

Innehållsförteckning

FRAMSIDA.....	1
SAMMANFATTNING.....	2
FÖRORD.....	3
INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	4
1. INLEDNING.....	6
1.1 BAKGRUND.....	6
1.2 SYFTE.....	6
1.3 METOD.....	7
1.3.1 Metodutförande.....	7
1.4 TILLFÖRLITLIGHET.....	8
2. ALLMÄNNA DEFINITIONER INOM TILLFÖRLITLIGHETSANALYS.....	9
2.1 ICKE REPARERBARA ENHETER.....	9
2.2 REPARERBARA SYSTEM.....	11
3 TILLFÖRLITLIGHETSANALYS PÅ ENKLA STRUKTURER.....	14
3.1 SERIELLSTRUKTUR.....	14
Exempel 1.....	15
3.2 PARALLELL STRUKTUR.....	16
Exempel 2.....	16
3.2.1 Redundans.....	17
3.3 K-AV-N-STRUKTUR.....	18
Exempel 3.....	18
4. VANLIGA LIVSFÖRDELNINGAR.....	19
4.1 NORMALFÖRDELNING.....	19
4.2 EXPONENTIALFÖRDELNING.....	20
4.3 WEIBULLFÖRDELNING.....	21
5. SYSTEMANALYS.....	22
5.1 STRUKTURMODELLER; VÄGAR, SNITT SAMT PIVOTERING.....	22
5.1.1 Vägar och snitt.....	22
5.1.2 Pivotering.....	24
5.2 KOMPONENTENS ”VIKT” I SYSTEMET.....	26
5.3 ANALYS AV MER KOMPLEXA NÄT.....	29
6. ANALYS AV ETT TÄNKT ELNÄT.....	32
6.1 SERIEKOPPLAT NÄT.....	33
6.2 INFÖRANDE AV REDUNDANS I EXEMPELNÄTET.....	35
6.3 RESERVDELSEFFEKT.....	37
Exempel 4.....	38
6.4 TILLGÄNGLIGHET.....	40
6.5 UNDERSÖKNING AV BEFINTLIG NÄTDEL HOS LUNDS ENERGI AB.....	42
6.5.1 Jämförelse av nätdelen med de modeller som studien tagit upp.....	44
7. NÄTNYTTOMODELLEN.....	45
7.1 INLEDANDE OM MODELLEN.....	45
7.2 ANALYSMODELLEN.....	46
7.2.1 Förenklingar i nätnyttomodellen.....	46

7.2.2 Analysen	47
7.2.3 Leveranskvalitetstillägg.....	48
7.2.4 Behov av reservkapacitet.....	49
SLUTSATSER	52
REFERENSER.....	53
APPENDIX 1.....	54
APPENDIX 2.....	55

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Idag utnyttjar förmodligen de flesta nätbolagen den erfarenhet och kunskap som finns inom företaget då det handlar om tillförlitlighet inom elnäten. Denna kunskap som de erfarna innesitter är givetvis till stor fördel för bolaget, men då tiderna förändras och kraven och konsumtionen ökar från kundens sida kan det vara av intresse att komplettera denna erfarenhet och känsla med någon form av modellering eller scheman.

Att använda sig av erfarenhet och traditioner behöver självfallet inte vara en dålig metod men genom att skaffa sig bra data över komponenternas tillförlitlighet utgör man en bra grund till att möjliggöra riskanalyser. Med hjälp av dessa riskanalyser kan framtida avbrott förutsägas eller kontrolleras.

I många fall saknas förmodligen en noggrannare uppföljning av felstatistik på komponentnivå, vilket leder till att riskanalysen blir mycket svårare eller helt enkelt omöjlig att genomföra.

Elforsk, som ägs av Svensk Energi och Svenska Kraftnät, har som uppgift att rationalisera forskning och utveckling inom branschen. De arbetar idag bland annat med ett projekt som heter ”Tillförlitlighetsdata på komponentnivå för riskanalys i eldistributionsnät”. Målet med detta projekt är bland annat att förbättra befintliga dataunderlag samt placera data efter viktighet med hjälp av risksimuleringar och känslighetsanalys. Att beräkna en komponents viktighet är något som denna studie bland annat kommer att ta upp.

Det finns en mängd liknande projekt som handlar om riskanalyser inom elkraftbranschen, vilket tyder på en intresseökning från bolagens sida att förändra/förbättra dagens sätt att se på dessa viktiga frågor.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att få läsaren bättre förstådd på de modeller och beräkningsmetoder som lämpar sig bra till analyser av ett elnät. Genom att studera detta arbete skall läsaren få tillräckligt med kunskap om det grundläggande arbetssättet, som jag tar upp, för tillförlitlighetsberäkningar. Då fördjupade kunskaper önskas finns en källförteckning, i slutet av arbetet, över det material som studerats. Detta arbete skall ses som en morot eller startpunkt till att, om så önskas, senare fördjupa sina kunskaper inom området.

1.3 Metod

1.3.1 Metodutförande

Ett flertal modeller finns att tillgå för analyser av tillförlitlighet. Ofta grundar sig modellerna på något datorprogram, då större system tenderar att bli så komplexa att handberäkningar blir för tidskrävande. Denna studie har inriktat sig på att förklara en modelleringsmetod som med hjälp av blockstruktur beskriver ett elnäts karaktär utifrån tillgänglighet. Studien är avsedd att inte behandla några datorprogram utan enbart den analytiska delen. Anledningen till att jag använder struktur/blockanalys är att jag anser att det är ett relativt enkelt och överskådligt sätt att modellera denna karaktär av system, elnät. Modelleringsmetoden är även återkommande och ofta använd i litteratur kring ämnet.

Runt omkring grundstruktureringen finns sedan ett antal metoder att utnyttja för att förenkla och förminska mer komplexa nät till ett enklare och mer lättarbetat system.

Studien börjar med att förklara några grundbegrepp, definitioner, kring tillförlitlighetsläran. Därefter följer en beskrivning av de enklaste strukturerna, seriellt, parallellt samt K-av-N struktur. I grund och botten kan man säga att med hjälp av dessa enkla strukturer kan vilket elnätssystem som helst konstrueras.

Sedan följer en beskrivning hur man kan förenkla de mer komplexa näten till något som blir mer tilltalande och lätthanterligt med hjälp av, framför allt, så kallade snitt och vägar.

Slutligen kommer ett figurerat elnät, men med verklig driftinformation, att analyseras utifrån de tillvägagångssätt som tidigare presenterats.

Arbetet kommer även att behandla nätnyttomodellen som Energimarknadsinspektionen idag använder för att kontrollera nätbolagens monopol. En övergripande orientering görs.

1.4 Tillförlitlighet

Ordet tillförlitlighet kommer att spela stor roll i detta arbete, därav är det avgörande att till en början definiera ordets betydelse så att läsaren och skrivaren talar samma språk. Tillförlitlighet kan tänkas ha varierande betydelser beroende på vem man frågar. Ordet är tänkt att beskriva funktionssäkerheten hos ett system, hur sannolikt det är att systemet är i bruk.

Tillförlitlighet är även vanligt att mäta som antalet fel under en viss tidsperiod. Ett typiskt nyckeltal hos nätföretagen är medelavbrottstiden per kund och år. Denna siffra ger en uppfattning om hur tillförlitligt elnätet i det gällande området är.

Att göra bra analyser av tillförlitligheten i ett system kan vara en väldigt komplex uppgift.

En del av svårigheterna med analyserna är att de grundar sig på statistik. Det är omöjligt att förutsäga att ett specifikt fel kommer att ske vid en specifik tid och plats. Däremot går det att med hjälp av statistisk data skapa en relativt god möjlighet till förutsägning av risker för ett visst fel inom ett specifikt område och tid.

Många parametrar är avgörande för eventuella händelser i elnätet såsom klimat, väderomställningar, åldrande material, stresspåverkan av komponenter i form av höga strömmar/spänningar, design m.m. Alla dessa faktorer gör att förutsägningar av eventuella händelser blir ett komplext problem och en bra modell är då en förutsättning. Dessa modeller kräver att approximationer av verkligheten tillåts. Oavsett hur bra analys den framtagna modellen bidrar till är det oundvikligt att fel ändå inte inträffar. Hur stabilt nätet än är så är vissa fel omöjliga att förutsäga. En gräventreprenör som gräver av en högspänningskabel för att han ej kontaktat nätbolaget innan eventuella grävningar påbörjas är ett typexempel på fel som nätbolagen inte själva kan råda över. Sabotage av anläggningar eller komponenter är även det något bolagen inte styr över, mer än att försvåra åtkomsten för brottslingen.

Det man strävar efter är att minska den tid de berörda parterna, kunderna, upplever felet, helst skall inte kunden uppleva något alls. För att det ska vara möjligt krävs ett intelligent system där en evig balans mellan ekonomi och tillförlitlighet ligger högt på dagordningen.

2. Allmänna definitioner inom tillförlitlighetsanalys

Vid bestämning av tillförlitligheten hos ett system finns ett antal funktionsmått som är bra att vara införstådd med.

Vanligtvis indelar man enheter i ett system som icke reparerbara och reparerbara.

Icke reparerbara enheter lever tills ett fel inträffar varav komponenten byts ut till en ny.

I ett system med reparerbara enheter utförs underhåll/reparation på den felande komponenten och man får då ta hänsyn till underhållstider då komponenten är ur drift. Det vanliga är att systemkomponenterna är reparerbara. Det skulle vara alldeles för dyrt att byta ut en felande komponent mot en ny var gång den felar. Det skulle även innebära ett större lager med reservkomponenter, vilket kostar pengar.

2.1 Icke reparerbara enheter

Att ett system helt består av icke reparerbara enheter är relativt orealistiskt. Enstaka komponenter av denna typ i ett system är dock inte ovanligt. I ett elsystem är vissa typer av säkringar icke reparerbara komponenter. En säkring fungerar ofta så att det ledande materialet blir överbelastat av exempelvis en kortslutning och bränns då av så att kretsen bryts. En ny enhet ersätter då den trasiga och systemet blir åter aktivt. Denna typ av komponent kallas då icke reparerbar.

Låt T definiera livslängden för en komponent. T är en stokastisk variabel, livslängden är slumpmässigt beroende på faktorer som design, material och exempelvis i vilket klimat komponenten är aktiv inom. [1]

$F(t)$ beskriver sannolikheten för att komponenten inte överlever t tidsenheter. Funktionen kallas ofta för fördelningsfunktion. [1]

$$P(T \leq t) = F(t)$$

Inte sällan är man mer intresserad av komponentens överlevnadsfunktion, $R(t)$. $R(t)$ är då sannolikheten att komponenten överlever t tidsenheter. [1]

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t)$$

Andra viktiga driftsäkerhetsmått är felfrekvens, sannolikhetstäthet, och felbenägenhet.

$f(t)$, felfrekvensen, är ett mått på sannolikheten att en komponent som sätts i bruk vid tiden $t = 0$ felar inom tidsintervallet $(t, t + \Delta t)$ [1]

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = -R'(t) = \frac{d}{dt} (1 - R(t))$$

Felbenägenheten å andra sidan beskriver hur troligt det är att enheten felar inom tidsintervallet $(t, t + \Delta t)$ förutsatt att $t \neq 0$ och att enheten överlevt t tidsenheter.

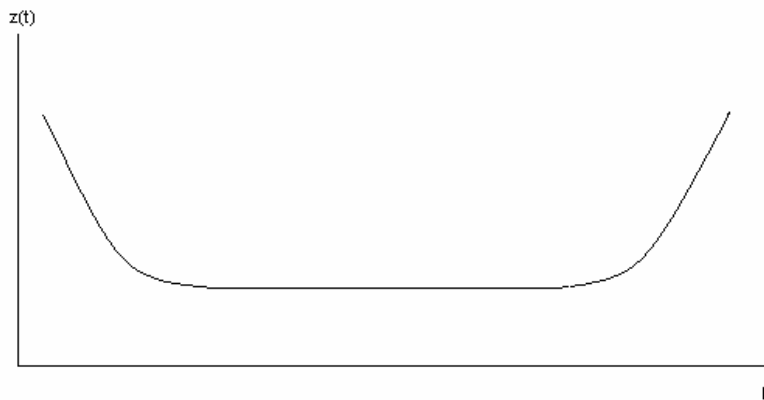
Det går att visa att då $\Delta t \rightarrow 0$ får den betingade sannolikheten [1]

$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$ ett gränsvärde

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)},$$

$z(t)$ = felbenägenheten.

Ett typiskt utseende för felbenägenheten hos en komponent är den s.k. badkarskurvan, Figur 1



Figur 1. Badkarskurva

Felbenägenheten är relativt stor just vid nyinstallation av enheten. Komponenten sägs normalt ha en inkörningsperiod då den lättare felar. Felbenägenheten planar sedan ut med tiden och blir nästintill konstant. Allteftersom komponenten åldras, utsätts för stressmoment och slits försämras dess förmåga att utföra uppgiften den är avsedd för och sannolikheten för fel ökar, därav får kurvan ett utseende som liknar badkarskurvan i Figur 1. [1]

Ännu ett mått som kan vara av stort intresse vid eventuell planering av underhållsschema eller liknande är medeltid till fel (MTTF-mean time to failure)

Medeltid till fel definieras som [1]

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$
$$f(t) = -R'(t)$$
$$\Rightarrow MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{om vi antar att } MTTF < \infty)$$

Vid bestämmandet av driftsäkerhetsmått har det antagits att felen hos komponenterna är oberoende varandra. Detta antas även fortsättningsvis i rapporten om inget annat sägs.

2.2 Reparerbara system

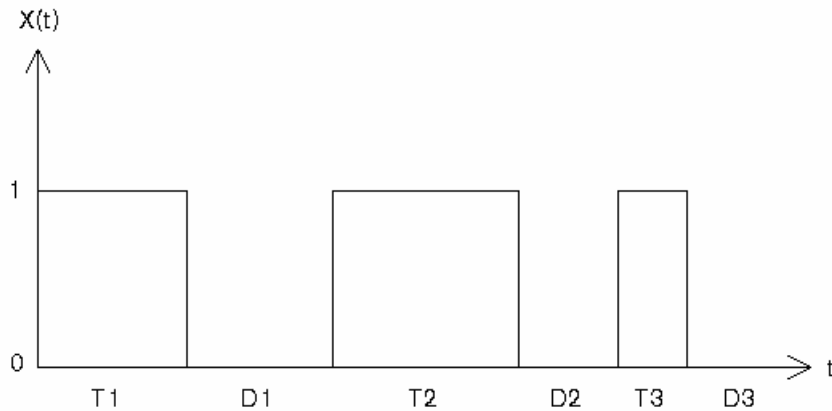
I detta fall görs underhåll eller reparation på en felande komponent. Komponenten får då en s.k. ”Down time”, en tid då den inte fungerar, vilken måste tas hänsyn till. Tiden till första felet, som är livstiden då man talar om icke reparerbara enheter, är inte lika relevant i detta fall. Felbenägenheten är av större intresse, även kallad ROCOF (rate of occurrence of failure) [3]

Man brukar skilja på olika typer av underhåll; Förnyelsemodell och minimal reparation och däremellan ett antal olika varianter. Denna rapport tar upp de två extrema fallen vilket innebär full reparation och minimal reparation. [3]

Förnyelsemodellen innebär att en fullständig genomgång av enheten görs. Det är vanligt att man efter underhållet säger att komponenten är ”as good as new” och att den då kan antas ha en liknande felbenägenhet som om komponenten vore utbytt till en ny. [3]

Minimal reparation innebär som ordet säger att reparation/underhåll görs på enheten som är trasig men att enheten återställs till ett skick som liknar det den hade precis innan felet skedde. (Fördelen med denna reparation kan vara att systemet snabbt är uppe i aktivt läge, men att man får vara förberedd på att en förnyelsereparation bör göras inom kort.) [3]

En illustration av tillstånden som kan antas för en komponent som är reparerbar ses i Figur 2. Livstiderna T_1 , T_2 och T_3 och reparationstiderna D_1 , D_2 , D_3 är representerade i figuren och de antas båda vara oberoende och identiskt fördelade.



Figur 2. Tillstånd för reparerbara komponenter

Med reparerbara system talar man om tillgänglighet av systemet. Då reparationer inte tas hänsyn till kan det inte talas om tillgänglighet i samma bemärkelse. Det går inte att beräkna en eventuell medeltillgänglighet i form av exempelvis tid/år då komponenterna inte repareras. I och för sig kan utbytestiden för en icke reparerbar komponent ses som någon form av reparation eller underhåll och då kan liknande beräkningar göras.

Medellivstiden för den reparerbara komponenten är den förväntade tiden till fel, MTTF. Likaså är medeltiden för reparation även den förväntade tiden, MTTR, Mean Time To Repair.

Med hjälp av dessa tider kan en medeltillgänglighet beräknas genom [1]

$$A_{av} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

MTTF, skall helst vara så stor som möjligt medan MTTR eftersträvas att vara så låg som möjligt. Detta innebär att det finns mycket att tjäna i form av tillgänglighet om ett välplanerat underhållsschema finns att tillgå. Ett snabbt och effektivt underhåll leder till bättre tillgänglighet för systemet vilket även leder till nöjdare kunder. Man inser lätt hur komplext arbetet med tillgänglighet/tillförlitlighet blir då det beror på så många fler parametrar än vad man kan tänka sig. Effektiv, kunnig och erfaren personal både inom planering av

själva nätet samt underhållspersonal m.fl. bidrar alla till att hålla en god och tillfredsställande tillgänglighet för kunderna.

Låt oss nu, lite enkelt, se vad redundans kan göra åt systemets tillgänglighet, redundans återkommer även senare i arbetet. Anta att denna kan kopplas in och ur momentant när ett fel sker i en komponent. Detta skulle innebära, rent hypotetiskt, att medeltillgängligheten blir 100 % i och med att en fungerande komponent kopplas in parallellt med den felande komponenten, vilket leder till att underhåll/reparation kan göras utan att påverka systemfunktionen [1].

3 Tillförlitlighetsanalys på enkla strukturer

Strukturen på ett elnät kan mycket enkelt representeras som seriellt- parallellt eller en kombination av de båda. Då systemen växer i storlek och dess komplexitet ökar blir tillförlitlighetskalkyler svårare och svårare att utföra. Ett elnät består av en oerhört stor mängd komponenter som alla skall beaktas om en exakt analys ska genomföras. Alla komponenter har sin egen livsfördelning vilken är beroende av många faktorer. Allt detta innebär att för att det ska vara möjligt att överhuvudtaget genomföra en systemanalys måste approximationer göras. Mer komplexa nät tas upp i kapitel 5.3 Analys av mer komplexa nät. Detta kapitel beskriver exakta tillförlitlighetsmetoder som bygger på enkla nätmodeller.

3.1 Seriellstruktur

Antag n komponenter, oberoende felbenägenheter. Karakteristiken för ett seriellt system består av att alla n komponenterna måste fungera för att systemet skall fungera [1].

Låt X_i beteckna komponent i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Tillståndsvektorn $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$

Systemets struktur, $\Phi(\mathbf{X})$, kan då skrivas som

$$\Phi(\mathbf{X}) = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n = \prod_{i=1}^n X_i$$

Om sannolikheten för funktion av enheten är, $P_i(t)$, får vi en sannolikhet för att systemet fungerar som följande;

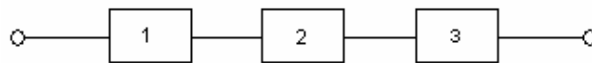
$$P_s(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

Exempel 1.

Systemet i Figur 3 är ett seriesystem av tre oberoende komponenter med en sannolikhet för funktion $P_i(t) = 0.98$ för alla tre komponenterna.

Systemets tillförlitlighet blir då följande

$$\Phi(\mathbf{X}) = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$
$$\Rightarrow P_s = 0.98 \times 0.98 \times 0.98 = 0.94$$



Figur 3. Seriekoppling av tre komponenter

3.2 Parallell struktur

Antag som tidigare n komponenter. För att systemet skall fungera i en parallellkoppling måste *minst* en komponent vara aktiv. Följande systemstruktur fås för denna struktur [1];

$$\Phi(\mathbf{X}) = 1 - (1 - X_1) \cdot (1 - X_2) \cdot \dots \cdot (1 - X_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) = \prod_{i=1}^n X_i$$

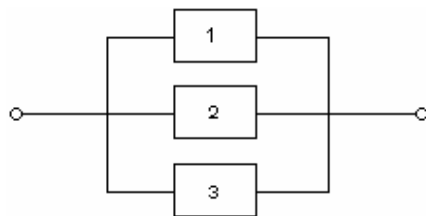
Denna struktur ger då en sannolikhet enligt;

$$P_s(t) = 1 - (1 - P_1(t)) \cdot (1 - P_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_n(t)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t))$$

Exempel 2.

Systemet i Figur 4 har nu tre komponenter parallellkopplade med varandra. Med samma förutsättningar som i exempel 1 fås följande systemstruktur och sannolikhet för systemdrift

$$\begin{aligned}\Phi(\mathbf{X}) &= 1 - (1 - X_1) \times (1 - X_2) \times (1 - X_3) \\ \Rightarrow P_s &= 1 - (1 - 0.98) \times (1 - 0.98) \times (1 - 0.98) = 0.99\end{aligned}$$



Figur 4. Parallellkoppling av tre komponenter

Det visar sig att sannolikheten för funktion med ett parallellkopplat system blir avsevärt mycket bättre än vid seriekoppling, särskilt då systemet växer i storlek. Parallellstruktur kan jämföras med redundans i elnätet.

3.2.1 Redundans

Ett enkelt och vanligt sätt att skapa tillförlitlighet är i form av redundans. Redundans innebär att det finns överskottskapacitet. Enklaste exemplet är att man har två parallella matningar till samma lastpunkt där den ena är aktiv och den andra är inaktiv (n-1 kriterium), jämför med

n-2 kriterium som innebär att två komponenter kan falla bort samtidigt som systemet är intakt [1]. Den inaktiva kan snabbt kopplas in om något fel uppstår på den aktiva och man får då en alternativ väg för energin. Underhåll kan sedan utföras på den felande matningen utan att kunden upplever något bortfall.

Det finns här en balans mellan tillförlitlighet och ekonomi. Den inaktiva matningen i exemplet ovan kan drabbas av ett fel innan felet i den första matningen är åtgärdat och strömavbrottet är då ett faktum. Innebär detta att bolaget skall designa nätet med mer redundans? Är kunden villig att betala för den extra säkerheten? Svaren på dessa frågor beror delvis på vem kunden är. Som nämnts tidigare kan ett strömavbrott innebära katastrofala situationer, därför betalar vissa kunder extra för en ökad säkerhet.

Redundans uppdelas i två kategorier, aktiv och inaktiv. Aktiv redundans innebär att exempelvis två komponenter delar på lasten vilket betyder att varje komponent belastas till hälften av totala lasten. Tag som exempel att en nätstation för ett visst område är utrustad med två transformatorer som delar på den totala effekten området kräver. Transformatorerna är då oftast anpassade så att de klarar den totala lasten var för sig om någon av de två skulle fela. Detta ger stora fördelar då kunderna kopplade till nätstationen slipper ett eventuellt strömavbrott, som skulle vara ett faktum om inte redundansen fanns i form av två parallella transformatorer.

Inaktiv redundans innebär, om exemplet med transformatorerna i nätstationen igen antas, att de båda transformatorerna inte samtidigt är aktiva. Den ena av dem kopplas snabbt in om något sker med den som är aktiv. På så vis upplever inte kunden något annat än på sin höjd en blinkning i lampan på grund av det fel som inträffat.[2]

Att använda sig av parallella transformatorer i nätstationerna är ovanligt då dessa komponenter är väldigt dyra samt har en hög drifttillgänglighet, på högre spänningsnivåer är det dock vanligt att använda sig av parallella transformatorer. Däremot är det vanligare att nätföretagen använder sig av så kallade maskade elnät. Maskat elnät är en form av redundans.

3.3 K-av-n-struktur.

K-av-n-struktur skiljer sig från serie och parallellstruktur på så vis att för ett fungerande system skall minst ett antal, K, av totala antalet n komponenter vara fungerade. I övriga fall är systemet ur bruk. Vidare är ett seriesystem av formen n-av-n-struktur och ett parallellsystem av 1-av-n-struktur.[3] [5]

Systemstrukturen för ett k-av-n-system ges av

$$\Phi(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1 & \text{om } \sum_{i=1}^n X_i \geq k \\ 0 & \text{om } \sum_{i=1}^n X_i < k \end{cases}$$

Exempel 3

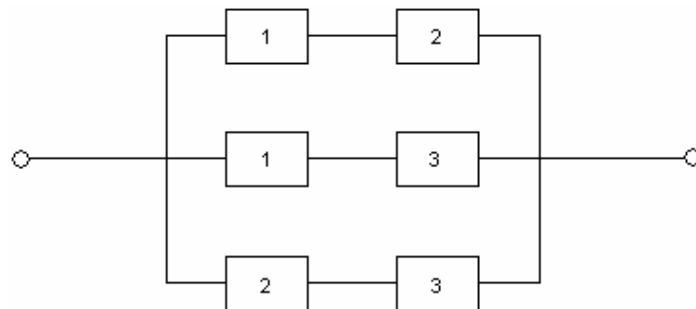
I

Figur 5 är systemet ett k-av-n-system, närmre bestämt ett 2-av-3-system.

Strukturfunktionen för denna modell kan ges i form av

$$\Phi(\mathbf{X}) = X_1 \cdot X_2 \coprod X_1 \cdot X_3 \coprod X_2 \cdot X_3 = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_3 - 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

i och med att varje komponent antar antingen 1, fungerande, eller 0, felande, blir $X_i^k = X_i$ för alla i och k. [3] [5]



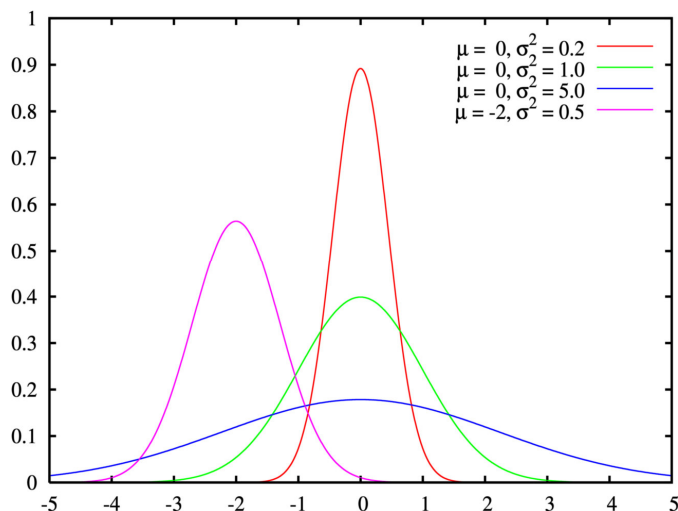
Figur 5. 2-av-3 struktur

4. Vanliga livsfördelningar

En livsfördelning beskriver utfallet av en viss händelse på ett speciellt sätt. För att det ska vara matematiskt möjligt att beskriva en process, och därav kunna utföra tillförlitlighetsberäkningar, så behöver verkligheten modelleras. Genom att utföra tester och insamla data angående beteendet hos en viss komponent eller ett visst system får man den information som modellen skall grunda sig på.

4.1 Normalfördelning

Antag, som exempel, att vi undersöker längden på ett antal människor. Resultatet av denna undersökning kommer med allra högsta sannolikhet att likna något i stil med Figur 6. Värdena för denna undersökning kommer att fördela sig kring ett väntevärde.



Figur 6. Normalfördelning med olika väntevärden samt varianser.

Denna fördelning kallas normalfördelning och karakteriseras av väntevärdet μ samt variansen σ . Väntevärdet är som ordet säger ett förväntat värde. Variansen beskriver hur mycket kurvan avviker i förhållande till väntevärdet. Man kan säga att den beskriver hur "utsmetad" kurvan är. Normalfördelningen är den av fördelningarna som är mest känd. Den matematiska beskrivningen av sannolikhetsstätheten är följande;

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{för } -\infty < t < \infty$$

Är en livslängd normalfördelad brukar den betecknas som $N(\mu, \sigma)$.

I de enkla strukturerna som tidigare presenterats har systemets sannolikhet för funktion betecknats $P_s(t)$, alltså finns ett tidsberoende.

Exponentialfördelningen och Weibullfördelningen är två vanligt förekommande fördelningar, inom elektronikkomponenter, som används till att beskriva komponentens livsfördelning.

Vid bestämmandet av vilken livsfördelning som kan låtas approximera den verkliga behövs bra analyser av livstidsdata. Detta arbete tar inte upp metoder för att analysera livstidsdata. För studier kring detta hänvisas till källhänvisningen, exempelvis [2].

4.2 Exponentialfördelning

Anta att tiden till fel, T , är exponentialfördelad med parametern λ . Detta ger följande driftsäkerhetsmått;

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \text{ där } \lambda \text{ konst} > 0 \text{ och } t > 0$$

$$R(t) = P(T > t) = e^{-\lambda \cdot t}, t > 0$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda$$

Man ser här att felbenägenheten inte beror av tiden. Detta faktum är viktigt att inse då det innebär att en använd enhet kan betraktas som om komponenten vore ny. Exponentialfördelningen har alltså inget minne. Med andra ord innebär det att det inte lönar sig att byta ut en gammal enhet. [3]

En av anledningarna till att exponentialfördelning används är att den är matematisk enkel att modellera med. Den är även i många fall en bra modell av tiden till fel. [5]

4.3 Weibullfördelning

Exponentialfördelning påvisade en konstant felbenägenhet hos komponenten. Låt säga att komponentens felbenägenhet liknar badkarskurvans utseende, i det fallet skulle en approximation med exponentialfördelning inte vara godtagbar som fördelning.

Weibullfördelningen är en variant av exponentialfördelningen men med vissa skillnader.

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - e^{-(\lambda \cdot t)^\alpha}, t > 0$$

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \alpha \cdot \lambda \cdot (\lambda \cdot t)^{\alpha-1} \cdot e^{-(\lambda \cdot t)^\alpha}$$

$$R(t) = e^{-(\lambda \cdot t)^\alpha}, t > 0$$

$$\Rightarrow \text{felbenägenheten, } z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \alpha \cdot \lambda \cdot (\lambda \cdot t)^{\alpha-1}$$

Här ser man att då formparametern $\alpha = 1$ fås $z(t) = \lambda$ vilket innebär exponentialfördelat.

$\alpha > 1$ ger en felbenägenhet som ökar med tiden

$0 < \alpha < 1$ ger en felbenägenhet som minskar med tiden

Detta ger Weibullfördelningen stora möjligheter att anpassas till ändamålet då man har både skalparametern λ och formparametern α som möjligheter att justera livsfördelningen till att likna komponentens i fråga.[3]

5. Systemanalys

Detta kapitel tar upp analyser av större system än vad tidigare presenterats. Det finns olika metoder att tillgå för att bryta ner stora komplexa system till mer överskådliga enkla system. Några av dessa tas upp nedan. Strukturmodellering är en effektiv metod för att analysera exempelvis elnät, därav tar arbetet enbart upp en sådan modellering. Övriga modeller, för att exempelvis styra produktionsflödet så att det resulterar i komponenter med god driftsäkerhet och tillgänglighet, är FMEA, felmods-och-feleffektsanalys. Denna typ av analys kräver väldigt goda kunskaper och stor kännedom kring alla steg i processen för att kunna genomföras med gott resultat.[5]

Felträdsanalys är en annan typ av modellering där man beskriver möjliga händelseförlopp från en icke önskvärd händelse hos systemet. Man kallar denna typ av analys för en ”top-down” teknik, vilket helt enkelt innebär att man utgår från systemfelet och tar sig sedan ner till komponentnivån utifrån de olika vägar som kan tänkas uppstå.[5]

5.1 Strukturmodeller; vägar, snitt samt pivotering

5.1.1 Vägar och snitt

Ett system som består av enbart relevanta komponenter och som är monotont kallas koherent system.

Exempel på icke monotont system [1]

- Två generatorer i ett system
- Systemet överbelastas om båda generatorerna är i aktivt läge

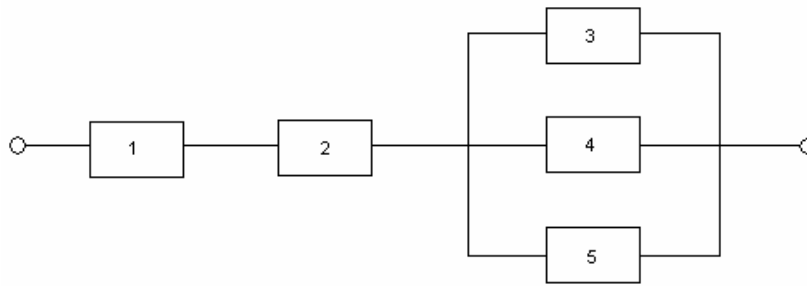
Som tidigare nämnts kan system representeras som serie- eller parallellstruktur.

En annan strukturrepresentation är s.k. ”vägar” eller ”avbrott”. Strukturen grundar sig i serie och parallellkopplingar.

En väg är en kombination av komponenter som genom att vara i funktion säkerställer att systemet fungerar. En väg som har egenskapen att så snart en hel komponent går sönder så uppstår systemfel kallas för minimal väg.

Ett avbrott, även kallat snitt, är en kombination av komponenter som genom att fela får systemet att gå ur funktion. Ett snitt kallas minimalt snitt om det inte kan reduceras utan att förlora sin egenskap som snitt [3] .

Exempelnät för vägar och snitt ges i Figur 7



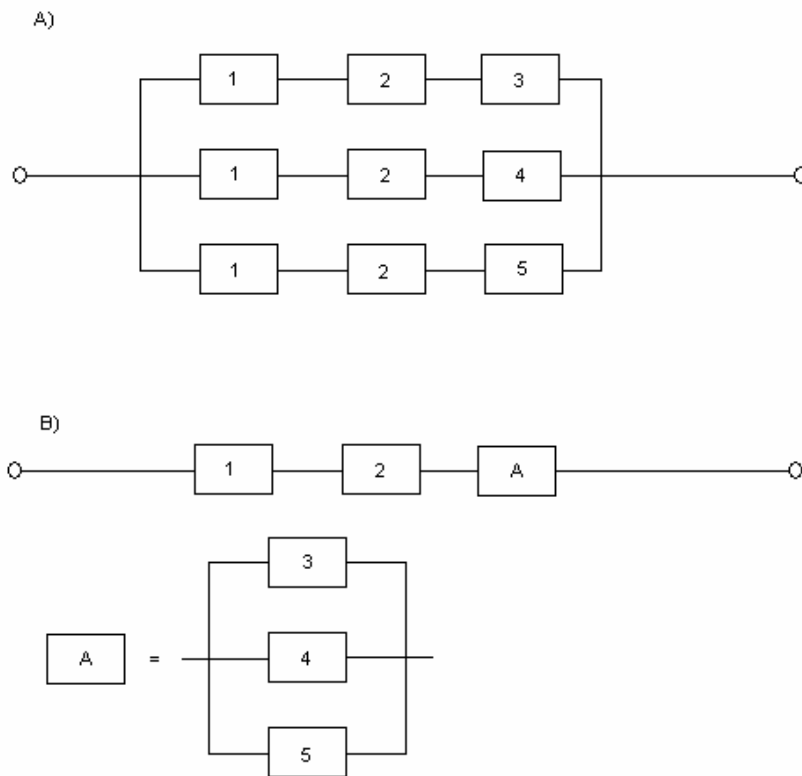
Figur 7. Exempelnät för vägar och snitt

Tabell 1 nedan visar några av de vägar och snitt som är möjliga i systemet illustrerat i Figur 7. Alla snittmöjligheter är inte medtaget då de blir ganska många, men de minimala vägarna och minimala snitten är de intressanta.

Tabell 1. Vägar och snitt. Minimala vägar och snitt markeras med *

Vägar	Avbrott
$\{1,2,3\}^*$	$\{1\}^*$
$\{1,2,4\}^*$	$\{2\}^*$
$\{1,2,5\}^*$	$\{1,2\}$
$\{1,2,3,4\}$	$\{1,2,3\}$
$\{1,2,3,5\}$	$\{1,2,3,4\}$
$\{1,2,4,5\}$	$\{1,2,3,4,5\}$
$\{1,2,3,4,5\}$	$\{3,4,5\}^*$
	mfl

Systemet i Figur 7 kan nu representeras som antingen ett system av minimala vägar eller av minimala snitt, illustreras i Figur 8.



Figur 8. A) Minimala vägar. B) Minimala snitt

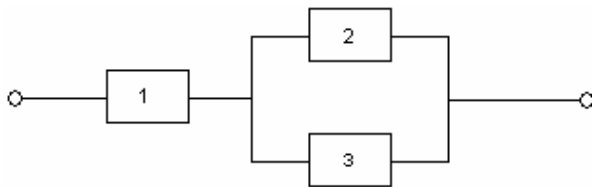
Här syns tydligt att då systemet representeras av vägar blir strukturen av parallellmodell medan då minimala snitt beaktas fås en seriestruktur av systemet.

5.1.2 Pivoting

Ofta handlar systemanalyser om nedbrytning och omvandling till enkla strukturer som är lättare att analysera och förstå än det man startade med. Pivoting är en typ av omvandling från en struktur till en annan. Ett system med n komponenter kan analyseras som ett system av $n-1$ komponenter genom att studera två olika fall. Det ena är att systemet är ur bruk och det andra att system är i funktion [5]. Detta kan ses som att komponenten antingen ersätts med en säker ledning eller med ett brott [1]. Systemstrukturen blir då

$$\Phi(\mathbf{X}) = X_i \times \Phi(1_i, \mathbf{X}) + (1 - X_i) \times \Phi(0_i, \mathbf{X})$$

där $\Phi(1_i, \mathbf{X})$ betecknar en godtycklig tillståndsvektor där komponent i fungerar och $\Phi(0_i, \mathbf{X})$ är en godtycklig tillståndsvektor där komponent i inte fungerar.[5]
Denna struktur är alltid gångbar i vilket system som än skall representeras.
Figur 9 får representera ett exempel nät där pivotering genomförs. Då pivotering kring komponent tre antas ersätts denna komponent antingen med en säker ledning, vilket leder till att det ekvivalenta systemet blir ett system av enbart komponent ett, eller med ett avbrott som ger ett ekvivalent system med komponent ett och två i serie.[1]



Figur 9. Exempel för pivotering

5.2 Komponentens ”vikt” i systemet

Att kunna avgöra hur viktig en komponent är i ett system kan vara av väsentligt intresse för exempelvis underhållspersonal. Finner man en särskild betydelse för en viss typ av komponent kan man med fördel lagerhålla fler av dessa för att undgå eventuella icke önskvärda händelser. En sådan metod skulle då innebära stora fördelar för att kunna bibehålla god systemtillförlitlighet.

En metod för att avgöra tillförlitlighetsvikten hos en specifik komponent presenteras nedan.

Anta ett system av n komponenter där $P_i(t)$ är tillförlitligheten för komponent i vid tiden t , då gäller att systemtillförlitligheten är en funktion av $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ och systemets tillförlitlighet är

$$\Phi(\mathbf{P}(t)) = \Phi(P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t))$$

Komponentens betydelse ges då av

$$I^B(i|t) = \frac{\partial \Phi(\mathbf{P}(t))}{\partial P_i(t)} \text{ för } i = 1, 2, \dots, n$$

om $I^B(i|t)$ är stor innebär det att en liten förändring av tillförlitligheten för komponent i resulterar i en relativt stor förändring av systemtillförlitligheten vid tiden t . [1]

Låt säga att systemet som skall undersökas är av en enkel seriellstruktur till en början, Figur 10.



Figur 10. Seriestruktur av två komponenter.

Komponenterna är oberoende varandra och antas ha följande sannolikhet för att vara tillgängliga;

$$P_1 = 0.98$$

$$P_2 = 0.96$$

$$\Rightarrow \Phi(P_1, P_2) = 0.98 \cdot 0.96$$

Genom att utnyttja ovanstående idé ges följande "vikt" för vardera komponenten i systemet;

$$I^B(1|t) = \frac{\partial \Phi(P_1, P_2)}{\partial P_1} = P_2 = 0.96$$

$$I^B(2|t) = \frac{\partial \Phi(P_1, P_2)}{\partial P_2} = P_1 = 0.98$$

$\Rightarrow$ Komponent 2 är mer avgörande i denna struktur, vilket är logiskt i ett seriesystem, där den minst pålitliga komponenten blir den högst avgörande för funktion i och med att systemfunktion endast är tillgängligt då samtliga komponenter är tillgängliga.

I detta specifika fall är det självklart vilken komponent som är av största vikt för funktion, men vid mer komplex analys kan det vara svårt eller omöjligt att direkt avgöra vilken komponent som är av största vikt för systemfunktion.

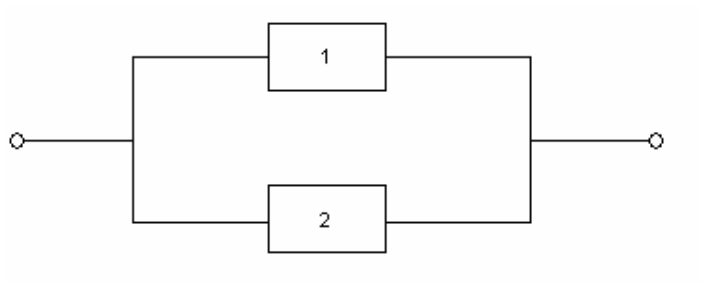
Analyseras istället ett system av parallellstruktur, Figur 11, med samma förutsättningar som i exemplet ovan fås med hjälp av samma metod följande resultat.

$$\Phi(P_1, P_2) = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0.9992$$

$$I^B(1|t) = \frac{\partial \Phi(P_1, P_2)}{\partial P_1} = 1 - P_2 = 0.04$$

$$I^B(2|t) = \frac{\partial \Phi(P_1, P_2)}{\partial P_2} = 1 - P_1 = 0.02$$

⇒ Komponent 1 har större betydelse för detta system. Allmänt kan sägas att i en parallellkoppling är den högst tillförlitliga komponenten den viktigaste i och med att systemet fungerar då *minst* en komponent fungerar.



Figur 11. Parallell struktur av två komponenter

5.3 Analys av mer komplexa nät

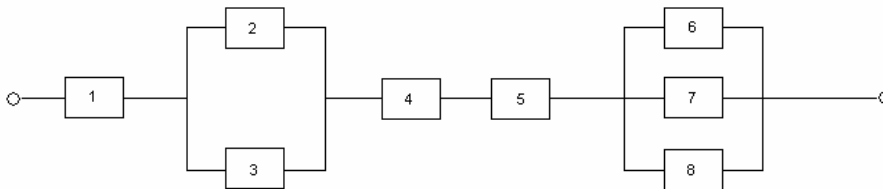
En effektiv metod för att analysera systemtillförlitligheten hos ett mer komplext system är den s.k. minimala snittmetoden som tidigare tagits upp. Detta arbete kommer att inrikta sig på denna metod vid mer komplexa analyser då metoden är kraftfull och relativt enkel att förstå och följa i dess olika steg.

Genom att dela upp nätet i minimala snitt kan hela systemet sedan representeras som ett seriesystem av de minimala snitten, vilket är en tillfredsställande representation.

Låt säga att ett nytt elnät ska analyseras ur tillförlitlighetssyn.

Första steget blir då att ta fram de minimala snitt som representerar nätet. Systemet i Figur 12 får vara exempel nätet som skall analyseras. Varje numrerad box motsvarar en komponent i ett nät. Vid komplexa analyser är det nödvändigt att införa vissa avgränsningar [1]

- Hur detaljerat ska nätet vara, vilka delar skall tas med?
- Vilka olika drifttillstånd skall tas med?
- Miljöaspekter?
- Externa faktorer såsom sabotage, klimat osv.



Figur 12. Exempelnet

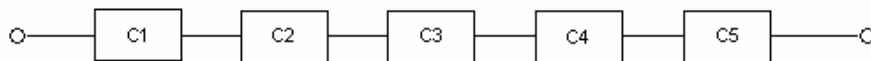
För enkelhetens skull antas systemets drifttillstånd vara antingen uppe eller nere. Inga yttre faktorer eller miljöaspekter antas i kommande exempel om inget annat sägs.

I Figur 12 kan man ganska enkelt se att de minimala snitten blir $\{1\}, \{2,3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,7,8\}$ men då systemet växer kan det bli omöjligt att direkt ta ut de minimala snitten enbart genom att titta på nätet, en systematisk metod löser detta problem.

Följande metod härleder minimala snitt [1]

1. Härled minimala vägar
2. Härled alla snitt av första ordningen för väg 1, dvs. alla komponenter som ingår i vägen.
3. Härled alla snitt av första ordningen för väg 2 och kombinera dessa för varje möjlig sätt med alla snitt för väg 1. Eliminera dubblerade kombinationer, icke minimala snitt och snitt av högre ordning än vad som efterfrågas.
4. Tag nästa väg och kombinera alla av dess första ordnings snitt med de som återstår efter steg 3. Eliminera snitt på samma vis som i steg 3
5. Upprepa steg 4 tills alla vägar beaktats.

Om denna metod används för att härleda minimala snitt för systemet i Figur 12, blir resultatet givetvis som tidigare nämnts. Härledningen av de minimala snitten kan följas i Appendix 1. De minimala snitten är funna för systemet och kan representeras som modellen i Figur 13, där $C1 \rightarrow C5$ motsvarar de minimala snitten.



Figur 13. Seriesystem av minimala snitt

Följande metoder beräknar systemtillförlitligheten approximativt genom två förenklingar.[1]

1. Försumma att fler än ett snitt felar samtidigt, detta ger en sannolikhet för systemfel, Q_s , ($Q_s = 1 - R_s$), enligt följande

$$Q_s \approx P(C_1) + P(C_2) + \dots + P(C_n) = \sum_{i=1}^n P(C_i)$$

Systemet enligt Figur 13 får då följande utseende

$$Q_s = Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \cdot Q_7 \cdot Q_8$$

$$\text{om } R = 0.98 \Rightarrow Q = 0.02$$

Antag att alla komponenterna har samma funktionssannolikhet, R

$$\Rightarrow Q_s = 0.060408$$

$$\Rightarrow R_s = 0.939592$$

Låt oss nu jämföra resultatet från den approximerade lösningen med en exakt lösning.

En exakt lösning av systemet i Figur 13 har följande systemtillförlitlighet, R_s

$$R_s = R_1(R_2 \coprod R_3)R_4R_5(R_6 \coprod R_7 \coprod R_8) = \\ R_1(R_2 + R_3 - R_2R_3)R_4R_5(R_6 + R_7 + R_8 - R_6R_7 - R_6R_8 - R_7R_8 + R_6R_7R_8) = 0.940808$$

Jämförs det exakta resultatet med det approximativa blir skillnaden

$$\Delta R_s = 0.940808 - 0.939592 = 0.001216 \approx -0.12\%$$

Detta innebär att approximationen tidigare är en bra approximation då förändringen av systemtillgång inte är mer än en tiondels procent. Man kan även se att den ger en underskattning av sannolikheten för systemtillförlitlighet.

2. Den andra approximationen bygger på att en viss ordning av minimala snitt försummas.

Antag att snitt av ordning två eller högre försummas. Det innebär för systemet i Figur 13 att följande minimala snitt, $\{2,3\}$, $\{6,7,8\}$ inte är med i räkningarna.

$$Q_s = Q_1 + Q_4 + Q_5$$

med samma förutsättningar för komponenterna blir sannolikheten för funktion av systemet, R_s

$$R_s = 1 - Q_s = 1 - (Q_1 + Q_4 + Q_5) = 0.940000$$

$$\Rightarrow \Delta R_s = 0.940808 - 0.940000 \approx -0.08\%$$

Denna approximation fungerar bäst då de ingående komponenterna har felsannolikheter i samma storleksordning [1]

6. Analys av ett tänkt elnät.

Denna del är tänkt att analysera ett enklare elnät med verklig data om de ingående komponenterna. Data i Tabell 2 är hämtade från Lunds energi AB och är feltillfällen registrerade sedan 2003 (lågspänningsdelarna) samt 2004 (högspänningsdelarna).[Lunds Energi, Mikael]. Senare skall även en del av ett befintligt elnät vid Lunds Energi studeras.

Tabell 2. Driftinformation för vissa nätkomponenter, Lunds Energi AB

Komponent	Total längd/antal (km)/(st)	Antal fel	Antal fel per år	Antal fel per år och km/st, λ
Kabel, lågspänning	1183	16 fel på 3.75 år	4.27	0.0036000
Kabelskåp	4355	2 fel på 3.75 år	0.53	0.0001220
Kabel, högspänning	477	12 fel på 2.75 år	4.36	0.0091000
Lasfrånskiljare, nätstation	1200	4 fel på 2.75 år	1.45	0.0012000
Transformatorer	Ca 400	Antar 1 fel per 2000 transformatorår	0.0005	0.0000013

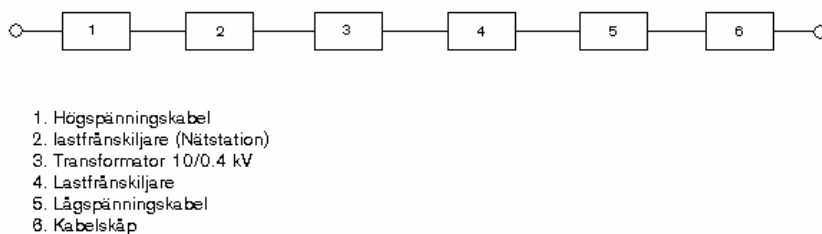
För komponenter som transformatorer finns ingen feldata registrerad. I detta fall antas en felintensitet enligt ovan. Transformatorer har väldigt hög driftstillgänglighet därav det låga antagandet för fel hos komponenten.

Med hjälp av data i Tabell 2 kommer ett antal olika nätkonfigurationer att analyseras. Dessa olika nätkonfigurationer kommer förhoppningsvis att vara till hjälp vid en eventuell nyplanering av ett elnät. Strukturerna är väldigt enkla men för att beräkningar och metoder skall vara överskådliga, för en läsare som intresserar sig för de grundliga begreppen, är det fullt tillräckligt.

6.1 Seriekopplat nät

För enkelhetens skull analyseras ett rent seriekopplat nät till en början. En radiell högspänningskabel är kopplad till en nätstation som består av en lastfrånskiljare på ingången, därefter transformatorn och slutligen en lastfrånskiljare på utgången av nätstationen. En radiell lågspänningskabel från nätstationen är sedan kopplad till ett kabelskåp. Därefter kan det kopplas upp kunder via kabelskåpet, men i detta fall är dem inte medtagna.

Systemet kommer då att ha utseendet enligt Figur 14. Antag att längderna på kablarna är fem kilometer högspänningskabel samt tio kilometer lågspänningskabel. Dessa längder kommer att gälla för samtliga kommande exempel.



Figur 14. Seriellt exemplnät

Själva analysen för systemet i Figur 14 är enkel, då den enbart består av seriekopplade moduler. Det är viktigt att vara införstådd på att exemplet inte tar hänsyn till eventuella reparationstider.

Komponenterna är inte beroende av varandra, vilket innebär att eventuella fel inte sprids i strukturen.

Då felbenägenheten är konstant kan komponenternas livslängd antas vara exponentialfördelade. Detta antagande leder till följande tillförlitlighetsmått.

$$R_n(t) = e^{-\lambda_n t} \text{ där } n \text{ representerar } n\text{:te komponenten, } n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$Q_n(t) = 1 - R_n(t) = 1 - e^{-\lambda_n t}$$

Tabell 3 presenterar sannolikheten för var komponents överlevnad $R_n(t)$ och sannolikheten för komponentfel, $Q_n(t)$, över en årsperiod.

Tabell 3. Statistik på komponenterna i figur 10.

Komponent	$R_n(t) = e^{-\lambda \cdot t}$	$Q_n(t) = 1 - R_n(t)$
1. Högspänningskabel (5 km)	0.9555	0.0445
2. Lastfrånskiljare	0.9988	0.0012
3. Transformator	0.9999	0.0001
4. Lastfrånskiljare	0.9988	0.0012
5. Lågspänningskabel (10 km)	0.9646	0.0354
6. Kabelskåp	0.9999	0.0001

En tillförlitlighetsanalys med exakt metod skulle i detta fall leda till följande uttryck.

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 = 0.9193$$

Sannolikheten för systemfel med denna struktur är alltså

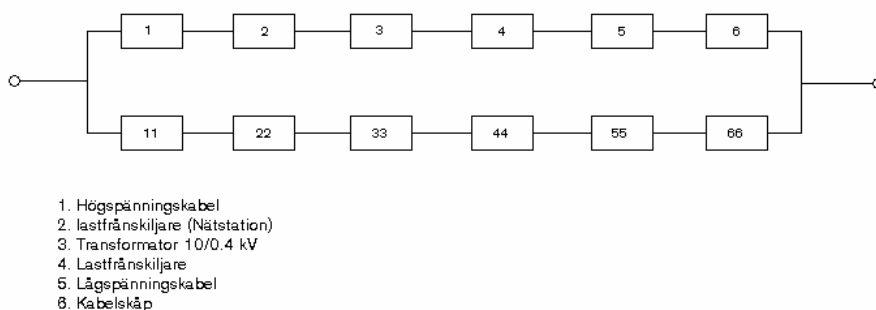
$Q_s = 1 - R_s = 1 - 0.9193 = 0.0807$, vilket innebär att det är ungefär åtta procents sannolikhet att systemet är obrukbart under ett års tidsintervall.

Lägg märke till att denna metod inte säger något om hur bra tillgänglighet systemet representerar, alltså hur lång tid systemet är ur bruk under denna tidsperiod. Detta är något som tas upp senare i arbetet, då reparationstider även tas i beaktande och det då blir tal om tillgänglighet i form av tid/år.

Tillbaka till seriesystemet. Det är förhållandevis god tillförlitlighet på detta system, men då man strävar efter hundra procent är denna siffra långt ifrån godtagbar. Systemet är även extremt känsligt då ingen redundans finns tillgänglig, oavsett vilken komponent som faller ur bruk så leder det till systemfel.

6.2 Införande av redundans i exempelnätet

Seriesystemet i Figur 14 är inte hållbart vilket leder till införande av redundans. Två olika konfigurationer kommer att redovisas, redundans på systemnivå samt redundans på komponentnivå, och därefter undersöka eventuella skillnader. Redundans på systemnivå innebär helt enkelt att det införs ett identiskt nät parallellt med det befintliga nätet. Strukturen kommer då att få utseendet enligt Figur 15.



Figur 15. Systemredundans av systemet i Figur 14.

Komponenterna märkta med dubbla siffror motsvarar komponenten med enkelsiffra.

Det som gjorts nu är en dubblering av samtliga komponenter i systemet samt infört dessa parallellt med det befintliga systemet. I ett verkligt elnät vore en sådan lösning orealistisk med tanke på kostnaderna det skulle innebära. Över mindre delar av ett system är det dock fullt realistiskt att införa denna typ av redundans.

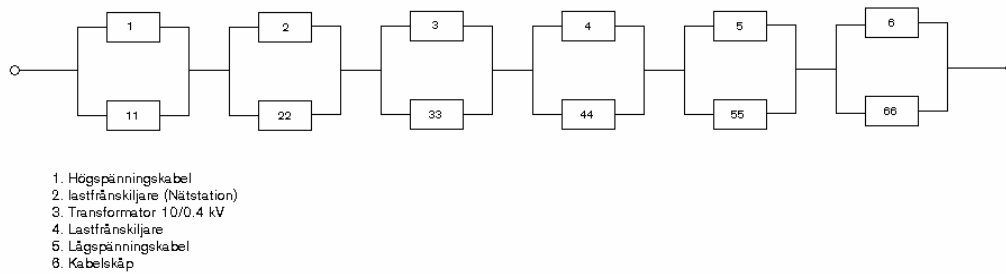
Systemtillförlitligheten blir nu följande

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 + R_{11} \cdot R_{22} \cdot R_{33} \cdot R_{44} \cdot R_{55} \cdot R_{66} - R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot R_{11} \cdot R_{22} \cdot R_{33} \cdot R_{44} \cdot R_{55} \cdot R_{66} = 0.9935$$

Vad som är tydligt, och förväntat, är den förbättrade sannolikheten för systemfunktion jämfört med det rent seriella. En förbättring med nästan 7.5 procentenheter gav införandet av redundans på systemnivå.

En intressant jämförelse som nu ska göras är att istället införa denna reserv på komponentnivå.

Systemet i Figur 16 representerar det nya nätet med komponentredundans.



Figur 16. Komponentredundans

En analys av tillförlitligheten för systemet i Figur 16 ger följande resultat.

$$R_s = (R_1 + R_{11} - R_1 \cdot R_{11}) \cdot (R_2 + R_{22} - R_2 \cdot R_{22}) \cdot \dots \cdot (R_6 + R_{66} - R_6 \cdot R_{66}) = 0.9968$$

Jämförs nu detta resultat med resultatet av redundans på systemnivå ser man att det lönar sig att införa komponentredundans. Förbättringen är marginell, 0.3 procent, men det är dock en förbättring. Systemet är även stabilare än tidigare, ett fel på någon komponent för systemet i Figur 15 får övriga radiellt kopplade komponenter att falla bort. Detta blir inte fallet då komponentredundans utnyttjas. Ovanstående gäller generellt, att det lönar sig att införa redundans på komponentnivå.[3]

För att underlätta räkningarna för systemet i Figur 16 kan den approximerade formeln användas, som togs upp under 5.3 Analys av mer komplexa nät.

$$Q_s = Q_1 \cdot Q_{11} + Q_2 \cdot Q_{22} + Q_3 \cdot Q_{33} + Q_4 \cdot Q_{44} + Q_5 \cdot Q_{55} + Q_6 \cdot Q_{66} = 0.0032$$

$$\Rightarrow R_s = 1 - Q_s = 0.9968$$

Det visar sig bli exakt samma resultat i detta fall. Vid noggrannare beräkningar med fler värdesiffror skulle det dock visa sig att det finns en viss felmarginal mellan den approximerade och exakta lösningen som nämnts tidigare i arbetet.

6.3 Reservdelseffekt

Tidigare infördes redundans för att förbättra tillförlitligheten. Redundansen var s.k. aktiv då de parallella komponenterna delade på belastningen. Något som inte nämnts än är effekten av reservdelslager.

Antag för något system att en uppsättning av reservdelar är tillgängliga. I och med antagandet med konstant felbenägenhet, λ , kan komponenternas livslängd approximeras som exponentialfördelade.

Då konstant felbenägenhet är aktuellt kan en räkneprocess även kallad Poisson-fördelning användas.[2][5]

Låt $P_x(t)$ vara sannolikheten för att fel uppträder x gånger i intervallet $(0, t)$.

Följande tillförlitlighetsmått gäller för Poisson;

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} = P_0(t)$$

$$Q(t) = 1 - R(t)$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

För multipla fel i tidsintervallet ges följande kompletta Poisson fördelning

$$P_x(t) = \frac{(\lambda \cdot t)^x \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{x!}$$

I detta fall antas att då flera fel inträffar sker inget bortfall av systemet mellan felen, vilket kan vara en relativt bra approximation om reparationstiderna anses väldigt låga i förhållande till medeltiden till fel.[2][5]

Väntevärdet för Poisson fördelningen är $E(x) = \lambda \cdot t$

Detta medför följande utseende för den kompletta formeln

$$P_x(t) = \frac{\mu^x \cdot e^{-\mu}}{x!} \text{ där } \mu = E(x)$$

Exempel 4.

Låt säga att en undersökning av sannolikheten för antalet fel på högspänningskabeln under en viss tidsperiod skall göras.

Enligt Tabell 2 är medelantalet fel per år per kilometer för denna komponent 0,0091. Antag att en viss längd, fem kilometer, av denna kabel skall undersökas och sannolikheten för 0,1,2 osv fel för en 10 års period skall tas fram.

Följande fås med hjälp av Poisson;

$$\lambda = 5 \times 0.0091 = 0.0455 \text{ fel/år}$$

För en tio års period fås följande väntevärde

$$E(x) = 0.0455 \times 10 = 0.455$$

Detta leder till följande uppskattning

$$P_x(t) = \frac{0.455^x \cdot e^{-0.455}}{x!} \text{ för } x = 0,1,2,\dots$$

Tabell 4 presenterar sannolikheten för x antal fel under en tio års period.

Tabell 4. Sannolikhet för x antal fel under en tio års period

Antal fel/tidsperiod	x = 1	x = 2	x = 3	x = 4
$P_x(t)$	0.289	0.065	0.001	0.001

Med hjälp av denna tabell kan det beslutas hur många reservkomponenter som kan behövas för denna tidsperiod. Beroende på hur hög tillförlitlighet som önskas kan man ur Tabell 4 se att det är en sannolikhet av 0,1 % för fyra fel under denna tio års period, vilket innebär att om det önskas garaderas mot denna sannolikhet krävs åtminstone 4 reparationer eller utbyten av denna komponent.[2][5]

Med hjälp av de modeller som tagits upp i detta kapitel kan en planerare relativt enkelt undersöka vad en förändring i nätkonfigurationen innebär för tillförlitligheten.

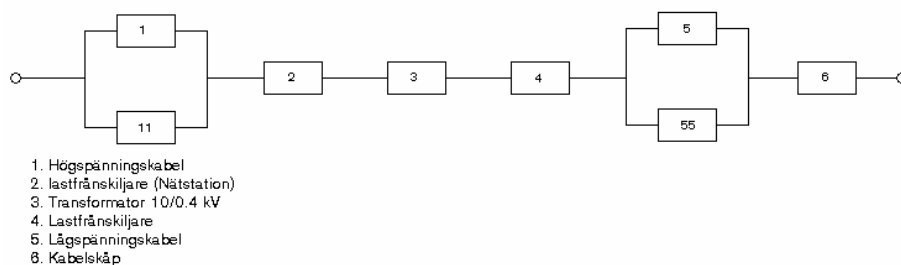
Om vi än en gång tittar på Figur 14 och anammar oss att ett seriesystem aldrig är starkare än den svagaste länken kommer snabbt idén att någon redundans eller förändring i modulerna krävs.

Redundans innebär kostnader och kostnader innebär ökade nättariffer för kunderna. Med detta i beaktande är det relativt orealistiskt att skapa redundans på samtliga komponenter i systemet. Då priserna på de olika komponenterna varierar kraftigt kan en kostnad för ökning av tillförlitligheten variera kraftigt beroende på hur den planeras.

I fallet med Figur 14 kan en bra start vara att börja med att titta på de svagaste länkarna i systemet. I detta fall är det högspännings- och lågspänningskablarna.

Låt säga att redundans införs genom att parallellkoppla dessa.

Systemet får då utseende enligt Figur 17.



Figur 17. Redundans införd på hög- och lågspänningskablarna

Beräkning av systemtillförlitligheten ges av resultatet nedan.

$$R_s = (R_1 + R_{11} - R_1 \times R_{11}) \times R_2 \times R_3 \times R_4 \times (R_5 + R_{55} - R_5 \times R_{55}) \times R_6 = 0.99418$$

Skillnaden mellan systemet med redundans på samtliga komponenter och detta system är inte stor, det är till och med bättre än att införa systemredundans, sett till enbart tillförlitlighet.

Då man enbart ser till den procentuella sannolikheten för ett systemfel är det ingen vinst i att exempelvis parallellkoppla två transformatorer med varandra, då dessa komponenter har så pass hög tillförlitlighet och är väldigt dyra i förhållande till övriga komponenter, men det kan tänkas existera andra skäl till en sådan investering. Ett eventuellt bortfall av en transformator ställer säkerligen till mer

problem och längre avbrottstider, för kunderna, än vad ett bortfall av en ledning gör.

Genom att införa förändringar i nätkonfigurationen så som illustrerats i exemplen ovan kan en nätplanerare försöka matcha en bra balans mellan ekonomi och tillförlitlighet.

En fråga som säkert dyker upp i dessa sammanhang är huruvida en optimal lösning existerar, om det finns en optimal balans mellan ekonomi och tillförlitlighet. Denna fråga anser jag vara så gott som omöjlig att ge ett svar på. Antalet faktorer som påverkar vårt system är så många, om allt som kan ske tas med, att det är mycket möjligt att det finns ett flertal konfigurationer som kan antas vara optimala. Optimal lösning kan omfatta olika betydelser beroende på vem man frågar.

För ett nätföretag kan det tänkas vara att systemet är hundra procent tillgängligt och inga fel, som leder till bortfall för kunden, inträffar. Detta är förmodligen orealistiskt då det skulle innebära att inga oplanerade fel inträffar, företaget skulle kunna förutse alla möjliga fel. Blixtnedslag, stormar, gräventreprenörer som gräver av kablar, oförutsedda slitage på komponenter m.m. skulle vara planerade händelser, vilket är orealistiskt.

6.4 Tillgänglighet

Tidigare modeller har inte tagit hänsyn till reparationstider utan det har antagits att den tiden är försumbar i förhållande till medeltiden mellan fel. Då man tar reparationstiden i beaktande är det även möjligt att genomföra tillgänglighetsberäkningar. Med en medeltillgänglighet, $A(t)$ kan man avgöra eventuell tid som systemet kommer att vara ur bruk. De tidigare beräkningarna har gett sannolikheter för systemfel men inte sagt något om hur lång tid systemet är otillgängligt. Om enheten inte repareras blir sannolikheten för tillgänglighet vid en viss tidpunkt, t , samma som sannolikheten för överlevnad, $A(t) = R(t)$. [1][4]

Medeltillgängligheten ges av

$$A_{av} = \frac{E(T)}{E(T) + E(D)} = \frac{MTTF}{MTTF + MDT}$$

där MTTF är medeltiden till fel och MDT är medeltiden för komponenten ur bruk, Mean Down Time. MDT kan även beskrivas som medeltiden för reparation, MTTR.

Antag att komponenterna är reparerbara med oberoende upp-tider och exponentialfördelad livslängd med felintensitet λ . Antag även att ner-tiderna är oberoende och exponentialfördelade med parametern μ .

Detta ger följande uttryck för medeltiden mellan reparation och medeltiden mellan fel.

$$MTTR = MDT = \frac{1}{\mu}$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

$$\Rightarrow A_{av} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu}$$

Tabell 5. Medeltillgänglighet för komponenterna i systemen.

Komponent	MTTF (h) (ungefärliga värden)	MTTR (h) (antagna värden)	A, tillgänglighet
1. Högspänningskabel (5 km)	190000	2	0,9999
2. Lastfrånskiljare	7300000	2	0,9999
3. Transformator	Väldigt stort!	10	0,9999
4. Lastfrånskiljare	7300000	2	0,9999
5. Lågspänningskabel (10 km)	240000	2	0,9999
6. Kabelskåp	73000000	3	0,9999

Med hjälp av värdena i Tabell 5 kan nu tillgängligheten för systemet beräknas.

Tillgängligheten för systemen i Figur 14, Figur 15, Figur 16 och Figur 17 redovisas i Tabell 6.

Anledningen till de extremt långa tiderna, MTTF, beror på det faktum att den driftdata som bearbetats är något bristfällig då den insamlats under en relativt kort period, sen 2003 och 2004. Det blir då något felindikerande värden på felintensiteten i Tabell 2 i och med att så många fel inte har hunnit inträffa under den korta tiden som felen loggats.

Tabell 6. Tillgänglighet för de olika systemen tidigare upptagna.

System	Tillgänglighet, A_s, h/år
Rent seriellt, Figur 14	$A_s = 0.9994 \Rightarrow \text{Bortfallet} \approx 5h / \text{år}$
Systemredundans, Figur 15	$A_s = 0.9999 \Rightarrow \text{Bortfallet} \approx 1h / \text{år}$
Komponentredundans, Figur 16	$A_s = 0.9999 \Rightarrow \text{Bortfallet} \approx 1h / \text{år}$
Delvis redundant, Figur 17	$A_s = 0.9996 \Rightarrow \text{Bortfallet} \approx 3.5h / \text{år}$

Tabellen visar tydligt skillnaden i tillgänglighet mellan de olika systemen. Som väntat ger de redundanta systemen ett mer kvalitativt nät för kunden.

6.5 Undersökning av befintlig nätdel hos Lunds Energi AB

Detta avsnitt är tänkt att undersöka en befintlig del av Lunds Energi elnät. Genom att studera detta, se Figur 18, skall systemets tillförlitlighet för slutkunden analyseras. Här ges en mer övergripande syn på vart eventuella brister och styrkor ligger i nätet.

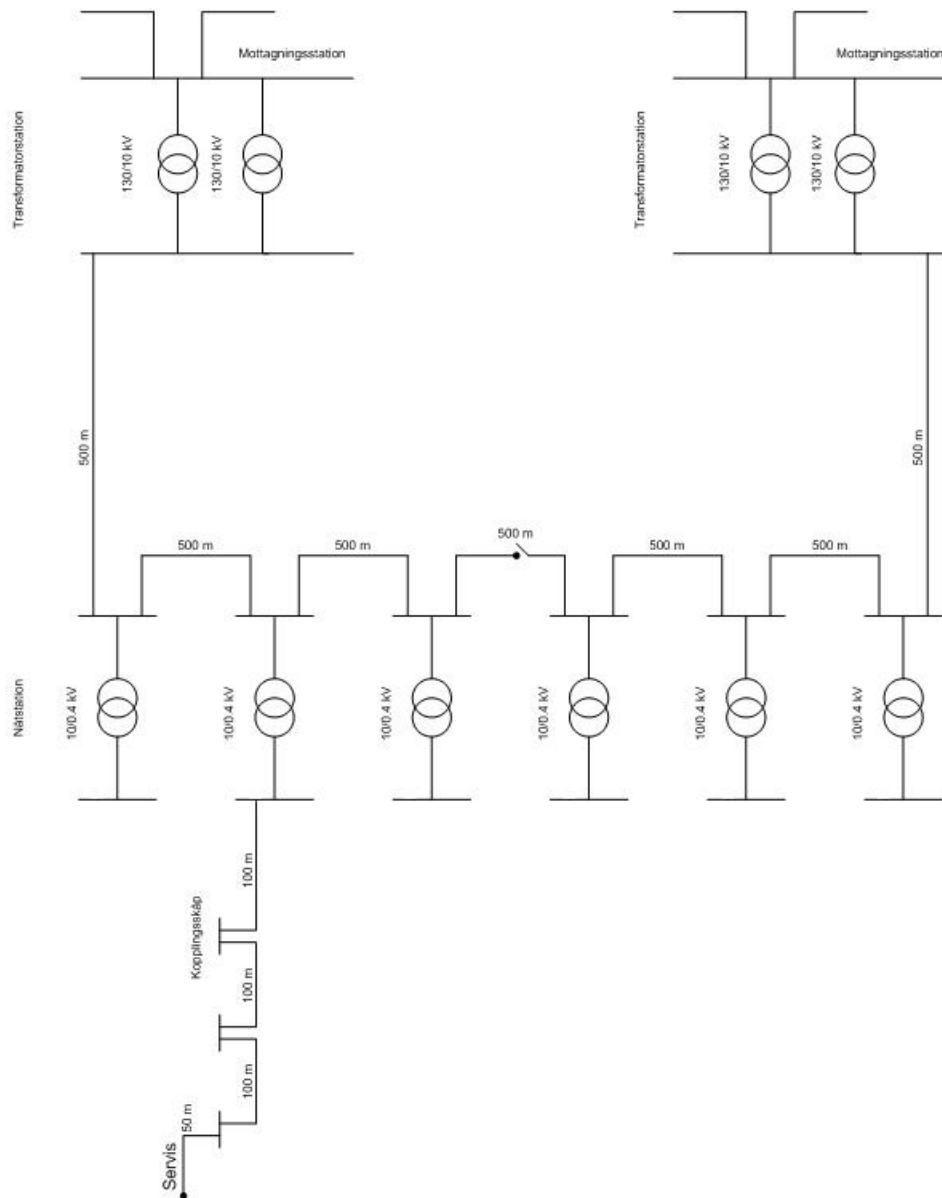
Lunds stadsnät består nästintill uteslutande av kabel. Detta minskar felexponeringen för exempelvis väderomställningar, skadegörelser osv. i jämförelse med luftledning. Högspänningsdelarna är till större delen planerade med slingor matade från antingen en mottagningsstation med flera skenor, eller från olika mottagningsstationer. Nätdelen i Figur 18 beskriver fallet med två olika mottagningsstationer. Nätstationen samt lågspänningsnätet är radiellt, nätstationen består således av en transformator. Lastfrånskiljarna i nätstationerna är av gasisolerad typ.

För att lösa eventuella bortfall av kunder vid fel har Lunds Energi möjligheten att snabbt införa dieselgeneratorer där felet uppkommit, vilket medför att underhåll/reparation kan utföras utan att kunden står utan ström.

Mellan de två tänkta områdena finns en sektionering, en öppen jordkabelförbindelse, som kan utnyttjas vid bortfall av någon mottagningsstation.

Om denna förbindelse sluts matas hela systemet av en mottagningsstation, och underhåll/reparation kan göras på den felande delen av den andra stationen.

Fel antas inte fortplanta sig uppåt i systemet.



Figur 18. Nät, Lunds Energi AB

I denna representation av nätet har enbart en lågspänningsdel tagits i beaktande. Då dessa är radiella och kan anses som oberoende varandra spelar det ingen roll om alla lågspänningsdelar är med eller ej.

6.5.1 Jämförelse av nätdelen med de modeller som studien tagit upp.

Den nätstruktur som systemet i Figur 18 presenterar har i många fall likheter med de modeller som tidigare tagits upp under Kap 6. Det finns redundans i systemet i form av åtminstone två olika vägar att leverera den energi slutkunden kräver, vilket uppfyller n-1 kriteriet. Enda flaskhalsen är lågspänningsdelen, som är radiell. Här finns givetvis en balans mellan ekonomi och tillförlitlighet. Lunds Energi löste detta problem med mobila dieselgeneratorer som kunde sättas i bruk vid fel. Detta är ett alternativ, men det finns möjligheten att använda sig av maskade, eller slingor, även i denna del av nätet.

Lågspänningskablar har dock ofta lägre felfrekvens än högspänningskablar samt det faktum att färre kunder förmodligen drabbas vid fel på lågspänningsnivå. Detta resonemang ger grund till användandet av radiella lågspänningsnät. [8]

7. Nätnyttomodellen

Detta kapitel skall sammanfatta grunderna i den s.k. nätnyttomodellen.

Nätnyttomodellen är en modell som används av energimarknadsinspektionen för att kontrollera bla eldistributionsföretag. Varje nätföretag har monopol på sitt område, vad det avser elnätet, vilket har lett till att det ansetts naturligt med någon form av kontroll på dessa områden.

Beräkningar som modellen gör ligger till grund för att bedöma om företaget tar ut skäliga nättariffer av sina kunder genom att bestämma en s.k. debiteringsgrad.

Nätnyttomodellen är en komplex modell vars arbete startade 1998. Modellen är utvecklad av så gott som enbart en man, Mats B-O Larsson, på uppdrag av Statens energimyndighet. På grund av dess komplexitet har jag i detta arbete inriktat mig på att undersöka själva modellerandet samt analysmodellen då dessa delar mest anknyter till detta examensarbete. En fullständig granskning och genomgång av nätnyttomodellen skulle förmodligen resultera i ett eget examensarbete enbart det, därför har jag valt denna avgränsning.[6]

7.1 Inledande om modellen

Nätnyttomodellen gör det möjligt att analysera ett nätbolags leveranskvalité, i förhållande till vad kunden får betala, ”utifrån sett” snarare än en ingående granskning ”inifrån sett”. Med detta menas att modellen inte bryr sig om detaljer kring *hur* leveransen av energin löses till varje specifik kund, utan enbart vilken avgift kunden betalar samt vilken geografisk koordinat kunden befinner sig vid. Kopplingspunkter till regionnätet är även av intresse för modellen. Varje in och urkopplingspunkt måste alltså koordinatsättas. [6]

Leveranssäkerheten mäts i form av antalet avbrott och vilken varaktighet dessa har.

Med hjälp av indata från nätbolagen skapas ett radiellt referensnät. Detta nät förbinder alla kunder med varandra genom en radiell anslutning. Ett skäl till att modellera på detta sätt, vilket skaparen av modellen även tar upp är relativt realistiskt, är att man ville visa ett sätt att upprätta en anslutning som bland annat är ledningssnålt. I glesbygden är det för visso inte ovanligt att kunden är ansluten radiellt men då tätorten modelleras är det väldigt ovanligt att kunden inte har någon form av redundans att utnyttja vid eventuella avbrott. Ett annat skäl för att modellera radiellt är att modellen förenklas avsevärt, vilket givetvis underlättar genomförandet av beräkningar. [6]

Att modellera ett elnät utan att ta hänsyn till reservnät, redundans, vore direkt felaktigt då det skulle innebära kraftigt längre avbrottstider och ett ökat antal drabbade kunder vid avbrott. Nätnyttomodellens lösning på detta är att med hjälp av schablonfunktioner, som beräknats genom analyser av exempelnett, ta fram vilket behov av reservledningar ett visst nät behöver, givet vilken täthet det befinner sig i. Detta reservnät ses i modellen som ett icke inkopplat nät och är enbart en ”hög” av ledningar samt transformatorer som bolaget själva kan disponera som de önskar. [6]

7.2 Analysmodellen

Som tidigare nämnts och som modellen nämner är det direkta samband som finns mellan reservkapacitet och leveranssäkerhet. Även vikten av kompetent personal och erfarenhet väger in tungt då det talas om leveranssäkerhet. Framtagandet av reservkapacitet är komplext och det leder till att söka efter en optimering av kapaciteten. Som nämnts under kap Analys av ett tänkt elnät. är en optimering extremt komplext och det är mycket möjligt att ett flertal kombinationer är optimala. Nätnyttomodellen har med anledning av detta använt sig av en s.k. Monte-Carlo simulering. Enkelt förklarar denna simulering som ett bombardemang av fel på de ingående komponenterna i nätet. Felens fördelning efterliknar verklighetens så gott den kan. Med hjälp av detta kan en avbrottstid och bortfall av levererad energi och effekt beräknas hos kunden. I ett radiellt nät blir alla kunder anslutna till ledningen direkt drabbade, oavsett om de ligger uppströms eller nedströms. I modellen räknar man dock med en viss fränkopplingsmöjlighet så att antalet drabbade, vid fel, kan reduceras till att enbart blir de som är anslutna nedströms felet.

Fördelningen av förekomsten av underhåll och fel är beskrivna med hjälp av Weibullfördelningen. [6]

7.2.1 Förenklingar i nätnyttomodellen

En viktig förenkling, som visat sig underlätta beräkningarna i de tidigare upptagna modellerna i denna studie, är att inga samtidiga fel antas. Detta innebär att felen är oberoende varandra, vilket i verkligheten inte alltid är fallet. [6]

Fel- och underhållsfrekvenser antas vara linjärt beroende av ledningens längd, vilket inte helt överensstämmer med verkligheten då ledningar har kopplingsutrustning i ändarna som inte behöver vara längdberoende. Reservnätet som beräknas förenklas genom att bestämma sig för enbart en ledningsdimension, ledningarna i referensnätet är dock dimensionerade att klara den högsta belastningen som kan uppstå under årets gång.

Förenklingar ger givetvis konsekvenser, det kan aldrig bli en exakt modellering av verkligheten, men för att det ska vara genomförbart att utföra beräkningarna är förenklingarna ett måste. Mats B-O Larsson skriver ”Modellens uppgift är inte att avbilda verkligheten. Snarare är det verkligheten som på sikt bör anpassas till att dimensioneras mer effektivt”. Detta underlättar givetvis bruket av förenklingar. [6]

7.2.2 Analysen

Själva analysen består av fem olika steg på fyra olika nätnivåer. Nätnivå fyra omfattar områden med spänningar mellan 130 - 70kV, nivå tre 50 – 20kV, nivå 2 20 - 0,6kV samt nivå 1 0,4kV.

1. Detta steg omsätter den inrapporterade statistiken från nätbolagen till en total avbrottskostnad.[6]
2. Här utförs nu bombardemanget av fel på referensnätet, som skall efterlikna nätets utsättning för fel under cirka 100 år. Med hjälp av de schablonkostnaderna som framtagits med avseende på vilken nätnivå samt abonnenttätet som råder vid felet kan nu välfärdsförlusterna beräknas. Detta ger då en uppfattning om hur stora förlusterna blir då nätet inte har någon redundans utan enbart är radiellt.[6]
3. Detta steg undersöker de reservmatningsalternativ som kan tänkas vara möjliga att använda. Av de alternativ som finns att tillgå, där välfärdsförlusterna är större än årskostnaden för reservmatningen, väljs det alternativ som har högst lönsamhet. Då en förändring är genomförd i form av reservmatningar nollställs beräkningarna och processen startas om. [6]
4. Samtliga transformatorer bombarderas, i detta steg, med fel. Bombardemanget simuleras även här för en hundra års period. Genom kännedomen om avbrottskostnaderna för dessa komponenter kan här en välfärdsförlust beräknas då ett fel inträffar. Även här testas möjligheterna att införa redundans i form av parallella transformatorer. Då det visar sig att en reservtransformator är lönsam har den installerats i nätet. [6]
5. Här har nu all den reservkapacitet som ansågs mest lönsam i de tidigare stegen installerats och nätet bombarderas ytterligare en gång under ca 100 år. Då fel inträffar tar modellen nu hänsyn till den reservmatning som

installerats. Efter detta bombardemang kan de förväntade avbrottskostnaderna tas fram. [6]

Det kan nämnas att under steg 1 räknar modellen med att det finns en viss fränkopplingsmöjlighet, som tidigare nämnts, vilket leder till att antalet drabbade reduceras.

Denna analysdel kan nu utnyttjas till att jämföra vad det från början radiella referensnätet inklusive reservkapacitet har för avbrottskostnader i förhållande till vad de inrapporterade avbrottskostnaderna från bolagen är. Utgående från dessa kostnader kan nu ett leveranskvalitetstillägg beräknas. [6]

7.2.3 Leveranskvalitetstillägg

Den finansiella kraft som nätbolagen har att utnyttja till att öka leveranskvalitén beräknas enligt nätnyttomodellen med hjälp av ett så kallat leveranskvalitetstillägg. Detta tillägg grundar sig på de förväntade avbrottskostnaderna, som beräknats baserat på det referensnät inklusive den reservkraft som nätnyttomodellen tagit fram genom föregående analys. Dessa kostnader jämförs med de inrapporterade avbrottskostnaderna från nätbolagen, rapporterade avbrottskostnader. Genom följande formel beräknas sedan leveranskvalitetstillägget [6]

$$\text{Leveranskvalitetstillägg} = \text{Årskostnader för reservkapacitet} \\ - (\text{Rapporterade avbrottskostnader} - \text{Förväntade avbrottskostnader})$$

Här skall påpekas att detta tillägg aldrig blir mindre än noll. Det kan med andra ord inte användas som något avdrag. De inrapporterade avbrottskostnaderna får heller aldrig vara mindre än de förväntade avbrottskostnaderna. Detta skulle innebära att leveranskvalitetstillägget blir större än den ursprungliga kostnaden för reservkapaciteten, vilket kunden förmodligen inte har varit beredd att betala för.

En stor fördel med detta tillägg är att företaget, med hjälp av bra underhållsscheman och förberedelser för eventuella händelser, kan påverka de inrapporterade avbrottskostnaderna och på så vis påverka tillägget. [7]

7.2.4 Behov av reservkapacitet

Då mycket med tillförlitlighet och säkerhet i slutändan grundar sig på vilken reserv man har i nätet är det onekligen den viktigaste och säkerligen den mest komplexa uppgiften att bedöma i modellen. Nätnyttomodellen bearbetar således denna del ingående. Med hjälp av jämförelser, huruvida exempelvis en reservtransformator kan vara lönsam att installera eller ej, beslutar modellen om reserv skall införas. I fallet med reservtransformatorer har man beslutat att dubblera alla transformatorer på nätnivå 3 och 4. Däremot anses kostnaden för en reservtransformator på nätnivå 2 vara högre än avbrottskostnaden orsakad av fel i transformatorn för nästan alla effekter på transformatorn. Därav finns ingen reserv av transformatorer på nätnivå 2 i modellen.

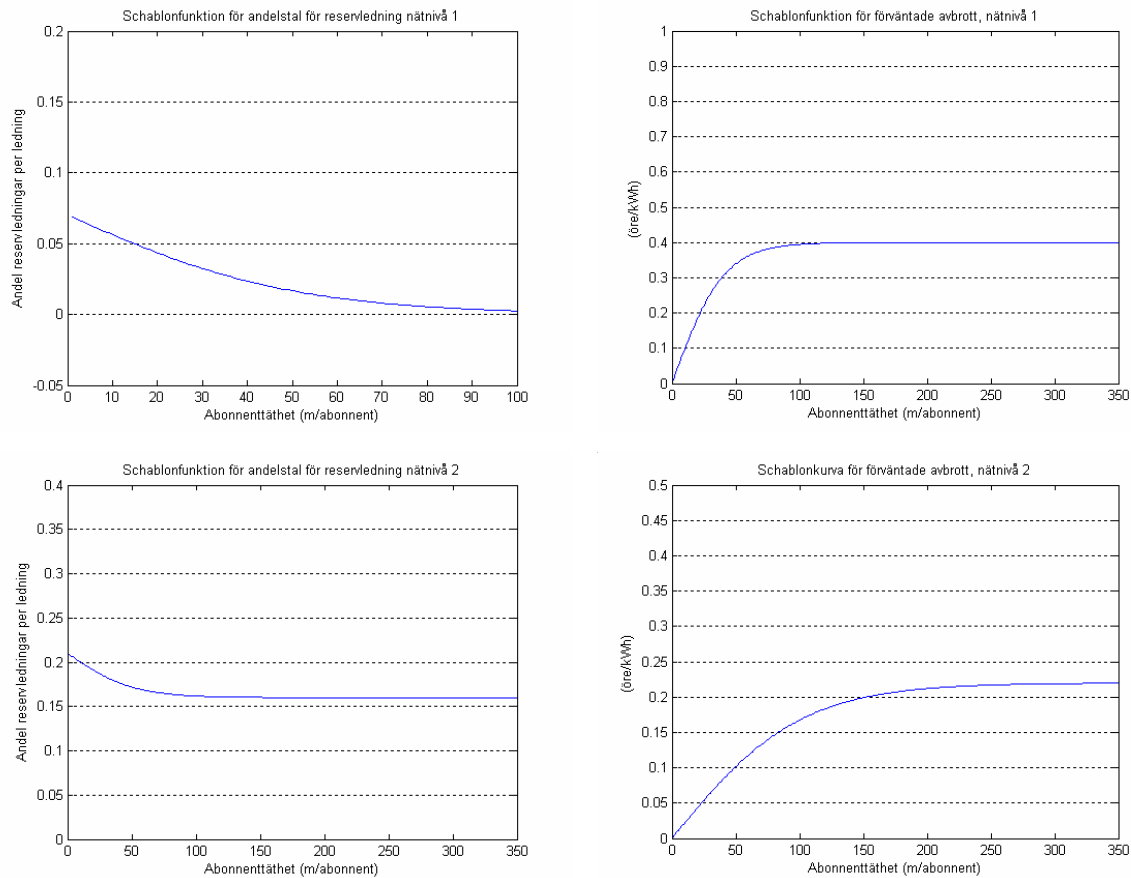
Generellt kan man säga att välfärdförlusterna, då fel inträffar, ökar med ökad nätnivå, vilket är logiskt då det är mer sannolikt att ett större antal kunder drabbas vid fel på högre nätnivåer. [7]

Reservledningar o andra sidan har mer med abonnenttätheten att göra. Behovet av reserv ökar då abonnenttätheten ökar. I modellen talar man om abonnenttäthet som meter per abonnent, vilket blir lite förvirrande då en ökning av denna täthet innebär att abonnenterna ligger glesare i förhållande till varandra, inte tätare.

Även här finns diagram som beskriver vilket antal reservledningar per nod som behövs med avseende på abonnenttätheten för de olika nätnivåerna. Diagrammen är framtagna med hjälp av speciella databaser. Dessa databaser är baserade på inrapporterad data från en mängd olika nätbolag. Utgående från dessa diagram beräknas det behovet av reservledning som behövs på vardera nätnivån. Beroendet av abonnenttäthet minskar allteftersom nätnivån stiger. [7]

Exempel på dessa diagram kan ses i Tabell 7 . Figurerna i tabellen är framtagna med hjälp av den funktion som modellen utnyttjar till att skapa dessa schablonkurvor, se kapitel 7.2.3 Schablonkurvor. Se även Appendix 2 för beräkningarna.

Tabell 7. Schablondiagram över reservledningar och förväntade avbrott, nätnivå 1 och 2



I tabellen ovan är det tydligt hur exempelvis andelen reservledningar ökar med ökad abonenttätthet. Likaså syns även i tabellen att kostnaderna för de förväntade avbrotten är högre för dem som bor i glesbygden än för dem i tätbebyggelsen. Detta blir logiskt då glesbygden är sämre utrustade med reservledningar vilket leder till ett längre, och dyrare, bortfall vid fel i elnätet.

7.2.3 Schablonkurvor

Comment [DA1]: Inte säkert att detta skall vara med.....

Det finns en mängd schablonkurvor i modellen som är anpassade att efterlikna verkligheten så gott det går. För att exempelvis kompensera det faktum att modellens referensnät läggs ut fågelvägen till kunden har bland annat en geometrijustering införts. Denna justering skall ta hänsyn till att byggnader, terräng m.m. kan vara i vägen för läggningen av kabel/ledning. De förväntade avbrotten på respektive nätnivå är ett annat exempel som tas fram med hjälp av schablonkurvor.

En funktion som kombinerar egenskaperna från en linjär-, exponential- och stegfunktion är framtagen för att modellera dessa schablonkurvor. Funktionen är en modifierad Tangens hyperbolicus, $ModTanh(X)$. Funktionen består av ett antal parametrar som justerar beteende till att likna det man önskar. Funktionen har följande utseende

$$ModTanh(x) = (k_1 + k_2 \times \tanh(k_3 \times (x - k_4)))^{(k_0)^2}$$

där x = den gällande tätheten (meter ledning/abonnent) .

Slutsatser

Referenser

- [1] KTH Kursen
- [2] Reliability Evaluation of Engineering systems
- [3] System Reliability Theory
- [4] Practical Reliability Engineering
- [5] Tillförlitlighet, Bo Bergman
- [6] Nätnyttomodellen från insidan
- [7] Nätnyttomodellen, beräkningsgången
- [8] Kompendium i eldistribution
- [9] Mikael Nilsson, Lunds Energi AB
- [10]
- [11]

Appendix 1

Härledning av minimala snitt för systemet i Figur 12.

1. De minimala vägarna blir

$$\begin{array}{cccccc} \{1,2,4,5,6\} & \{1,2,4,5,7\} & \{1,2,4,5,8\} & \{1,3,4,5,6\} & \{1,3,4,5,7\} & \{1,3,4,5,8\} \\ \text{Väg 1} & \text{Väg 2} & \text{Väg 3} & \text{Väg 4} & \text{Väg 5} & \text{Väg 6} \end{array}$$

2. Snitt av första ordning för väg 1 blir då $\{1\}\{2\}\{4\}\{5\}\{6\}$
3. Snitt av första ordning för väg 2 blir $\{1\}\{2\}\{4\}\{5\}\{7\}$, kombinera med snitt från punkt 2. Denna kombination medför att vi får följande snitt $\{1,1\}, \{1,2\}, \{1,4\}, \{1,5\}, \{1,7\}, \{2,1\}, \{2,2\}, \{2,4\}, \{2,5\}, \{2,7\}, \{4,1\}, \{4,2\}, \{4,4\}, \{4,5\}, \{4,7\}, \{5,1\}, \{5,2\}, \{5,4\}, \{5,5\}, \{5,7\}, \{6,1\}, \{6,2\}, \{6,4\}, \{6,5\}, \{6,7\}$
De som återstår efter eliminering av dubbleringar och av icke minimala snitt blir följande, $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{6,7\}$.
4. Snitten för väg 3 kombineras nu med snitt från punkt 3. Följande snitt erhålls då, $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{6,7,8\}$
5. Nästa vägs snitt kombineras med snitt från punkt 4. Snitten blir följande efter eliminering, $\{1\}, \{2,3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,7,8\}$. Här ser man att de minimala snitten är funna. Man kan givetvis inte sluta här om det fortfarande finns vägar kvar att kombinera med, men i detta fallet kommer de sista två vägarna inte att ge något extra bidrag så i detta specifika fall kan härledningen avslutas här.
6. De minimala snitten blir $\{1\}, \{2,3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,7,8\}$, alltså samma som tidigare erhöles genom att bara titta på strukturen.

Appendix 2

Matlabkod till diagrammen i Tabell 7

```
clc;
clear all;

k0= Önskat värde beroende på vad som skall plottas;
k1= - || -;
k2= - || -;
k3= - || -;
k4= - || -;

for x = 1: önskad längd
    modTanh(x)=(k1+k2*tanh(k3*(x-k4)))^((k0)^2);
end

plot(modTanh)
```

Axlarna är modifierade till önskade värden efter att matlab har plottat figuren.

Tabell 8 presenterar de värden på konstanterna som använts till schablondiagrammen.

Tabell 8. Värden på konstanterna till schablondiagrammen i Tabell 7

Värden på konstanterna till schablonkurvorna i Tabell 7	Reservledning, nivå 1	Förväntade avbrott, nivå 1	Reservledning, nivå 2	Förväntade avbrott, nivå 2
K0	1	1	1	1
K1	0,070	0,000	0,210	0,000
K2	0,070	0,400	0,050	0,220
K3	-0,020	0,025	-0,020	0,010
K4	0,000	0,000	0,000	0,000