp. 1811-11820, Nov. 2004.

- [44] D. Reed, "Electric utility distribution analysis for extreme winds," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 123-140, 2008.
- [45] L. Fangxing and R. E. Brown, "A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, issue 1, pp. 439-441, Jan. 2004.
- [46] S. Stenberg, C. J. Wallnerström, P. Hilber and O. Hansson, "The new Swedish Regulation of Power Distribution System Tariffs: A Description and an Initial Evaluation on its Risk and Asset Management Incentives", NORDAC 2012, Espoo, Finland, 10-11 September 2012
- [47] D. Andrews and T. R. Moss, "Reliability and Risk Assessment", second edition, ISBN 1-86058-290-7, UK 2002.
- [48] S. Wagner and C. Bode, "Managing Risk and Security – The Safeguard of Long-Term Success for Logistics Service Providers", 1st Edition, Kuehne Foundation Book Series on Logistics Volume 16, Zurich, September 2009.
- [49] C. J. Wallnerström, P. Hilber and S. Stenberg, "A Pre-Study Towards Investigating the Art of Choosing Right Level of Input Data", PMAPS 2012, Istanbul, June 10-14, 2012
- [50] C. J. Wallnerström, P. Hilber and S. Stenberg, "Fault Management at a Distribution System Operator", PMAPS 2012, Istanbul, June 10-14, 2012
- [51] M. Bollen, "A vision on future research in electric power systems", Luleå University of Technology, Electric Power Engineering, May 2012

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se