



Tillförlitlighetsberäkning elnät

Nätberäkningsprogrammet PSS/E

Elforsk rapport 12:30



Arne Berlin
Per-Olof Lindström
Henrik Weisbach

juni 2012

ELFORSK

Tillförlitlighetsberäkning elnät

Nätberäkningsprogrammet PSS/E

Elforsk rapport 12:30

Arne Berlin
Per-Olof Lindström
Henrik Weisbach

juni 2012

Förord

Detta projekt formulerades utifrån ELFORSK programbeskrivning 2011-04-18 Risk och tillförlitlighetsanalys.

Projektet har i huvudsak genomförts av Per-Olof Lindström och Henrik Weisbach Pöyry Swedpower AB samt i mindre omfattning av Arne Berlin Pöyry Swedpower AB.

Jag vill även tacka Vattenfall Eldistribution AB för samarbete i projektet.

Rapporten redovisar en grundlig genomgång av hur tillförlitlighetsberäkningar i transmissionsnät kan säkerställas med hjälp av PSS/E där man samtidigt identifierat ett antal mindre buggar i systemet.

Trollhättan 2012

Arne Berlin Pöyry Swedpower AB

Projektledare

Sammanfattning

Vid planering av ett kraftsystem görs det oftast deterministiska studier av nätet, dvs nätet analyseras med fasta kriterier. Normalt används $n-1$ som kriterium vilket innebär att nätet ska tåla bortfall av en komponent utan att det blir några allvarliga konsekvenser. En sådan analys tar ingen hänsyn till sannolikheten för att störningen inträffar.

Tillförlitligheten för ett ställverk analyseras normalt med probabilistiska metoder. Tidigare har sådana beräkningar antingen gjorts manuellt, i Excel-modeller eller mha dedikerade datorprogram, t.ex. Tresim.

I beräkningsprogrammet PSS/E finns det nu två olika moduler som kan användas för att analysera tillförlitligheten för ett kraftsystem eller ett enskilt ställverk. Denna rapport, som har framtagits på uppdrag från Elforsk, syftar till att belysa de möjligheter som dessa verktyg medför, och ge praktiska tips och demonstrationer på analyser med programmet.

Det finns två moduler i PSS/E för att genomföra tillförlitlighetsberäkningar:

- Probabilistic Reliability Assessment används för att analysera ett normalt PSS/E nät, där stationer representeras med en nod.
- Substation Reliability Assessment används för att göra analys av en eller flera stationer med en detaljerad modell, där varje komponent representeras med sin felstatistik.

Probabilistic Reliability Assessment används för att beräkna tillförlitligheten för ett nät. Den använder PSS/E:s belastningsfördelningsmodell och räknar igenom de felfall som har valts för analysen ($n-1$, $n-2$ eller $n-3$) och analyserar konsekvenserna av varje störning. Sannolikhetsdata för störningar på t.ex. stationer, ledningar, kablar och transformatorer anges i en datafil. Programmet genomför en deterministisk studie, dvs alla specificerade störningar räknas igenom, och de felfall som leder till överskridande av inställda gränsvärden (t.ex. överlaster, överspänning, underspänning, bortkopplad last eller nätkollaps) rapporteras. Med hjälp av felstatistik beräknas sedan index för varje konsekvens. Detta index är en funktion av hur mycket gränsvärdet är överskridet samt sannolikheten för felfallet.

Felstatistik kan anges med generella data, t.ex. risken för ledningsfel kan anges som antalet fel per km och år. Det går också att ange specifika data för varje objekt om så önskas.

Med denna modul i PSS/E är det mycket enkelt att snabbt räkna igenom tusentals olika felfall och få olika index som visar hur allvarliga konsekvenser det blir i systemet. Det är därigenom möjligt att t.ex. jämföra olika nätalternativ för att avgöra vilken nätförstärkning som är mest robust.

Resultatet från beräkningarna är beroende på kvalitén på indata. De flesta index är direkt proportionella mot den angivna felfrekvensen för objekten (t.ex. ledningar). Det bör dock noteras att även om det finns osäkerheter angående felfrekvenser och bortkopplingstider går det att jämföra de relativa skillnaderna mellan olika alternativ. T.ex., det går att avgöra att alternativ A har 30% mindre risk för överlast än alternativ B.

Slutsatsen är att denna typ av beräkning är ett användbart verktyg för att analysera tillförlitligheten för olika nätalternativ och resultaten kan användas

vid utvärdering av nätförstärkningar. Funktionen är väldigt effektiv när det gäller att identifiera svaga punkter i nätet, speciellt i kombination med funktionen Contour, som grafiskt åskådliggör var det sker flest/alvarligast fel.

Substation Reliability Assessment kan användas för att göra en detaljerad studie av t.ex. ett ställverk. Huvudkomponenterna i ställverket läggs då in i en objektbaserad modell där samlingsskenor, brytare, frånskiljare och eventuellt spännings- och strömtransformatorer modelleras och felstatistik anges för varje ingående komponent. Det är därigenom möjligt att modellera alla typer av ställverk. Denna analys beräknar risken för bortkopplad last pga olika fel i ställverket, eller ställverkets omgivning (t.ex. inkommande ledningar). Bortkopplad last är antingen last som isoleras från nätet pga brytarmanöver eller last som reduceras pga att objekt (brytare, frånskiljare, ledning eller transformator) har begränsad kapacitet för effektöverföring.

Fel på en komponent samt alla kombinationer av samtidigt fel på två godtyckliga komponenter analyseras av programmet. Det görs ingen belastningsfördelningsberäkning i denna analys utan en förenklad transportmodell används i stället. Det innebär att det endast är bortkopplad last som beräknas i denna modul.

Det går också att lägga in statistik för risken för misslyckad brytarmanöver i analysen. Programmet analyserar två tillstånd för alla felfall; POST FAULT är tillståndet efter det att felaktig komponent har isolerats mha brytare. POST SWITCHING är tillståndet efter det att omkopplingar gjorts med frånskiljare och brytare för att om möjligt återställa matningen under reparationstiden av den felaktiga komponenten.

Alla felkombinationer som leder till bortkopplad last redovisas i programmet. De viktigaste nyckeltalen från analysen är frekvens, varaktighet samt totalt bortkopplad energi. Det är relativt enkelt att genomföra en tillförlitlighetsanalys av en station med detta verktyg i PSS/E och det har stora fördelar gentemot t.ex. handräkning eller Excel-modeller.

Under arbetets gång har det upptäckts ett antal mindre buggar i PSS/E. Dessa är rapporterade till programleverantören och ska bli åtgärdade i framtida versioner av programmet.

Ett problem vid tillförlitlighetsberäkningar är avsaknaden av indata. I dagsläget finns det ingen bra sammanställning av felstatistik som kan användas i PSS/E. ENTSO-E sammanställer felfrekvenser för komponenter, men någon varaktighet för komponentfel sammanställs inte, och den kommer också att variera stort mellan olika nätbolag och platser, beroende av lagerhållning och avstånd till servicepersonal.

Eftersom PSS/E redan har en så stor spridning bland nätbolag bedöms programmet vara något att satsa på när det gäller tillförlitlighetsberäkningar. Dessutom har de flesta nätbolag redan modeller av sina nät inlagda i PSS/E-format, vilket kraftigt underlättar beräkningarna.

Summary

In network planning, deterministic studies are often performed; the network is analysed with fixed criteria. Normally, the n-1 criterion is used, i.e. the network must be operational without any severe consequences if any single component fails. Such an analysis does not consider the probability for a failure.

The reliability of a substation is normally analysed with probabilistic methods. Such calculations have previously been made manually, in excel or by dedicated computer programs, e.g. Tresim.

In PSS/E, there are now two modules available to analyse the reliability of a power network or a single substation. This report, written on behalf of Elforsk aims to highlight the potential of these tools, to give useful tips and to demonstrate the analyses performed with the program.

There are two modules in PSS/E to perform reliability assessment studies:

- Probabilistic Reliability Assessment is used to analyse a conventional PSS/E network where substations are represented by a single node.
- Substation Reliability Assessment is used to perform a study of one or more substations where a detailed model of the substation is used, where all substation components have their specific fault statistic.

Probabilistic Reliability Assessment is used to calculate the reliability of a network. It uses the PSS/E load flow model and runs through the selected component failures (n-1, n-2 or n-3) and analyses the consequences for each failure. Probabilistic data for e.g. substation-, overhead line-, cable or transformer failure is specified in a data file. The program performs a deterministic study, i.e. all specified failures are ran through and the failures causing given thresholds (e.g. overload, overvoltage, undervoltage, curtailed load or non converged) to be exceeded are reported. With the probabilistic data an index is calculated for every consequence. This index is a function of how much the threshold is exceeded and the probability for the failure.

Fault statistics can be specified by generic data, e.g. the probability for a line failure can be specified by a number of faults/km and year. If required, data can also be specified for each specific object.

With this PSS/E module it is very easy and fast to calculate the indices and obtain the consequences for thousands of component failures in a network. Thereby it is possible to compare different network layouts to determine which one is the most robust.

The quality of the results from the studies is highly dependent on the quality of the input. Most indices are in direct proportion to the given component fault rate (e.g. fault rate for lines). Although, if there are uncertainties regarding fault rates and fault clearing times, the relative reliability of different network layouts can still be compared. E.g. it can be stated that layout A has a 30 % higher reliability than layout B.

The conclusion is that this type of study is a useful tool to analyse the reliability for different network layouts, and the results can be used when assessing network reinforcements. The function is very effective when performing a screening study to identify weak spots in the network,

particularly in combination with the Contour function which graphically highlights the area most affected by failures.

Substation Reliability Assessment is used to perform a detailed study of e.g. a substation. Data for the main components of the substation is entered in an object based model, where busses, breakers and disconnectors are modeled and fault statistics for every component is entered. Hereby it is possible to model every substation layout. This analysis calculates the probability for curtailed load due to substation internal failure, or failure of components in the substation proximity, e.g. incoming lines. Load is curtailed if either the load is disconnected from the network, or if any of the feeding components is overloaded (e.g. breaker, disconnector, line or transformer).

All single component faults and all combinations of double component faults are analysed by the program. This module does not perform a load flow calculation, but only uses a simplified transport model. Hence curtailed load is the only parameter calculated.

It is also possible to include data for the risk of a stuck breaker in the analysis. The program analyses two states for all faults; POST FAULT is the state after the failing component is isolated by breakers, POST SWITCHING is the state after switching has been performed with breakers and switches to restore the power supply to the load while the failing component is being repaired or replaced.

All fault combinations leading to curtailed load are reported by the program. The main indices from the analysis are frequency, duration and unserved energy. The procedure to perform a Substation Reliability Assessment in PSS/E is quite simple, and there are great benefits compared with making the analysis by hand or in Excel.

In the process, some minor bugs have been discovered in PSS/E. These are reported to the software developer and will be corrected in future versions of the program.

A problem in reliability assessment studies is the lack of input data. Today, there is no good compilation of fault statistic data to be used in PSS/E. ENTSO-E compiles fault frequencies for components, but the duration for component failures is not compiled. The duration will also be different for different utilities and locations of the failing components, due to variations in stocking of spare parts and distance to service personnel.

Since PSS/E is such a commonly used program among utilities, the program is believed to be something to focus on in terms of reliability calculations. In addition, most utilities already have their networks modeled in PSS/E which greatly facilitates the analysis.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Bakgrund	1
1.3	Arbetssätt/Metodbeskrivning	2
2	Tillförlitlighetsdatabaser för elnät	3
2.1	Allmänt	3
2.2	Tillförlitlighetsdatabaser i Sverige	3
3	Tillförlitlighetsmodulen i PSS/E	5
3.1	Indata för tillförlitlighetsanalys	6
3.1.1	Enstaka ledning/tvålindningstransformator	7
3.1.2	Trelindningstransformator	9
3.1.3	Brytare/Frånskiljare	11
3.1.4	Generator	13
3.1.5	Nod	14
3.1.6	Ledningar	15
3.1.7	Brytare och frånskiljare	17
3.1.8	Transformatorer	20
3.1.9	Generatorer	22
3.1.10	Noder	24
3.1.11	Egendefinierat felfall	26
3.1.12	Indatafiler	27
3.2	Tillvägagångssätt	28
3.3	Probabilistic Reliability Assessment	29
3.3.1	Nätmodell	29
3.3.2	Indatafiler	29
3.3.3	Genomförande i PSS/E	29
3.4	Substation Reliability Assessment	39
3.4.1	Nätmodell av station	39
3.4.2	Indatafiler	40
3.4.3	Genomförande i PSS/E	40
3.5	Användning av ställverksmallar i PSS/E	44
3.5.1	Verktyg för ställverksmall	44
3.5.2	Exempel på inläggning av ställverk	45
3.6	Utdata från tillförlitlighetsanalys	51
3.7	Buggar	57
4	Tillämpning på projekt	58
4.1	Probabilistic Reliability Assessment	58
4.1.1	Indatafiler	59
4.1.2	Genomförande	62
4.1.3	Resultat	65
4.2	Substation Reliability Assessment	71
4.2.1	En brytare	71
4.2.2	Två brytare	72
4.2.3	Fel på frånskiljare	74
4.2.4	Beräkning för station Lundby	77
4.2.5	Bugg vid beräkning av bortkopplad last	81
4.2.6	Station med en samlingsskena	83
4.2.7	Station med två samlingsskenor	85
5	Slutsatser	87

Bilagor

1 Inledning

Sedan 10 år bakåt i tiden har medvetenheten ökat om samhällets sårbarhet vid olika kollapser eller haverier i elsystemet. Elsystemets komplexitet har samtidigt ökat med ökad elhandel och införandet av förnybar elproduktion. Detta har medfört ökad forskning inom risk- och sårbarhetsanalyser och regleringen har skärpts mot framförallt nätbolagen. Tillförlitlighetsberäkning på elnätskonfigurationer är ett delmoment i en allmän riskanalys av elsystemen. Behovet av tillförlitlighetsberäkningar i nätstudier har därmed ökat men metoderna och verktygen har inte utvecklats de senaste 30 åren.

1.1 Syfte

Detta uppdrag och rapport syftar till att visa hur man kan tillämpa tillförlitlighetsberäkning i PSS/E. Det syftar också till att identifiera eventuella problem med tillförlitlighetsberäkning. Utgångspunkten är således att kunna komplettera en vanlig förstudie med en entydig metod i tillförlitlighetsberäkning.

1.2 Bakgrund

Utgångspunkten för detta uppdrag är Elforsk programbeskrivning 2011-04-18 Risk och tillförlitlighetsanalys. I denna programbeskrivning beskrivs att tillgänglighetsdatabaser för transmissionsnät och lokalnät finns tillgängliga och att pilotprojekt för tillämpningsmetoder för tillförlitlighetsberäkningar i nätprogram efterfrågas.

PSS/E är ett mycket etablerat nätprogram för olika typer av elanalyser av stam- och regionnät runt om i världen. Då tillförlitlighetsberäkningar har krävts i elstudierna har man varit tvungen att hantera denna typ av beräkning vid sidan om i helt separata system eller i egna ihopsnickrade excelkalkyler. I praktiken måste man från grunden beskriva nätstrukturen och mata in tillförlitlighetsdata för att kunna utföra en tillförlitlighetsberäkning.

PSS/E, Power System Simulator, Engineering skapades av PTI (nu en del av Siemens) 1976 och har sedan dess haft en stor roll hos nätbolag världen över. I version 31 (utgiven år 2008) av programmet infördes en tillförlitlighetsmodul "Reliability Assessment", denna kompletterades i nästa version, 32 (utgiven år 2010) med modulen "Substation Reliability Assessment". Poängen med att integrera tillförlitlighetsberäkningen i ett elanalysverktyg är att nätets grundstruktur är redan given. Man har således en grundkonfiguration att utgå från som dock måste kompletteras. Motsvarande arbetssätt är att bygga ett felströmsnät utifrån ett lastflödesnät. Utgångspunkten är att komplettera ett lastflödesnät till ett "tillförlitlighetsnät" att utföra tillförlitlighetsberäkningar på. Grundfrågan är då om systemet erbjuder ett förenklat och strukturerat arbetssätt som säkerställer en tillförlitlighetsberäkning.

Finns det tillgänglighetsdatabaser tillgängliga för ett elsystem så skapar det förutsättningar för snabba inläsningar i ett beräkningssystem. PSS/E erbjuder också möjligheten att skräddarsy dialog och analys i PSS/E med hjälp av s.k. hjälpprogram kallat Iplan och Python. Hjälpprogrammen skapar således en möjlighet att säkerställa och effektivisera en analys.

Genom att kombinera en tillförlitlighetsdatabas, tillförlitlighetsmodulen med hjälp av hjälpprogrammen skulle man kunna skapa bra förutsättningar effektiva och säkerställda tillförlitlighetsberäkningar. Detta i sin tur skapar större möjligheter till mer förfinade och mer komplexa tillförlitlighetsanalyser i vanliga nätstudier.

1.3 Arbetssätt/Metodbeskrivning

Arbetet är uppdelat i tre moment

1. Studera och beskriva hur PSS/E tillförlitlighetsmodul fungerar.
2. Utredda status och format på tillgängliga tillförlitlighetsdatabaser.
3. Tillämpning på en nätstudie. Visa hur man, enligt utarbetad metod, ska tillämpa tillförlitlighetsberäkningen på en nätstudie. Tillämpningen utformas i samarbete med Vattenfall Eldistribution AB.

Fullständiga resultat från exempel-analyserna återfinns i Elforsk rapport 12:31.

2 Tillförlitlighetsdatabaser för elnät

2.1 Allmänt

En tillförlitlighetsdatabas för komponenter består i grunden av felfrekvenser och felets varaktigheter. En tillförlitlighetsdatabas kan antingen bygga på utfallstatistik eller på beräknade felfrekvenser och varaktigheter eller i bästa fall vara en kombination av både utfall och beräknade felfrekvenser. En serviceverkstad för bilar kan t.ex. ha som utgångspunkt beräknade felfrekvenser men får korrigera felfrekvenserna vid upptäckta brister på olika komponenter, vilket påverkar serviceintervallet eller konstruktionen av bilen.

Ett elkraftssystem består av anläggningar med mycket lång teknisk livslängd och systemet förnyas ständigt vilket gör att systemet består av komponenter som har en ålder mellan 1-40 år. Ett sådant system är beroende av att utfallstatistik hanteras strikt och metodiskt för att en tillgänglighetsdatabas skall vara användbar i underhållsarbete eller i tillförlitlighetsberäkningar.

En tillförlitlighetsdatabas kan göras enkel eller komplex beroende på vad man vill få ut av databasen. En komponent kan t.ex. delas in i fabrikat, typ och tillverkningsår. Felfrekvensen är antingen en beräknad eller ett utfall. Beräknad felfrekvens erhålls normalt från leverantören medan utfall måste anläggningsinnehavaren ansvara för. Mer avancerad felfrekvens är att man inför den s.k. badkarskurvan – dvs med hänsyn till tillverkningsår så är felfrekvensen hög i början och slutet av komponentens livslängd. Felets varaktighet kan delas in i två delar; Reparationstid och omkopplingstid. Reparationstid motsvarar den tid det tar att återställa (laga eller byta ut) felbehäftad komponent i drift. Denna tid är mycket beroende av vilka underhållsrutiner man har med servicepersonal och leverantörer. En radialmatad anläggningsdel utan reservmatningsmöjligheter är väldigt beroende av reparationstiden för att systemet skall komma igång. Omkopplingstid motsvarar den tid det tar att koppla om systemet för att helt eller delvis återupprätta driften (elleveransen). Saknas omkopplingsmöjligheter blir omkopplingstiden lika med reparationstiden. Vissa omkopplingar kräver besiktning av anläggningen innan koppling tillåts. Omkopplingstiden blir då också beroende tillgänglig servicepersonal och servicerutiner.

Utgångspunkten för en tillförlitlighetsdatabas kan vara beräknade felfrekvenser och felets varaktigheter vilken succesivt justeras efter utfall. Viktigt vid upprättande av en tillförlitlighetsdatabas är att man fastställer viktiga kvalitetsprinciper och är systematisk och metodisk i att tillföra statistik.

2.2 Tillförlitlighetsdatabaser i Sverige

En utgångspunkt för projektet var ELFORSK programbeskrivning, vilken redovisade att nya tillförlitlighetsdatabaser fanns tillgängliga. Vid närmare undersökning kan man konstatera att någon användbar branschgemensam databas inte finns tillgänglig.

För transmissionsnäten finns den s.k. ENTSO-E rapporten (tidigare kallat Nordel driftstörningsstatistik), vilken är en årlig rapport som tas fram av Svenska Kraftnät. ENTSO-E rapporten omfattar enbart transmissionnäten (400-130 kV) i de nordiska länderna och bygger på individuella rapporter från respektive nätföretag. Rapporteringen är en frivillig verksamhet och kvaliteten går inte att klarlägga eftersom det inte finns några principer eller regler hur statistiken tas fram. Rapporten bygger enbart på utfall felfrekvenser och saknar helt uppgift om felets varaktighet på komponentnivå. Redovisad uppgift om varaktighet motsvarar enbart för övergripande varaktighet för respektive land. Felstatistiken är enbart indelad i c:a 21 komponentgrupper som beskriver hela transmissionsnätet för 400-130 kV. För en 130 kV brytare finns det en felfrekvens att välja på – uppgift om typ, fabrikat tillverkningsår saknas. Det blir således medelvärden för alla typer av 130 kV brytare eller alla typer av 130 kV ledningar som finns i Sverige. För att erhålla uppgift om felets varaktighet måste man hämta någon typ av avbrottsstatistik, som vanligtvis kräver en hel del bearbetning, från det enskilda nätföretaget. Någon branschgemensam tillförlitlighetsdatabas för transmissionsnäten finns således inte i Sverige utan i bästa fall ett antal register i de enskilda företagen vilket man i analysen får sammanställa.

För de radialmatade regionnäten 50-20 kV finns ingen officiell statistik. Tidigare ingick de i Nordelstatistiken men det avvecklades under 90-talet. Utfall på felfrekvenser finns registrerade i de större nätföretagen och även motsvarande interna rapporter kan förekomma.

För distributionsnät 10-20 kV finns heller ingen officiell statistik. Det som finns är framtaget i ELFORSK rapport 07:59 av Ying He Vattenfall, vilket bygger på information från några större nätföretag. Uppdraget var enbart att skriva en rapport och inte att leverera någon tillförlitlighetsdatabas för framtida förvaltning. Den omfattande kablifieringen i mellanspänningsnäten efter 2006 gör att det borde finnas ett intresse av att upprätthålla en levande felstatistik på komponentnivå eftersom reparationstiden är betydande vid kabelfel.

De senaste 10 åren har fokus legat mer på s.k. avbrottsrapportering, vilket enbart beskriver avbrott (eller felets varaktighet) på systemnivå eller kundnivå. Orsaken till detta är myndigheternas krav på rapportering. Nätföretagens system för statistik och rapportering har helt enkelt anpassats enligt myndigheternas krav och i mindre omfattning för interna analys behov.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att det inte finns några tillförlitlighetsdatabaser utan enbart rapporter som måste kompletteras med felets varaktighet från det enskilda nätföretaget. När en tillförlitlighetsberäkning genomförs på ett svenskt nät måste man vara medveten om att källdata är individuellt bearbetad och värderad.

Det faktum att det inte finns några elektroniska tillförlitlighetsdatabaser att tillgå, utan endast separata rapporter, gör att projektets förutsättningar förändras lite. Det finns inga databaser att ta hänsyn till vid inläsning av indata utan inläsning av indata måste ske manuellt. Projektet har därför inriktat sig på att beskriva indataformatet samt handhavandet i PSS/E. Utgångspunkten är att användaren har lämpliga felstatistikrapporter tillgängliga.

3 Tillförlitlighetsmodulen i PSS/E

PSS/Es tillförlitlighetsmodul kan användas både vid projektering, för att t.ex. visa på resultaten av nätförstärkningar och vid driftplanering för att visa vilken tillförlitlighet som fås i olika driftfall.

I PSS/E finns två funktioner för att beräkna tillförlitlighet, Probabilistic Reliability Assessment som används för att beräkna tillförlitlighet på systemnivå och Substation Reliability Assessment som används för att beräkna tillförlitlighet på specifika stationer. Denna utredning är genomförd med PSS/E-version 32.1.0.

Probabilistic Reliability Assessment

Reliability Assessment eller översatt till svenska Tillförlitlighetsbedömning är huvudfunktionen för tillförlitlighetsanalys. I tillförlitlighetsbedömningen kan följande index tas fram:

- Sannolikhet för termisk överlast
- Sannolikhet för otillåten spänning¹
- Förväntad icke levererad energi
- Tappad last

Reliability Assessment används i första hand som ett screeningvertyg för att få fram ett systems totala tillförlitlighet, samt att identifiera de alvarligaste och mest sannolika felen. I RA-analysen tas ingen hänsyn till underhåll.

Substation Reliability Assessment

Substation Reliability Assessment, eller översatt till svenska Station-tillförlitlighetsbedömning är ett ytterligare tillförlitlighetsverktyg, inriktat mot stationer som kan användas för att:

- Jämföra olika stationslayouter
- Utvärdera hur känslig en station är m.a.p. felstatistik för komponenter
- Utvärdera hur känslig en station är m.a.p. gränser för termisk belastning
- Utvärdera hur känslig en station är m.a.p. ansluten last
- Utvärdera hur känslig en station är m.a.p. underhåll för komponenter

I stationtillförlitlighetsbedömningen kan följande index tas fram:

- Förväntad icke levererad energi för stationen
- Förväntad icke levererad energi för respektive nod

¹ För hög/för låg, för stor variation

3.1 Indata för tillförlitlighetsanalys

För att tillförlitlighetsmodulen ska leverera adekvata resultat krävs att den förses med korrekt indata. Till indata hör en PSS/E-modell av det system som tillförlitlighetsstudien ska genomföras på, samt tillförlitlighetsdata för de komponenter som systemet är uppbyggt av. Tillförlitlighetsdata för respektive komponent anges generellt sett på formen [felfrekvens; varaktighet] där felfrekvensen anges i antal fel/år per komponent och varaktigheten är den tid det tar i h att reparera eller byta ut en felbehäftad komponent. Dessutom anges tiden det tar att koppla om i nätet efter ett fel.

De komponenter som kan förses med tillförlitlighetsdata är:

- Ledning
- Transformator
- Brytare
- Frånskiljare
- Generator
- Nod
- Egendefinierat felfall – En valfri kombination av ovanstående komponenter

Tillförlitlighetsdata kan anges för varje enskild komponent, eller för grupper av komponenter tillsammans. Nedan beskrivs hur tillförlitlighetsdata anges, först för enskild komponent, och därefter för grupper av flera komponenter.

3.1.1 Enstaka ledning/tvålindningstransformator

Tillförlitlighetsdata för enstaka ledning eller tvålindningstransformator anges på följande form:

```
|LINE | FROM BUS bsid TO BUS bsid |CKT | cktid f d [fu du fm dm]
|BRANCH| |CIRCUIT|
```

Figur 1 Tillförlitlighetsdata för enstaka ledning/tvålindningstransformator, källa: PSS/E-manual

Tabell 1 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för enstaka lednings-/tvålindningstransformatorfel innebär.

Tabell 1 Parametrar för felstatistik för enstaka lednings-/tvålindningstransformatorfel

Parameter	Innebörd
LINE BRANCH	Anger att data gäller för ledning/tvålindningstransformator
FROM BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för ledning/tvålindningstransformator från nod "bsid"
TO BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för ledning/tvålindningstransformator till nod "bsid"
CKT cktid CIRCUIT cktid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för ledning/tvålindningstransformator med ledningsid "ctkid"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)
fu	Anger frekvensen för oplanerat underhåll (ggr/år)
du	Anger varaktigheten för oplanerat underhåll (h)
fm	Anger frekvensen för planerat underhåll (ggr/år)
dm	Anger varaktigheten för planerat underhåll (h)

Exempel:

För ledningen mellan nod 100 och 101 med ledningsid 1 gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/4 år
- Reparationstid: 20 h
- Inget oplanerat underhåll
- Frekvens för planerat underhåll: 1 gång/20 år
- Varaktighet för planerat underhåll: 80 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

LINE FROM BUS 100 TO BUS 101 CKT 1 0.25 20 0.0 0.0 0.05 80

"LINE" anger att felstatistiken gäller en ledning eller en tvålindningstransformator. "FROM BUS 100 TO BUS 101" anger att ledningen går mellan nod 100 och nod 101, och "CKT 1" anger att det är ledning/transformator med ledningsid 1. Ett ledningsfel per 4 år ger att f sätts till 0,25 ($1/4$), och reparationstiden 20 h gör att d sätts till 20. Ledningen/transformatorn har inget oplanerat underhåll, varför fu och du sätts till 0,0. Det antas ett planerat under per 20 år, vilket ger att fm sätts till 0,05 ($1/20$), och varaktigheten för planerat underhåll antas vara 80 h, vilket ger ett dm på 20.

3.1.2 Trelindningstransformator

Tillförlitlighetsdata för enstaka trelindningstransformator anges på följande form:

```
|LINE | FORM BUS bsid TO BUS bsid TO BUS bsid |CKT | cktid f d
[fu du fm dm]
|BRANCH| |CIRCUIT|
```

Figur 2 Tillförlitlighetsdata för enstaka trelindningstransformator, källa: PSS/E-manual

Tabell 2 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för enstaka trelindningstransformatorfel innebär.

Tabell 2 Parametrar för felstatistik för enstaka trelindningstransformatorfel

Parameter	Innebörd
LINE BRANCH	Anger att data gäller för trelindningstransformator
FROM BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för trelindningstransformator från nod "bsid"
TO BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för trelindningstransformator till nod "bsid"
CKT cktid CIRCUIT cktid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för trelindningstransformator med ledningsid "cktid"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)
fu	Anger frekvensen för oplanerat underhåll (ggr/år)
du	Anger varaktigheten för oplanerat underhåll (h)
fm	Anger frekvensen för planerat underhåll (ggr/år)
dm	Anger varaktigheten för planerat underhåll (h)

Exempel:

För trelindningstransformatorn mellan nod 100, 101 och 102 med ledningsid 1 gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/4 år
- Reparationstid: 20 h
- Inget oplanerat underhåll
- Frekvens för planerat underhåll: 1 gång/20 år
- Varaktighet för planerat underhåll: 80 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

**LINE FROM BUS 100 TO BUS 101 TO BUS 102 CKT 1 0.25 20 0.0 0.0
0.05 80**

"LINE" anger att felstatistiken gäller en trelindningstransformator. "FROM BUS 100 TO BUS 101 TO BUS 102" anger att trelindningstransformatorn är ansluten mellan nod 100, nod 101 och nod 102, och "CKT 1" anger att det är trelindningstransformatorn med ledningsid 1. Ett ledningsfel per 4 år ger att f sätts till 0,25 (1/4), och reparationstiden 20 h gör att "d" sätts till 20. Transformatorn har inget oplanerat underhåll, varför "fu" och "du" sätts till 0,0. Det antas ett planerat under per 20 år, vilket ger att "fm" sätts till 0,05 (1/20), och varaktigheten för planerat underhåll antas vara 80 h, vilket ger ett "dm" på 20.

3.1.3 Brytare/Frånskiljare

Tillförlitlighetsdata för enstaka brytare eller frånskiljare anges på följande form:

```
|BREAKER| FROM BUS bsid TO BUS bsid |CKT      | cktid f d [fu du fm dm]
|SWITCH |                               |CIRCUIT|
```

Figur 3 Tillförlitlighetsdata för enstaka brytare eller frånskiljare, källa: PSS/E-manual

Tabell 3 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för enstaka brytare eller frånskiljare innebär.

Tabell 3 Parametrar för felstatistik för enstaka brytare eller frånskiljare

Parameter	Innebörd
BREAKER SWITCH	Anger att data gäller för brytare eller frånskiljare
FROM BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för brytare eller frånskiljare från nod "bsid"
TO BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för brytare eller frånskiljare till nod "bsid"
CKT cktid CIRCUIT cktid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för brytare eller frånskiljare med ledningsid "ctkid"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)
fu	Anger frekvensen för oplanerat underhåll (ggr/år)
du	Anger varaktigheten för oplanerat underhåll (h)
fm	Anger frekvensen för planerat underhåll (ggr/år)
dm	Anger varaktigheten för planerat underhåll (h)

Exempel:

För brytaren mellan nod 200 och 201 med ledningsid 1 gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/200 år
- Reparationstid: 15 h
- Inget oplanerat underhåll
- Frekvens för planerat underhåll: 1 gång/16 år
- Varaktighet för planerat underhåll: 80 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

**BREAKER FROM BUS 200 TO BUS 201 CKT 1 0.005 15 0.0 0.0 0.0625
80**

"BREAKER" anger att felstatistiken gäller en brytare. "FROM BUS 200 TO BUS 201" anger att brytaren är ansluten mellan nod 200 och nod 201, och "CKT 1" anger att det är brytaren med ledningsid 1. Ett brytarfel per 200 år ger att "f" sätts till 0,005 (1/200), och varaktigheten för brytarfel sätts till 15 h, genom att ge "d" motsvarande värde. I exemplet antas att inget oplanerat underhåll kommer behövas, därför sätts "fu" och "du" till 0.0. Frekvensen för planerat underhåll "fm" sätts till 0,0625 (1/16), och varaktigheten för planerat underhåll "dm" sätts till 80 h.

3.1.4 Generator

Tillförlitlighetsdata för enstaka generatorer anges på följande form:

```
|UNIT      | macid AT BUS bsid p d
|MACHINE|
```

Figur 4 Tillförlitlighetsdata för enstaka generatorer, källa: PSS/E-manual

Tabell 4 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för enstaka generatorer innebär.

Tabell 4 Parametrar för felstatistik för enstaka generatorer

Parameter	Innebörd
UNIT macid MACHINE macid	Anger att data gäller för generator med generatorid "macid"
AT BUS bsid	Anger att tillförlitlighetsdata gäller för generator vid nod "bsid"
p	Anger sannolikheten för fel (del av årets timmar på decimalform)
d	Anger varaktigheten för fel (h)

Exempel:

För generatoren vid nod 100 och med generatorid 1 gäller följande statistiska data:

- Sannolikhet för fel: 1 % av årets timmar.
- Reparationstid: 2 veckor

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

MACHINE 1 AT BUS 100 0.01 336

"MACHINE 1 AT BUS 100" anger att felstatistiken gäller för generatorer 1 vid nod 100. Sannolikheten att generatoren är ur drift är 1 %, varför "p" sätts till 0,01, och varaktigheten för generatorfel sätts till 336 h (2x7x24), genom att ge "d" motsvarande värde.

3.1.5 Nod

Tillförlitlighetsdata för enstaka noder anges på följande form:

```
BUS bsid f d [fu du fm dm]
```

Figur 5 Tillförlitlighetsdata för enstaka noder, källa: PSS/E-manual

Tabell 5 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för enstaka noder innebär.

Tabell 5 Parametrar för felstatistik för enstaka noder

Parameter	Innebörd
BUS bsid	Anger att data gäller för brytare eller frånskiljare
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)
fu	Anger frekvensen för oplanerat underhåll (ggr/år)
du	Anger varaktigheten för oplanerat underhåll (h)
fm	Anger frekvensen för planerat underhåll (ggr/år)
dm	Anger varaktigheten för planerat underhåll (h)

Exempel:

För nod 100 gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/1200 år
- Reparationstid: 15 h
- Inget oplanerat underhåll
- Frekvens för planerat underhåll: 1 gång/8 år
- Varaktighet för planerat underhåll: 8 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

BUS 100 0.0008 15 0.0 0.0 0.125 8

"BUSES 100" anger att felstatistiken gäller nod 100. Ett nodfel per 1200 år ger att "f" sätts till 0,0008 (1/1200), och varaktigheten för nodfel sätts till 15 h, genom att ge "d" motsvarande värde. I exemplet antas att inget oplanerat underhåll kommer behövas, därför sätts "fu" och "du" till 0,0. Frekvensen för planerat underhåll "fm" sätts till 0,125 (1/8), och varaktigheten för planerat underhåll "dm" sätts till 8 h.

Under utredningen har en bugg i PSS/E upptäckts som påverkar resultaten vid nodfel, se stycke 3.7 för beskrivning av buggen.

3.1.6 Ledningar

Tillförlitlighetsdata för flera ledningar anges på följande form:

```
| LINES      | | IN      | | AREA  i      | | xm bm ft dt fmt dmt  
| BRANCHES | | FROM    | | ZONE  i      | |  
              | |         | | OWNER i      | |  
              | |         | | KV   r      | |  
              | |         | | SYSTEM  label | |  
              | |         | | SUBSYSTEM label | |
```

Figur 6 Tillförlitlighetsdata för ledningar, källa: PSS/E-manual

Tabell 6 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för ledningsfel innebär.

Tabell 6 Parametrar för felstatistik för ledningsfel

Parameter	Innebörd
LINES BRANCHES	Anger att data gäller för ledning
IN	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar i en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
FROM	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar från en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
AREA i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar i/från AREA "i"
ZONE i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar i/från ZONE "i"
OWNER i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar som ägs av OWNER i
KV r	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar med basspänning "r" (kV)
SYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar i/från SYSTEM "label"
SUBSYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla ledningar i/från SUBSYSTEM "label"
xm	Anger ledningsreaktans (ohm/km)
bm	Anger ledningssusceptans (S/km)
ft	Anger felfrekvensen för anslutningsorsakade ² ledningsfel (ggr/år)
dt	Anger reparationstiden för anslutningsorsakade ledningsfel (h)
fmt	Anger felfrekvensen per km ledning (ggr/(km*år))
dmt	Anger reparationstiden för ledningsfel (h)

Om ledningslängd inte är given i PSS/E-balansen används i första hand parametern "xm" enligt $\text{ledningslängd} = X/xm$, där "X" är den i PSS/E-balansen angivna induktiva reaktansen för ledningen, och på motsvarande sätt används i andra hand "bm" för att räkna ut ledningslängden.

² Fel orsakade av stationsutrustning

Exempel:

För linjer med basspänning 135 kV gäller följande statistiska data:

- Anslutningsorsakade ledningsfel: 1 fel/60 år
- Reparationstid för anslutningsorsakade ledningsfel: 8 h
- Felfrekvens per km ledning: 1 fel/50 år och km
- Reparationstid för ledningsfel: 15 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

LINES IN KV 135 0.0 0.0 0.0166 8 0.02 15

"LINES IN KV 135" anger att felstatistiken gäller alla ledningar med basspänning 135 kV. I exemplet antas att ledningslängd är inlagd i PSS/E-balansen, därför behöver inga värden för "xm" och "bm" anges utan dessa sätts till 0,0. Ett anslutningsorsakat (orsakat av fel i station) ledningsfel per 60 år ger att "ft" sätts till 0,0166 (1/60). Reparationstiden för anslutningsorsakade fel d.v.s. "dt" är 8 h. Ett ledningsfel per 50 år och km ger att fmt stätts till 0,02 (1/50). Reparationstiden för ledningsfel d.v.s. "dmt" är 15 h.

3.1.7 Brytare och frånskiljare

Tillförlitlighetsdata för brytare och frånskiljare anges på följande form:

```
|BREAKERS| |IN | |AREA i | f d [fu du fm dm]
|SWITCHES| |FROM| |ZONE i |
|OWNER i |
|KV r |
|SYSTEM label|
|SUBSYSTEM label|
```

Figur 7 Tillförlitlighetsdata för brytare och frånskiljare, källa: PSS/E-manual

Tabell 7 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för brytare och frånskiljare innebär.

Tabell 7 Parametrar för felstatistik för brytare och frånskiljare

Parameter	Innebörd
BREAKERS SWITCHES	Anger om data gäller brytare eller frånskiljare
IN	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare i en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
FROM	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare från en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
AREA i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare i/från AREA "i"
ZONE i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare i/från ZONE "i"
OWNER i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare som ägs av OWNER i
KV r	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare med basspänning "r" (kV)
SYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare i/från SYSTEM "label"
SUBSYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla brytare eller frånskiljare i/från SUBSYSTEM "label"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)
fu	Anger frekvensen för oplanerat underhåll (ggr/år)
du	Anger varaktigheten för oplanerat underhåll (h)
fm	Anger frekvensen för planerat underhåll (ggr/år)
dm	Anger varaktigheten för planerat underhåll (h)

Exempel:

För brytare i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED" gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/200 år
- Reparationstid: 15 h
- Inget oplanerat underhåll
- Frekvens för planerat underhåll: 1 gång/16 år
- Varaktighet för planerat underhåll: 80 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

BREAKERS IN SUBSYSTEM TOLERED 0.005 15 0.0 0.0 0.0625 80

"BREAKERS IN SUBSYSTEM TOLERED" anger att felstatistiken gäller alla brytare i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED". Ett brytarfel per 200 år ger att "f" sätts till 0,005 (1/200), och varaktigheten för brytarfel sätts till 15 h, genom att ge "d" motsvarande värde. I exemplet antas att inget oplanerat underhåll kommer behövas, därför sätts "fu" och "du" till 0,0. Frekvensen för planerat underhåll "fm" sätts till 0,0625 (1/16), och varaktigheten för planerat underhåll "dm" sätts till 80 h.

3.1.8 Transformatorer

Tillförlitlighetsdata för transformator anges på följande form:

```

TRANSFORMERS |IN  | |AREA i          | f d
               |FROM| |ZONE i          |
               |      | |OWNER i         |
               |      | |KV r           |
               |      | |SYSTEM label   |
               |      | |SUBSYSTEM label|

```

Figur 8 Tillförlitlighetsdata för transformator, källa: PSS/E-manual

Tabell 8 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för transformatorer innebär.

Tabell 8 Parametrar för felstatistik för transformatorer

Parameter	Innebörd
TRANSFORMERS	Anger att data gäller för transformatorer
IN	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer i en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
FROM	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer från en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
AREA i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer i/från AREA "i"
ZONE i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer i/från ZONE "i"
OWNER i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer som ägs av OWNER i
KV r	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer med basspänning "r" (kV)
SYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer i/från SYSTEM "label"
SUBSYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla transformatorer i/från SUBSYSTEM "label"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)

Exempel:

För transformatorer i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED" gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/50 år
- Reparationstid: 2 månader

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

TRANSFORMERS IN SUBSYSTEM TOLERED 0.02 1440

"TRANSFORMERS IN SUBSYSTEM TOLERED" anger att felstatistiken gäller alla transformatorer i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED". Ett transformatorfel per 50 år ger att "f" sätts till 0,02 (1/50), och varaktigheten för transformatorfel sätts till 1440 h (2x24x30), genom att ge "d" motsvarande värde.

3.1.9 Generatorer

Tillförlitlighetsdata för generatorer anges på följande form:

```
|UNITS      | min_size max_size IN |AREA i      | f d
|MACHINES   |                        |ZONE i      |
|            |                        |OWNER i     |
|            |                        |KV r        |
|            |                        |SYSTEM label|
|            |                        |SUBSYSTEM label|
```

Figur 9 Tillförlitlighetsdata för generatorer, källa: PSS/E-manual

Tabell 9 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för generatorer innebär.

Tabell 9 Parametrar för felstatistik för generatorer

Parameter	Innebörd
UNITS MACHINES	Anger att data gäller för generatorer
min_size max_size IN	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer med MBASE i intervallet "min_size"- "max_size" i en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
AREA i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer i AREA "i"
ZONE i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer i ZONE "i"
OWNER i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer som ägs av OWNER i
KV r	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer med basspänning "r" (kV)
SYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer i SYSTEM "label"
SUBSYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla generatorer i SUBSYSTEM "label"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)

Exempel:

För generatorer i storleksintervallet 2-10 MVA i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED" gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/10 år
- Reparationstid: 2 veckor

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

MACHINES 2 10 IN SUBSYSTEM TOLERED 0.1 336

"MACHINES 2 10 IN SUBSYSTEM TOLERED" anger att felstatistiken gäller alla generatorer i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED" som ligger i storleksintervallet 2-10 MVA. Ett generatorfel per 10 år ger att "f" sätts till 0,1 (1/10), och varaktigheten för generatorfel sätts till 336 h (2x7x24), genom att ge "d" motsvarande värde.

3.1.10 Noder

Tillförlitlighetsdata för noder anges på följande form:

```
|BUSES | IN |AREA i          | f d [fu du fm dm]
      |ZONE i          |
      |OWNER i         |
      |KV r           |
      |SYSTEM  label |
      |SUBSYSTEM label|
```

Figur 10 Tillförlitlighetsdata för noder, källa: PSS/E-manual

En nod kan motsvara allt från en enstaka kopplingsnod, en samlingsskena till en hel station, beroende av hur PSS/E-modellen är skapad.

Tabell 10 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för noder innebär.

Tabell 10 Parametrar för felstatistik för nod

Parameter	Innebörd
BUSES	Anger att data gäller för noder
IN	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder i en viss gruppering t.ex. AREA, ZONE etc.
AREA i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder i AREA "i"
ZONE i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder i ZONE "i"
OWNER i	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder som ägs av OWNER i
KV r	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder med basspänning "r" (kV)
SYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder i SYSTEM "label"
SUBSYSTEM label	Anger att tillförlitlighetsdata gäller alla noder i SUBSYSTEM "label"
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)
fu	Anger frekvensen för oplanerat underhåll (ggr/år)
du	Anger varaktigheten för oplanerat underhåll (h)
fm	Anger frekvensen för planerat underhåll (ggr/år)
dm	Anger varaktigheten för planerat underhåll (h)

Under utredningen har en bugg i PSS/E upptäckts som påverkar resultaten vid nodfel, se stycke 3.7 för beskrivning av buggen.

Exempel:

För noder i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED_STN" gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/1200 år
- Reparationstid: 15 h
- Inget oplanerat underhåll
- Frekvens för planerat underhåll: 1 gång/8 år
- Varaktighet för planerat underhåll: 8 h

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

BUSES IN SUBSYSTEM TOLERED_STN 0.0008 15 0.0 0.0 0.125 8

"BUSES IN SUBSYSTEM TOLERED_STN" anger att felstatistiken gäller alla noder i området definierat som "SUBSYSTEM TOLERED_STN". Ett nodfel per 1200 år ger att "f" sätts till 0,0008 (1/1200), och varaktigheten för nodfel sätts till 15 h, genom att ge "d" motsvarande värde. I exemplet antas att inget oplanerat underhåll kommer behövs, därför sätts "fu" och "du" till 0,0. Frekvensen för planerat underhåll "fm" sätts till 0,125 (1/8), och varaktigheten för planerat underhåll "dm" sätts till 8 h.

3.1.11 Egendefinierat felfall

Med egendefinierat felfall menas en felhändelse, som kan definieras som ett fel på valfri komponent, eller samtidigt fel på flera valfria komponenter.

Tillförlitlighetsdata för egendefinierat felfall anges på följande form:

```
CONTINGENCY label f d
```

Figur 11 Tillförlitlighetsdata för egendefinierat felfall, källa: PSS/E-manual

Tabell 11 nedan förklarar vad parametrarna för felstatistik för egendefinierat felfall innebär.

Tabell 11 Parametrar för felstatistik för egendefinierat felfall

Parameter	Innebörd
CONTINGECY	Anger att data gäller för egendefinierat felfall
LABEL	Anger namnet för felfall, definieras i separat fil
f	Anger felfrekvensen (ggr/år)
d	Anger varaktigheten för fel (h)

Exempel:

För det egendefinierade felfallet namngivet som "DUBBLA_LEDNINGSFEL" gäller följande statistiska data:

- Felfrekvens: 1 fel/1600 år
- Reparationstid: 4 dagar

Ovanstående felstatistik representeras genom följande indata:

CONTINGENCY DUBBLA_LEDNINGSFEL 0.000625 96

"CONTINGENCY DUBBLA_LEDNINGSFEL" anger att felstatistiken gäller för händelsen definierad som "DUBBLA_LEDNINGSFEL". Felet inträffar en gång per 1600 år, vilket ger att "f" sätts till 0,000625 (1/1600), och varaktigheten för felet sätts till 96 h, genom att ge "d" motsvarande värde (24x4).

3.1.12 Indatafiler

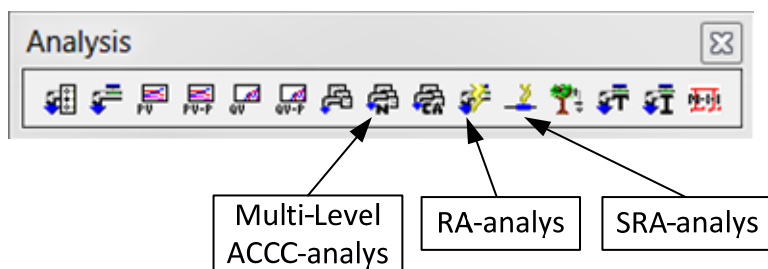
Indata för tillförlitlighetsanalyserna specificeras i separata filer. Filerna kan skapas i ett vanligt textredigeringsprogram, men ges olika filtillägg i filnamnet beroende av vilken indata de beskriver. Stycke 4.1 och 4.2 ger en utförlig beskrivning av filernas uppbyggnad, men en kortfattad beskrivning av deras användning ges i Tabell 12 nedan.

Tabell 12 Filtillägg för indata

Filtillägg	Användning
.prb	Anger data för felstatistik, här anges hur ofta komponenter fallerar, och hur lång tid det tar att reparera eller ersätta dem.
.sub	Definierar de "subsystem" som används för tillförlitlighetsanalysen, alltså en indelning av nätet i olika områden.
.con	Definierar de i 3.1.11 beskrivna felfallen.
.mon	Definierar vilka komponenter som ska övervakas vid tillförlitlighetsanalysen.
.dfx	Skapas i PSS/E, och är en sammanslagning av .sub-, .con- och .mon-filerna.
.trp	Anger vilka komponenter som kopplas bort vid ett fel, och vilka villkor som ska vara uppfyllda för att bortkoppling ska ske.
.thr	Definierar hur last omfördelas mellan noder om en nod med last hamnar i ödrift.
.inl	Definierar gränser för generatorers effektproduktion och tröghet vid effektändring. Används om effektproduktion ska omfördelas mellan olika generatorer.

3.2 Tillvägagångssätt

Tillförlitlighetsanalyserna i PSS/E genomförs med en del grundmoment, och en del valfria påbyggnadsmoment. I kapitel 3.3 och 3.4 redovisas hur tillförlitlighetsanalyserna Reliability Assessment och Substation Reliability Assessment genomförs med alla påbyggnadsmoment. I en verklig studie kan man välja att exkludera påbyggnadsmomenten om de inte behövs. Hur indatafilerna byggs upp redovisas i kapitel 4.1 och 4.2. Figur 12 visar verktygsgruppen med de knappar som används för tillförlitlighetsanalys.



Figur 12 Verktygsgrupp för tillförlitlighetsanalys

3.3 Probabilistic Reliability Assessment

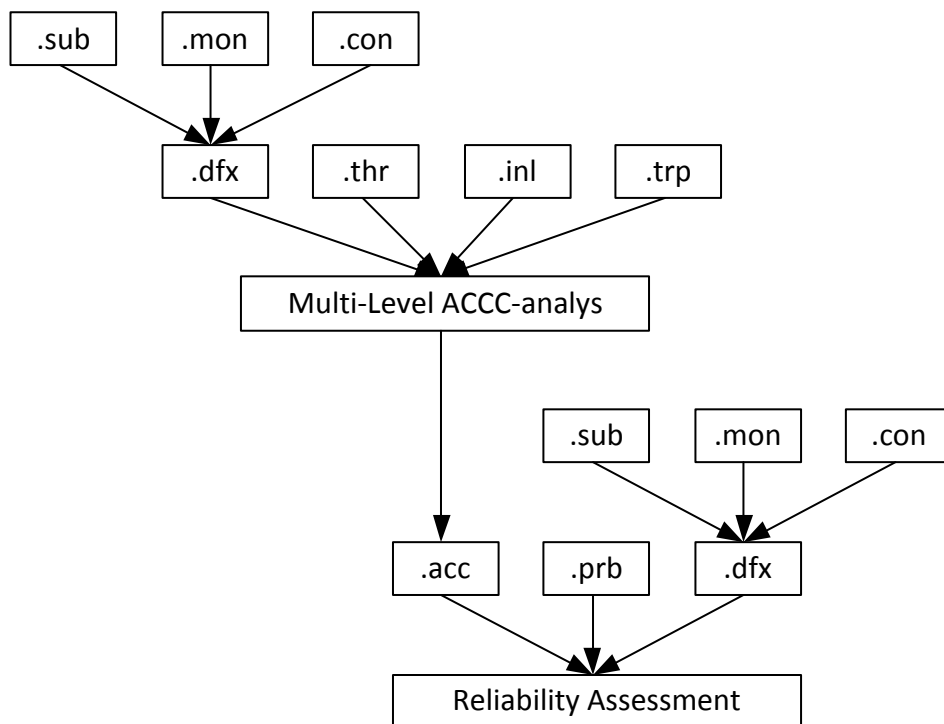
En Reliability Assessment (RA) görs i första hand på systemnivå. För att kunna göra en RA-analys krävs ett antal indatafiler.

3.3.1 Nätmodell

RA-analysen använder PSS/E:s normala lastflödesmodell, med befintlig topologi. Detta innebär att analysen tar hänsyn till problem med överlast, avvikande spänning och spänningskollaps.

3.3.2 Indatafiler

Figur 13 visar flödesschema för filtyper i en RA. De använda filtyperna beskrivs i Tabell 12 ovan. En del av filerna är obligatoriska, medan vissa bara används om specifika funktioner i RA körs. De valfria filerna är .thr, .inl och .trp, resterande filer är obligatoriska och måste skapas för varje RA-körning. Givetvis krävs förutom indatafilerna en fungerande PSS/E-balans att göra analysen på.



Figur 13 Flödesschema – Filer för Reliability Assessment

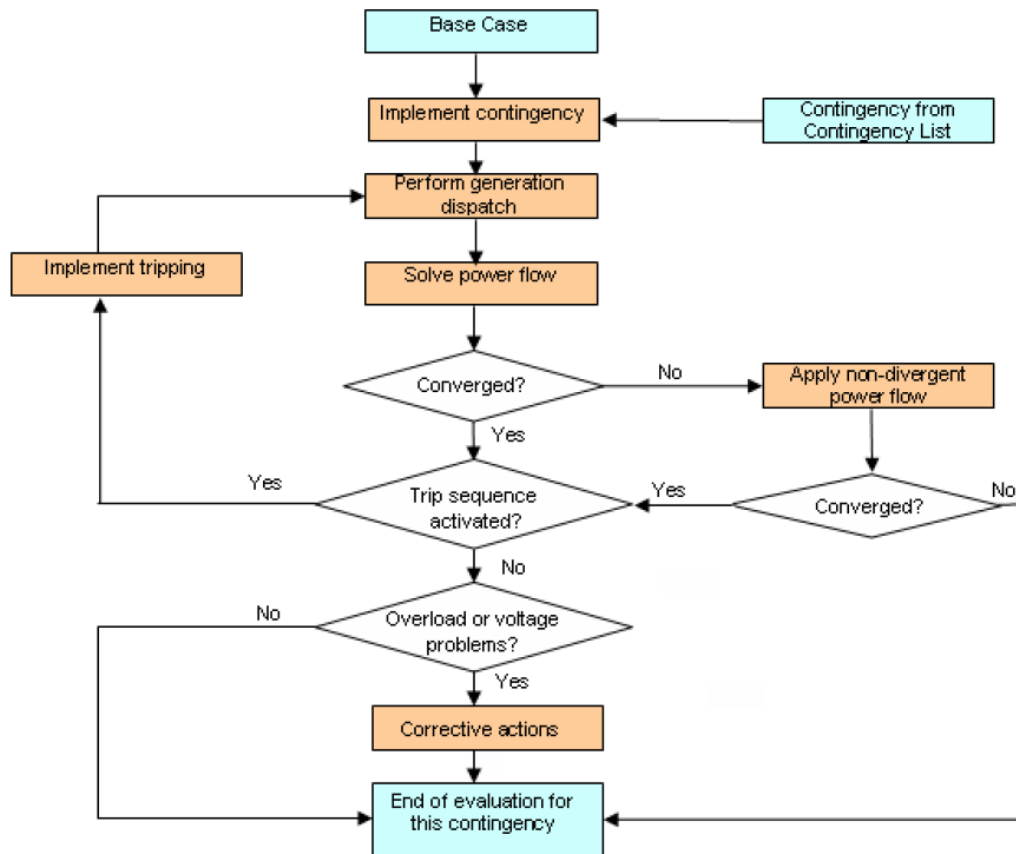
3.3.3 Genomförande i PSS/E

Inför RA-processen måste en ACCC³-analys genomföras, i ACCC-analysen beräknas lastflöden för alla i .con-filen definierade bortfall av komponenter. I

³ AC Contingency Solution

PSS/E finns det två funktioner för genomförande av ACCC-analys: enkel ACCC-analys och Multi-Level ACCC-analys.

Multi-Level ACCC-analys är i grunden samma process som enkel ACCC-analys, men med fler funktioner: beräkning för flera samtidiga fel, ner till n-3; beräkning med frånkoppling vid uppfyllt brytvillkor⁴; beräkning med korrigerande åtgärder⁵ för att avhjälpa överlast eller överspänning. För att kunna göra en RA-analys krävs en .acc-fil skapad med Multi-Level ACCC. I Figur 14 visas flödesschema för Multi-Level ACCC-analys.



Figur 14 Flödesschema för Multi-Level ACCC-analys, källa: PSS/E-manual

Resultaten från ACCC-analysen lagras i en .acc-fil som används som indata till RA-processen. Förutom .acc-filen behövs också en .prb-fil och en .dfx-fil för att göra en RA-analys. Användaren kan använda samma .dfx-fil i RA-analysen som användes i ACCC-analysen eller välja att skapa en ny från .sub-, .con- och .mon-filer, men det är bara .sub-filen man kan ändra utan att behöva skapa en ny .acc-fil med ACCC-analysen. För att inte riskera att blanda ihop filer och filinnehåll rekommenderas dock att använda samma .dfx-fil i RA-analysen som användes i ACCC-analysen.

När användaren har skapat alla indatafiler han behöver för ACCC-analysen (.sub, .mon, .con, .thr, .inl, .trp, .prb) kan han starta ACCC-processen.

⁴ Tripping Simulation

⁵ Corrective Actions

I Figur 15 visas den första fliken från ACCC-fönstret, där ställs parametrar för lastflödesberäkningar in och ett antal in- och utdatafiler specificeras. De två första flikarna i Multi-Level ACCC-fönstret är obligatoriska för att kunna genomföra RA-analysen.

The screenshot shows the 'Multi-Level AC Contingency Solution' dialog box with the 'Multiple Contingency Analysis' tab selected. The dialog is divided into several sections:

- Solution options:**
 - Tap adjustment:** Radio buttons for 'Lock taps' (selected), 'Stepping', and 'Direct'.
 - Area interchange control:** Radio buttons for 'Disabled' (selected), 'Tie lines only', and 'Tie lines and loads'.
 - Switched shunt adjustments:** Radio buttons for 'Lock all', 'Enable all' (selected), and 'Enable continuous, disable discrete'.
 - Non-divergent solution:** Checkboxes for 'Non-divergent solution' (unchecked), 'Adjust phase shift' (unchecked), and 'Adjust DC taps' (checked).
- Solution Engine:** Radio buttons for 'Fixed slope decoupled Newton-Raphson' (selected), 'Full Newton-Raphson', and 'Optimized fixed slope decoupled Newton-Raphson'.
- Dispatch mode:** A dropdown menu set to 'Disable'.
- Dispatch system:** A dropdown menu.
- Mismatch tolerance:** A numeric input field set to '0.50' with a unit of '[1]'.
- Data files:** Four text input fields with browse buttons ('...') and specific buttons: 'Distribution factor data file' (with 'DFAX...' button), 'Contingency solution output file', 'Load throwover data file' (with 'Edit...' button), and 'Unit inertia and governor data file' (with 'Edit...' button).

At the bottom of the dialog are four buttons: 'Reports...', 'Browser...', 'Solve', and 'Close'.

Figur 15 Multi-Level ACCC, flik 1

I Tabell 13 redovisas vilka parametrar som kan ställas in i den första fliken för Multi-Level ACCC.

Tabell 13 Förklaring till Multi-Level ACCC, flik 1

Parameter	Innebörd
Tap adjustment	Anger hur lindningskopplare regleras.
Area interchange control	Anger hur ett områdes effektbalans regleras.
Switched shunt adjustment	Anger hur switchade shuntar ska regleras.
Solution Engine	Anger vilken lösningsmetod som används för lastflödesberäkning.
Dispatch mode	Anger hur fördelning av generering av aktiv effekt regleras, för att häva obalans till följd av bortkopplad komponent, t.ex. en ledning eller transformator.
Dispatch system	Anger i vilket "subsystem" generatorer ligger som deltar i effekttregleringen.
Distribution factor data file	Anger vilken .dfx-fil som används.
Contingency solution output file	Anger filnamn för den .acc-fil där utdata från ACCC-analysen sparas.
Load throwover data file	Anger vilken .thr-fil som används.
Unit inertia and governor data file	Anger vilken .inl-fil som används.

När användaren klickar på knappen "DFAX" i den första fliken i fönstret för Multi-Level ACCC-analysen öppnas rutan som visas i Figur 16, där skapas .dfx-filen genom att ange vilka .mon-, .con- och .sub-filer den ska bestå av.

Figur 16 Fönster för .dfx-fil

I Figur 17 visas den andra fliken från ACCC-fönstret, där ställs parametrar för flera samtidiga fel in, ner till n-3. Denna flik är obligatorisk för att kunna genomföra RA-analysen.

Figur 17 Multi-Level ACCC, flik 2

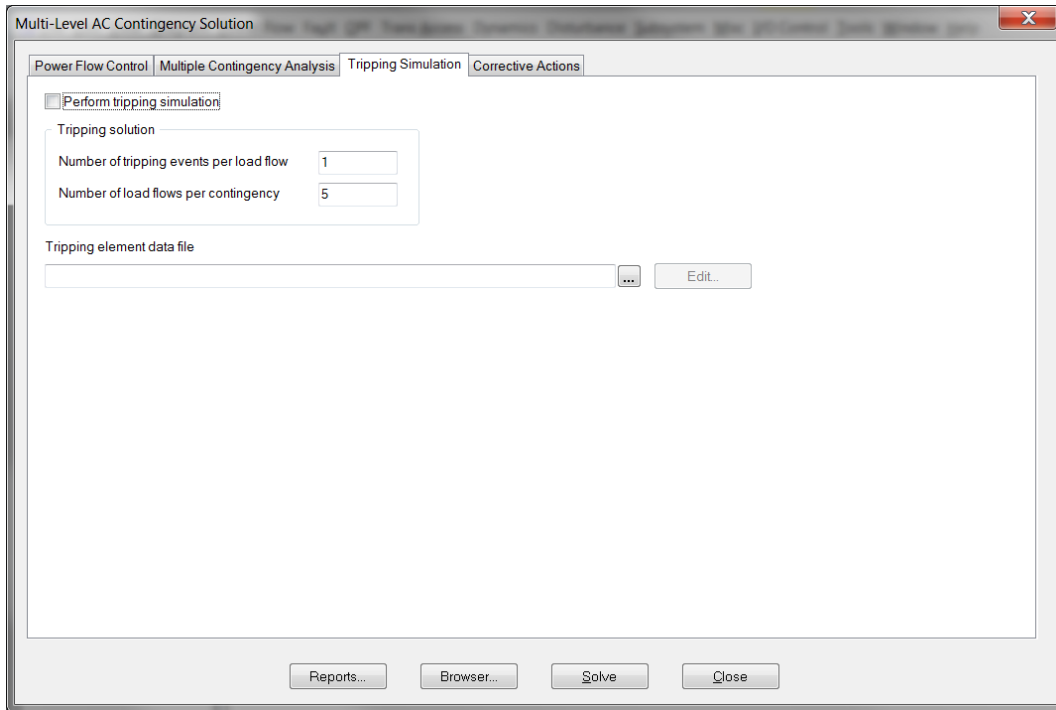
I Tabell 14 redovisas vilka parametrar som kan ställas in i den andra fliken för Multi-Level ACCC.

Tabell 14 Förklaring till Multi-Level ACCC, flik 1

Parameter	Innebörd
Multiple contingency analysis	Anger vilka komponentfel som tas med i analysen, med avseende på multipla fel.
Max level of contingency analysis	Anger maximalt antal samtida fel. (N-1,N-2,N-3)
First/Second/Third level of analysis	Anger vilka komponentfel som tas upp i analysen för n-1, n-2 och n-3. • S = Användarspecificerat fel⁶ • U = Generatorfel • B = Ledningsfel
Ranking options	Anger urvalskriterier för val av komponentfel vilka inte beräknas, för att snabba upp beräkningen.

⁶ Specificerat i .con-filen

I Figur 18 visas den tredje fliken från ACCC-fönstret, där ställs parametrar för felbortkoppling in. Denna flik är inte obligatorisk att använda för att kunna göra RA-analysen, men kan användas om så önskas.



Figur 18 Multi-Level ACCC, flik 3

I Tabell 15 redovisas vilka parametrar som kan ställas in i den tredje fliken för Multi-Level ACCC.

Tabell 15 Förklaring till Multi-Level ACCC, flik 3

Parameter	Innebörd
Perform tripping simulation	Anger om felbortkoppling ska tas med i analysen eller ej.
Tripping solution	Anger antal brytarutlösningar/lastflödeslösning och antal lastflödeslösningar/komponentfel
Tripping element data file	Anger vilken .trp-fil som används.

I Figur 19 visas den fjärde fliken från ACCC-fönstret, där ställs parametrar för avhjälpande åtgärder in. Denna flik är inte obligatorisk att använda för att kunna göra RA-analysen, men kan användas om så önskas.

Figur 19 Multi-Level ACCC, flik 4

I Tabell 16 redovisas vilka parametrar som kan ställas in i den fjärde fliken för Multi-Level ACCC.

Tabell 16 Förklaring till Multi-Level ACCC, flik 4

Parameter	Innebörd
Perform corrective actions	Anger om avhjälpande åtgärder ska tas med i analysen eller ej.
Number of AC load flows	Anger maximalt antal iterationer för att hitta en giltig lösning efter att avhjälpande åtgärder har utförts.
Constraint options	Anger tolerans för överlast respektive spänningsavvikelse.
Control options	Anger vilka avhjälpande åtgärder som sätts in.

När ACCC-analysen är genomförd har en .acc-fil skapats. Den används som indata-fil till RA-analysen.

Efter en genomförd ACCC-analys, kan RA-analysen genomföras. I Figur 20 visas fönstret för RA-analysen.

Probabilistic Reliability Assessment

Report format: System problem summary

Output mode: Post contingency

Branch rating set: Rate A

Subsystem:

Loading percentage: 100.00 [10]

Probability cutoff (H/Y): 1.00 [1.0]

Frequency cutoff (OC/Y): 0.0001 [0.0001]

☒ Include interfaces

☒ Normalize probability

☒ Include ties

Distribution factor data file: ... DFAX...

Contingency solution output file: ...

Outage statistics data file: ... Edit...

☒ Output outage statistics

Output outage statistics data file: ... Edit...

Solve Close

Figur 20 Fönster för RA-analys

I Tabell 17 redovisas vilka parametrar som kan ställas in RA-analysen.

Tabell 17 Förklaring till RA-analysen

Parameter	Innebörd
Report format	Anger vilken utdata som redovisas.
Output mode	Anger vilka resultat som redovisas, alternativen är: efter fel, efter felbortkoppling, efter avhjälpande åtgärder.
Branch rating set	Anger vilken "rate" som används för ledningar.
Subsystem	Anger i vilket "subsystem" analysen genomförs.
Loading percentage	Anger med hur många procent av "rate" som utrustning kan lastas.
Probability cutoff (H/Y)	Fel med en sannolikhet lägre än här angivet antal h/år tas ej med i resultaten.
Frequency cutoff (OC/Y)	Fel med en felfrekvens lägre än här angivet antal ggr/år tas ej med i resultaten.
Include interfaces	Anger om ledningar definierade som "interface" ska tas med i analysen eller ej.
Normalize probability	Anger om sannolikheten ska redovisas som ett normaliserat värde eller ej.
Include ties	Anger om utgående ledningar från valt "subsystem" ska tas med i analysen eller ej.
Distribution factor data file	Anger vilken .dfx-fil som används.
Outage statistics data file	Anger vilken .prb-fil som används.
Output outage statistics	Anger om felstatistik för varje enskild ingående komponent ska redovisas i en separat fil, enligt nedan.
Output outage statistics data file	Anger en fil där felstatistik för varje enskild ingående komponent ska redovisas.

3.4 Substation Reliability Assessment

En Subsystem Reliability Assessment-analys (SRA-analys) görs på stationer, som ett hjälpmedel för att få fram optimal stationslayout.

3.4.1 Nätmodell av station

En station kan modelleras som en del av nätet i PSS/E:s belastningsfördelningsmodell (saved case) eller som en separat nätmodell som enbart består av den station som ska analyseras. Omfattningen av en station specificeras i en subsystemfil och resten av nätet i modellen ignoreras i SRA-analys.

Aktivitet DFAX läser subsystemfilen och gör i ordning en .dfx-fil för användning i SRA. DFAX exkluderar noder som är ur drift. Varje nod i systemet måste vara ansluten till en swing nod. DFAX kontrollerar topologin i nätet samt status för alla objekt (ledningar, brytare, frånskiljare).

Om det finns öar utan anslutning till en swing bus avbryts beräkningen och användaren måste eliminera dessa öar innan det går att genomföra SRA-analys. Efter DFAX kommer systemet att endast bestå av noder som är i drift samt har anslutning till en swing bus (eller är en swing bus).

De komponenter som ska ingå i tillförlitlighetsanalysen måste vara ansluten till en nod som ingår i Substation. Om det finns öar i en Substation måste varje ö ha en nod som är swing. T.ex. en Substation med en huvudskena och en ej spänningssatt reservskena (AC-ställverk). Alla objekt är anslutna till huvudskenan i normaldrift, och reservskenan är isolerad. För att reservskenan ska accepteras av DFAX måste den vara swing bus, så att den kommer att ingå i Substation och användas för att koppla in objekt vid t.ex. brytarfel eller brytarunderhåll.

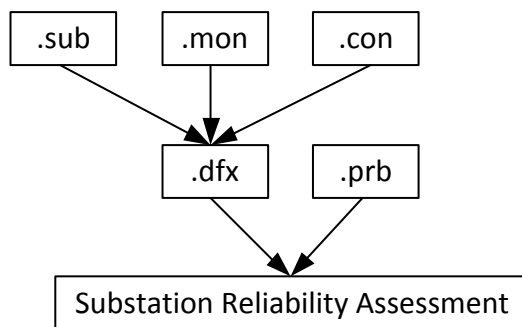
Brytare och frånskiljare ska modelleras som datagrupp Breaker i PSS/E. För brytare anges TYPE=Break och för frånskiljare anges TYPE=Switch. Det första tecknet i ID är alltid @ för brytare och * för frånskiljare.

Varje brytare antas alltid ha två frånskiljare i SRA, en på varje sida. Dessa används för att frånskilja brytaren för reparation eller underhåll. Dessa implicita frånskiljare adderas automatiskt vid SRA-analys. Alla andra frånskiljare i stationen måste dock modelleras explicit i modellen, t.ex. frånskiljare för att koppla om till reservskena.

Det görs inte någon belastningsfördelning i SRA det behövs ingen impedans eller susceptans för objekten. Vid beräkning av bortkopplad last används en transportmodell för att avgöra om nätet kan försörja varje last i den studerade Substationen. Överföringskapacitet för varje objekt anges i rate A, B eller C. Det är därmed viktigt att lägga in rätt kapacitet i MVA för varje ledning, transformator, brytare och frånskiljare sin ingår i Substation.

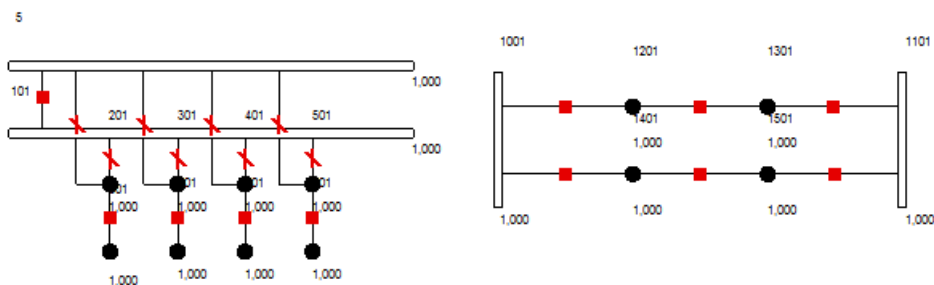
3.4.2 Indatafiler

För att kunna göra en SRA-analys krävs ett antal indata-filer, men inte lika många som för RA-analysen. I Figur 21 visas vilka indata-filer som krävs för att göra en SRA-analys. I SRA-analysen finns det inga valfria filer, utan alla är obligatoriska (.mon, .con, .sub, .dfx och .prb), .con- och .mon-filernas innehåll används dock inte, utan de kan lämnas helt tomma (förutom kommandot END som behövs i slutet av varje datafil). Analysen görs genom att applicera n-1- och n-2-fel för alla komponenter som har data för felstatistik angivet i .prb-filen, och ingår i subsystem Substation i .sub-filen.



Figur 21 Flödesschema – Filer för Substation Reliability Assessment

SRA-analysen kräver inte att en ACCC-analys genomförs, som i RA-analysen, istället krävs att PSS/E-balansen som analysen genomförs på kompletteras med de brytare och frånskiljare som den analyserade stationen är bestyckad med. Normalt innehåller PSS/E-balanser ingen information om frånskiljar- och brytarbestyckning utan måste sannolikt kompletteras med det inför SRA-analysen. Figur 22 visar exempel på stationslayouter där frånskiljare och brytare har använts, de visade stationslayouterna är hämtade från PSS/Es exempelbibliotek. Om önskad stationslayout inte finns i exempelbiblioteket kan användaren skapa sin egen stationslayout.

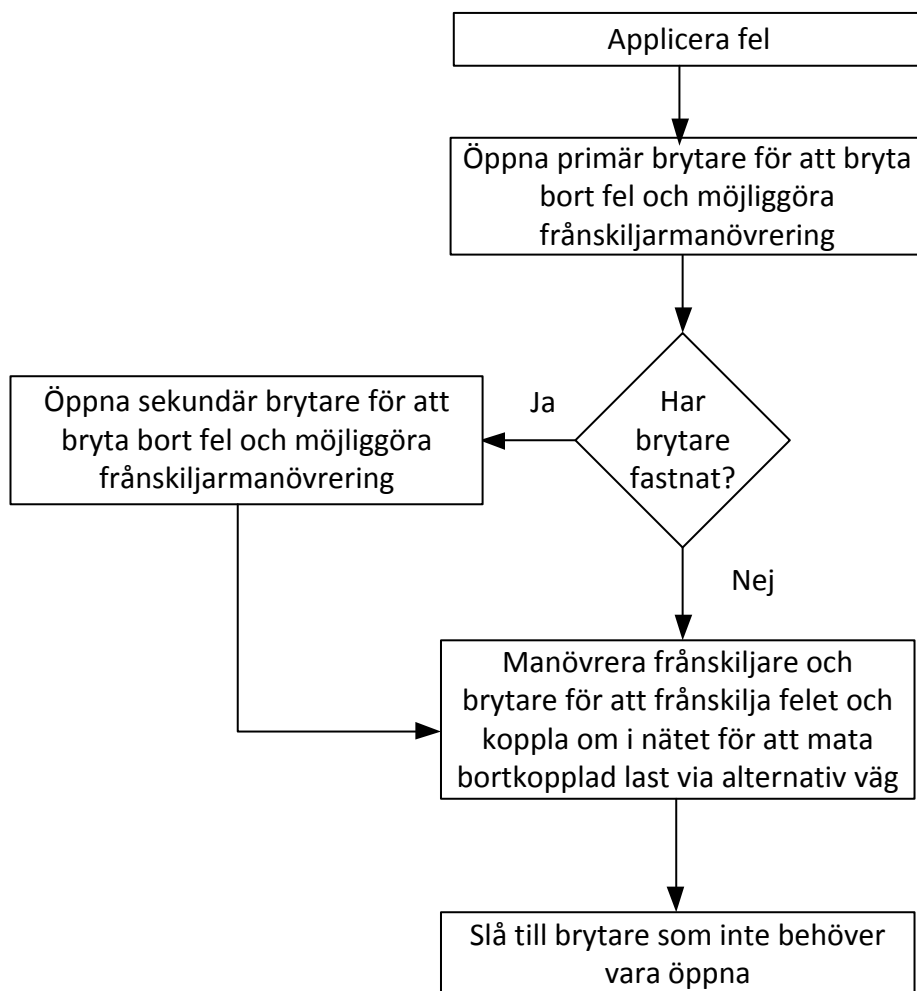


Figur 22 Stationslayout med frånskiljare och brytare

3.4.3 Genomförande i PSS/E

När användaren har skapat alla indata-filer han behöver (.mon, .con, .sub och .prb) samt kompletterat PSS/E-balansen med brytare och eventuella explicita frånskiljare kan han starta SRA-processen.

I Figur 23 visas flödesschema som beskriver SRA-funktionen. Detta flödesschema följs för varje specificerat komponentfel och resultaten redovisas i en av de rapporter som modulen innehåller.



Figur 23 Flödesschema SRA

I Figur 24 visas fönstret för SRA-analysen, här ställs alla parametrar för SRA-analysen in.

The screenshot shows the 'Substation Reliability Assessment' window. It includes the following elements:

- Report format:** A dropdown menu set to 'Contingency report'.
- Branch rating set:** A dropdown menu set to 'Rate A'.
- Include system ties to source/sink systems:** An unchecked checkbox.
- Flow rating percentage:** A numeric input field set to '100,00' with a range of '[10]'.
- Frequency cutoff:** A numeric input field set to '0,0001' with a range of '[0,0001]'.
- Peak load percentage:** A numeric input field set to '100,0000' with a range of '[10]'.
- Switching time (H):** A numeric input field set to '0,00' with a range of '[1]'.
- Breaker fault rate (H/Y):** A numeric input field set to '0,00' with a range of '[1]'.
- Subsystem selection:** A section containing three dropdown menus: 'Substation system', 'Study ("source") system', and 'Opposing ("sink") system'.
- Distribution factor data file:** A text input field with a browse button ('...') and a 'DFAX...' button.
- Outage statistics data file:** A text input field with a browse button ('...') and an 'Edit...' button.
- Buttons:** 'Solve' and 'Close' buttons at the bottom.

Figur 24 Fönster för SRA-analys

I Tabell 18 redovisas vilka parametrar som kan ställas in SRA-analysen.

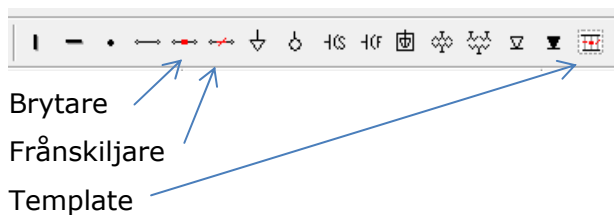
Tabell 18 Förklaring till SRA-analysen

Parameter	Innebörd
Report format	Anger vilken utdata som redovisas.
Branch rating set	Anger vilken "rate" som används för ledningar.
Include system ties to source/sink systems	Anger om noder en nivå ut för utgående ledningar från source-/sink- "subsystem" ska tas med i source/sink definitionen eller ej. Ska normalt inte väljas!!!
Flow rating percentage	Anger med hur många procent rate för komponenter skalas. För att SRA-analysen ska fungera måste en rate anges för varje komponent.
Frequency cutoff (OC/Y)	Fel med en felfrekvens lägre än här angivet antal ggr/år tas ej med i resultaten.
Peak load percentage	Anger med hur många procent lasten i sink skalas, lasten består av last ansluten till sink-noder och rate för ledningar från sink till nätet utanför substation.
Switching time (H)	Anger hur lång tid det tar att manövrera frånskiljare för att frånskilja en felbehäftad komponent.
Breaker fault rate (H/Y)	Anger sannolikheten för att en brytare fastnar och inte bryter bort ett fel.
Subsystem selection	Här måste tre "subsystem" anges: • Substation är det "subsystem" i vilket tillförlitlighetsberäkningen utförs. I beräkningen tas fel på alla komponenter i Substation med. • Source är en delmängd av Substation. Alla noder i Source antas vara anslutna till en oändligt stor generator. • Sink är en delmängd av Substation. I sink ligger de laster och ledningar som ska matas av stationen.
Distribution factor data file	Anger vilken .dfx-fil som används.
Outage statistics data file	Anger vilken .prb-fil som används.

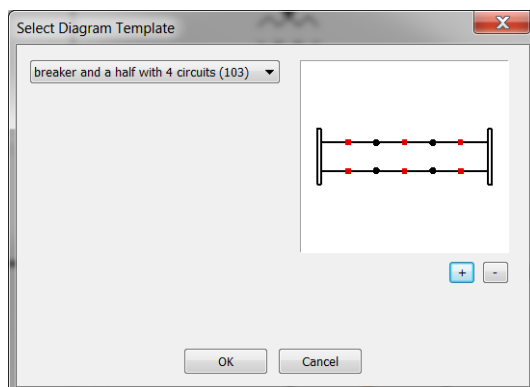
3.5 Användning av ställverksmallar i PSS/E

3.5.1 Verktyg för ställverksmall

Vid vanliga beräkningar i PSS/E, d.v.s. belastningsfördelning, felströmmar och dynamiska simuleringar representeras varje ställverk med en nod. Vid tillförlitlighetsanalys av behöver man komplettera modellen med ställverksapparater, t.ex. brytare och frånskiljare. Detta kan antingen göras manuellt i Slider-diagrammet genom att lägga in de noder och apparater som behövs eller så kan man lägga in en ställverksmall (Template). I verktygsraden finns följande knappar för att lägga in komponenter.



Knappen "Insert Diagram Template" är ett enkelt sätt att lägga in ett ställverk i ett Slider-diagram. Följande fönster öppnas vid klick på Template-knappen:

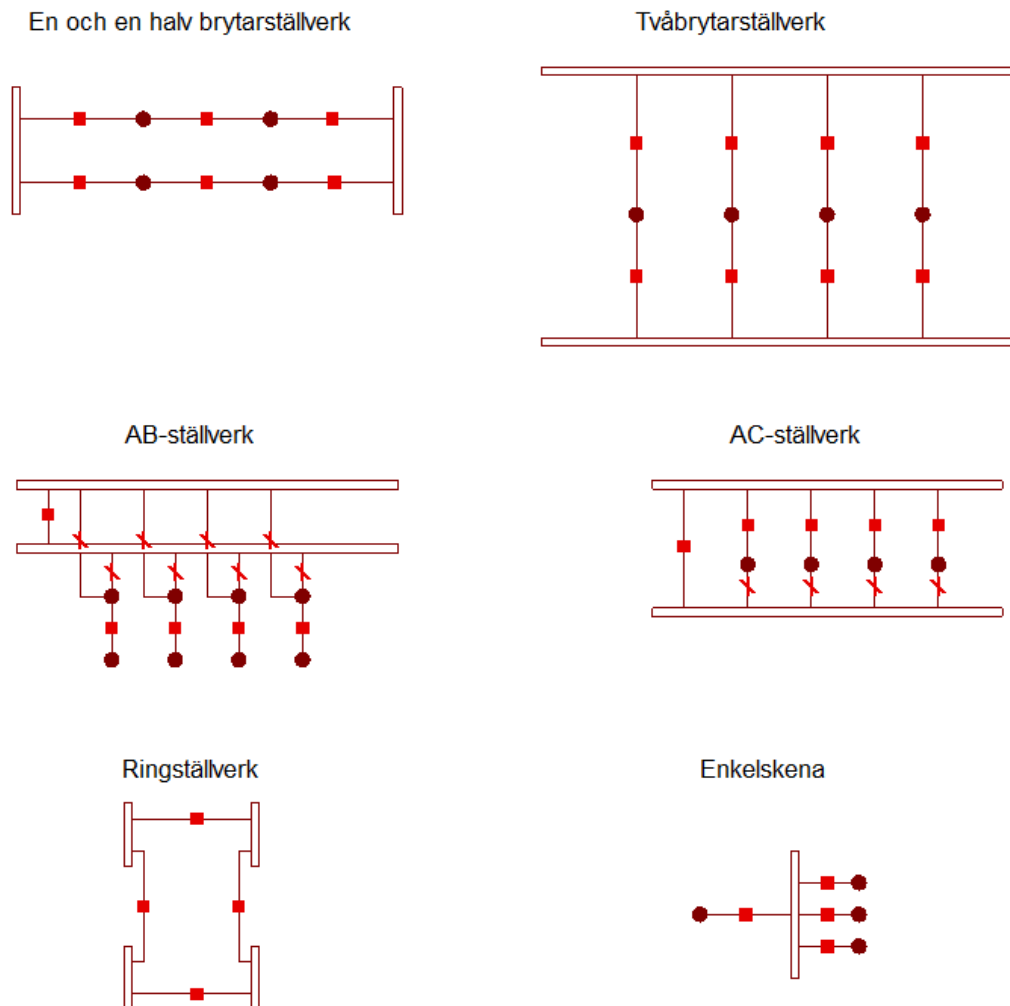


Figur 25 Fönster för val av ställverksmall (Template)

Följande ställverkstyper kan väljas, vardera med fyra anslutna objekt:

- En och en halv brytarställverk
- Tvåbrytarställverk
- AB-ställverk
- AC-ställverk
- Ringställverk
- Enkelskena

Följande figur visar utformning av varje mall.

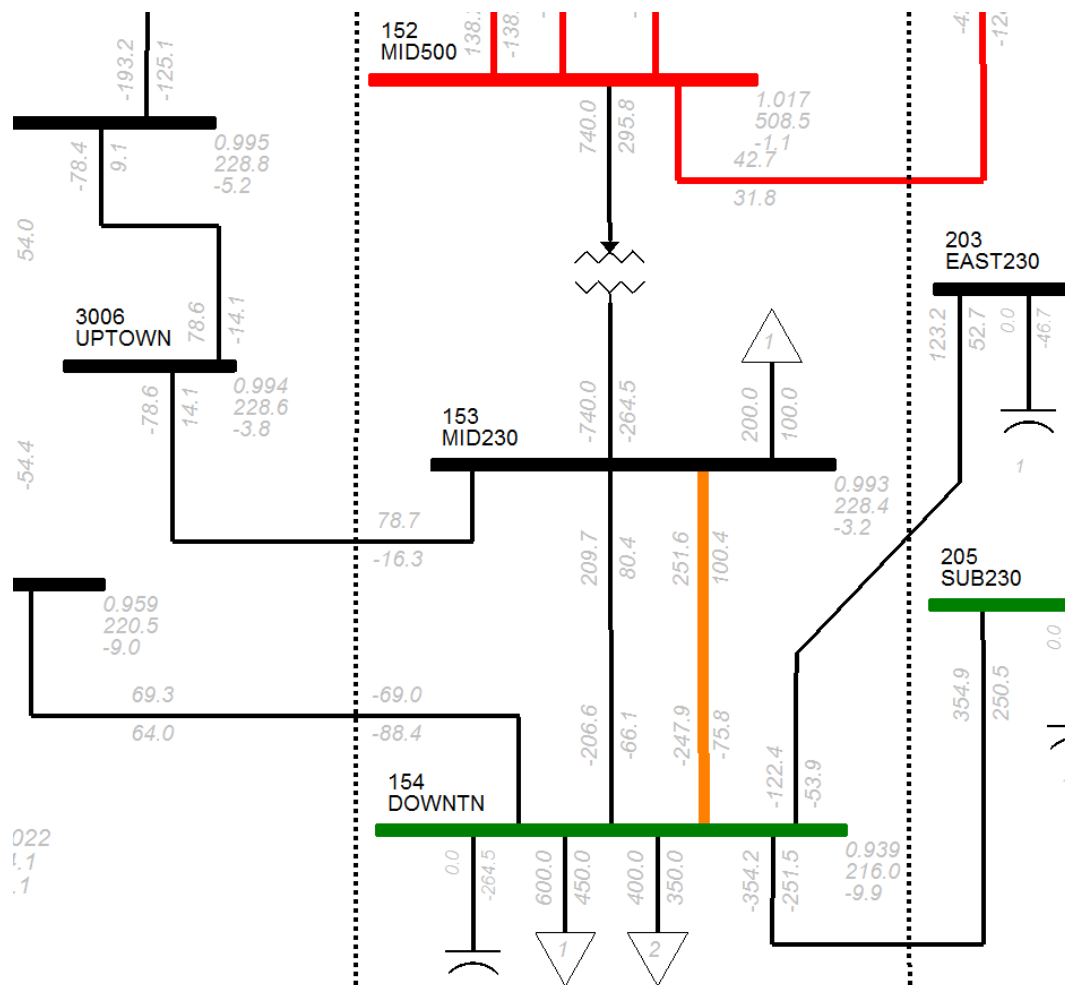


Figur 26 Ställverksmallar i PSS/E

Mallen lägger in ställverket i diagrammet samt tillhörande objekt (noder, brytare, frånskiljare) i saved case. Varje objekt får standardvärden, uppdatera dessa i förekommande fall. I första hand är det nödvändigt att lägga in lämplig rate på brytare och frånskiljare för att bortkopplad last ska beräknas korrekt. Standardvärdet för alla rater är 0 MVA vilket innebär att komponenten inte kan överföra effekt i substation reliability analysen och mängden bortkopplad last blir felaktig.

3.5.2 Exempel på inläggning av ställverk

I detta kapitel beskrivs hur man på ett enkelt sätt kan lägga in en detaljerad modell av ett ställverk för en nod i PSS/E. Testnätet savnw på Examplebiblioteket används i detta exempel. Figuren nedan visar nod 153 i testnätet. Det är tre ledningar, en transformator och en last ansluten till 230 kV noden.

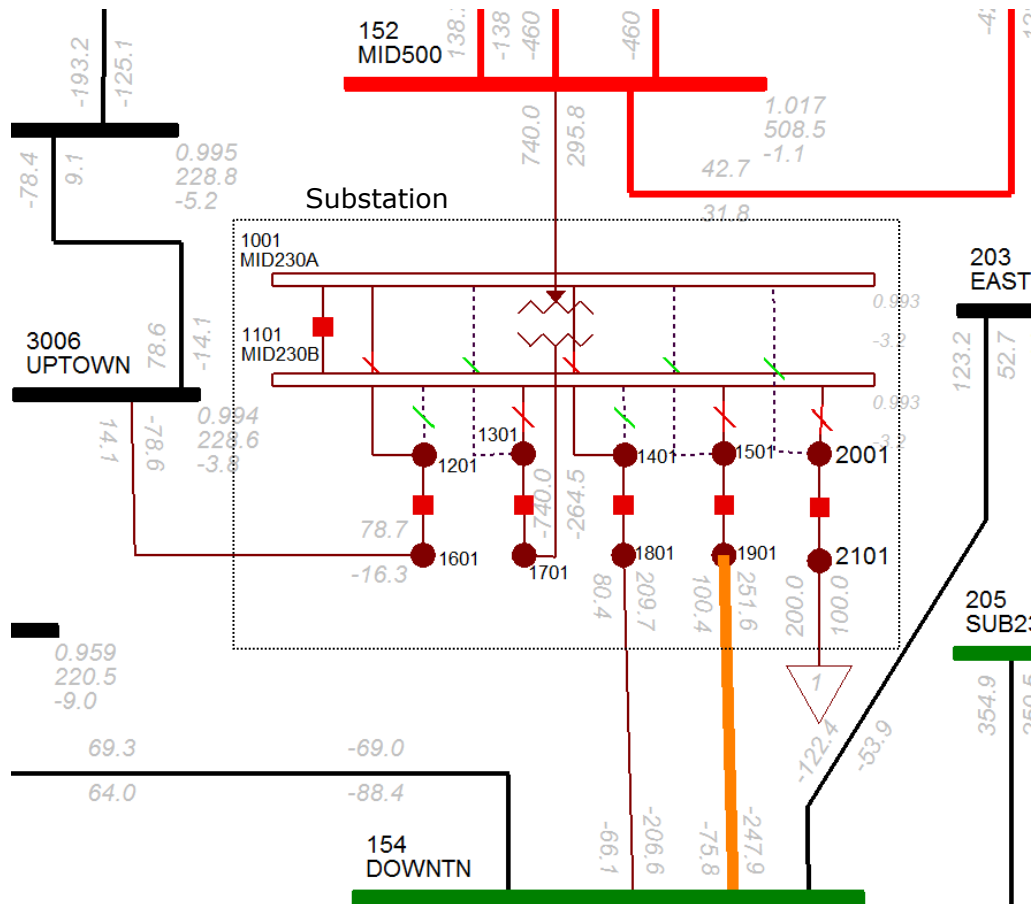


Figur 27 Del av testnät savnw med 23 noder

Vi ska nu ersätta nod 153 med ett AB-ställverk. Ett AB-ställverk med 4 fack (double bus and single breaker with 4 circuits) läggs enkelt in i nätet med verktyget Insert Diagram Template beskrivet ovan. Därefter har följande uppdateringar gjorts:

- Flyttat de anslutna objekten från nod 153 till de nya noder som representerar utgående fack i ställverket.
- Ett femte fack har lagts in för hand med verktygen bus node, breaker och switch.
- De fränskiljare som ska från i normaldrift har kopplats ur drift.
- Lagt in rate A = 5000 MVA för alla brytare och fränskiljare. Detta är viktigt för att beräkningen av bortkopplad last ska bli korrekt.

Efter dessa justeringar ser modellen ut på följande sätt.



Figur 28 Testnät med station MID230 modellerad med ett AB-ställverk

Varje objekt är anslutet till antingen A- eller B-skenan mha fränskiljare. Röd fränskiljare är sluten och grön fränskiljare är öppen. Vid tillförlitlighetsanalys av MID230 kan SUB-filen se ut på följande sätt.

Tabell 19 Subsystemfil för modell av AB-ställverk

```
SUBSYSTEM 'SUBSTATION'
  BUSES 1001 2101
END
SUBSYSTEM 'SOURCE'
  BUS 1001
  BUS 1101
END
SUBSYSTEM 'SINK'
  BUS 1601
  BUS 1701
  BUS 1801
  BUS 1901
  BUS 2101
END
END
```

Alla noder som används för att modellera ställverket MID230 ingår i subsystem SUBSTATION.

Här är de fem noderna där objekten ansluts i ställverket valda till sink bus. Detta innebär att PSS/E beräknar den lastbortkoppling som sker på dessa noder. Det är endast en av de fem lastnoderna (sink bus) som har en last ansluten, de övriga har ledningar eller transformatorer som går till noder i nätet som inte ingår i SUBSTATION.

Observera att bortkopplad last beräknas på följande sätt i PSS/E:

$$P_{\text{curtailed}} = \Sigma \text{LAST} + \Sigma \text{RATE}_{\text{TIES}}$$

Dvs, summan av alla laster på noden samt total RATE för alla ledningar (ties) som går till utomstående noder. Utomstående noder är noder som inte ingår i SUBSTATION. Följande ledningar är ties i vår modell:

- Ledning 1601 – 3006 (Uptown) , rate A = 250 MVA
- Transformator 1701 – 152 (MID500) , rate A = 2500 MVA
- Ledning 1801 – 154 (DOWNTN) nr 1, rate A = 300 MVA
- Ledning 1801 – 154 (DOWNTN) nr 2, rate A = 300 MVA

Felstatistik har lagts in för samlingsskenor och brytare med följande fil.

Tabell 20 Felstatistik för modell av AB-ställverk

```
BREAKERS IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.007 72 0 0 0. 0
BUS 1001 0.0022 12
BUS 1101 0.0022 12
END / slut på felstatistikfil
```

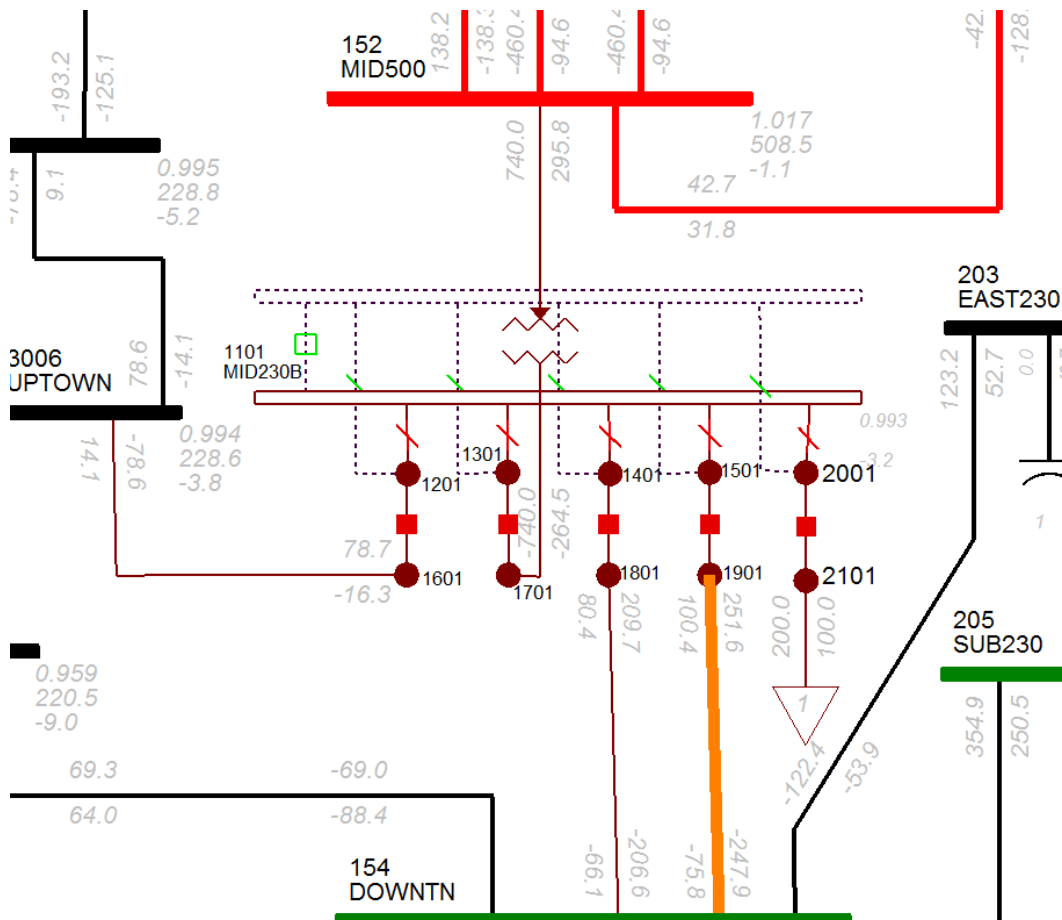
En beräkning med cutoff=0,0001) och ingen misslyckad brytarmanöver (stuck breaker) ger följande resultat:

Tabell 21 PSS/E resultat för station MID230 med AB-ställverk och n-1 fel på samlingsskena och brytare

<----- CONTINGENCY LABEL ----->				STUCK	<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->				
PRIMARY	MD	SECONDARY	MD	BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	
					(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	
BUS 1	F	NONE		NONE	550.00	0.0022	0.00	0.00	0.0022	0.03	
BUS 8	F	NONE		NONE	3000.00	0.0022	0.00	0.00	0.0022	0.03	
BREAKER 35	F	NONE		NONE	3550.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50	
BREAKER 36	F	NONE		NONE	550.00	0.0070	0.01	250.00	0.0070	0.50	
BREAKER 37	F	NONE		NONE	3000.00	0.0070	0.01	2500.00	0.0070	0.50	
BREAKER 38	F	NONE		NONE	550.00	0.0070	0.01	300.00	0.0070	0.50	
BREAKER 39	F	NONE		NONE	3000.00	0.0070	0.01	300.00	0.0070	0.50	
BREAKER 40	F	NONE		NONE	3000.00	0.0070	0.01	200.00	0.0070	0.50	
TOTAL RESULTS											
<----- POST FAULT ----->				<----- POST SWITCHING ----->							
FREQ.				FREQ.		FREQ.		FREQ.			
(OC/Y)				(OC/Y)		(H/Y)		(MW/Y)		(MW/Y)	
0.0464				0.09		103.36		206.72		0.0350	
						2.52		24.85		1789.20	
CONTINGENCY LEGEND:											
LABEL EVENTS											
BUS 1 : OPEN BUS 1001 MID230A											
BUS 8 : OPEN BUS 1101 MID230B											
BREAKER 35 : OPEN LINE FROM BUS 1001 MID230A TO BUS 1101 MID230B CKT @1											
BREAKER 36 : OPEN LINE FROM BUS 1201 TO BUS 1601 CKT @1											
BREAKER 37 : OPEN LINE FROM BUS 1301 TO BUS 1701 CKT @1											
BREAKER 38 : OPEN LINE FROM BUS 1401 TO BUS 1801 CKT @1											
BREAKER 39 : OPEN LINE FROM BUS 1501 TO BUS 1901 CKT @1											
BREAKER 40 : OPEN LINE FROM BUS 2001 TO BUS 2101 CKT @1											

Vid fel på A-skenan öppnar alla brytare runt skenan i POST FAULT. Detta innebär att ledning till UPTOWN med rate 250 MVA och ledning till DOWNTN nr 1 med rate 300 MVA får öppen ledningsbrytare i den studerade stationen. Bortkopplad "last" blir därmed 550 MW för detta fel. På motsvarande sätt leder fel på B-skenan till $2500 + 300 + 200 = 3000$ MW "lastbortkoppling".

I POST switching är det ingen lastbortkoppling eftersom alla objekt då matas via den andra skenan efter det att frånskiljare har manövrerats. Nästa figur visar hur driftläggningen ser i ut i POST SWITCHING vid fel på A-skenan.



Figur 29 Nätbild under POST SWITCHING vid fel på A-skenan

Vid fel på en ledningsbrytare i ett AB-ställverk finns det ingen reservmatning under reparationstiden (POST SWITCHING). Det blir därmed lastbortkoppling för det anslutna objektet, se utskrift i Tabell 21. Vid t.ex. fel på brytare 38 är lastbortkopplingen 300 MW eftersom rate A för den anslutna ledningen är 300 MVA.

Fel på sektioneringsbrytaren (breaker 35) leder till totalt bortfall av hela stationen (3550 MW) under POST FAULT och inget lastbortfall under POST SWITCHING eftersom de bägge skenorna är i drift igen medan sektioneringsbrytaren repareras. Varje brytare i modellen har ju två stycken

implicita frånskiljare (visas inte i modellen) som används för att isolera brytaren i POST SWITCHING.

Om vi även lägger in felstatistik för frånskiljare i statistikfilen med raden SWITCHES IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.0012264 8 0 0 0 0 och gör om beräkningen får vi resultat enligt följande tabell.

Tabell 22 PSS/E resultat för station MID230 med AB-ställverk och n-1 fel på samlingsskena, brytare och frånskiljare

<----- CONTINGENCY LABEL -----> STUCK			<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->				
PRIMARY	MD SECONDARY	MD BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	
			(Mw)	(OC/Y)	(H/Y)	(Mw)	(OC/Y)	(H/Y)	
BUS 1	F NONE	NONE	550.00	0.0022	0.00	0.00	0.0022	0.03	
SWITCH*2	F NONE	NONE	550.00	0.0012	0.00	0.00	0.0012	0.01	
SWITCH 3	F NONE	NONE	550.00	0.0012	0.00	250.00	0.0012	0.01	
SWITCH 5	F NONE	NONE	550.00	0.0012	0.00	300.00	0.0012	0.01	
BUS 8	F NONE	NONE	3000.00	0.0022	0.00	0.00	0.0022	0.03	
SWITCH*9	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	0.00	0.0012	0.01	
SWITCH 11	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	2500.00	0.0012	0.01	
SWITCH 13	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	300.00	0.0012	0.01	
SWITCH 14	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	200.00	0.0012	0.01	
SWITCH*16	F NONE	NONE	550.00	0.0012	0.00	250.00	0.0012	0.01	
SWITCH*18	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	2500.00	0.0012	0.01	
SWITCH*20	F NONE	NONE	550.00	0.0012	0.00	300.00	0.0012	0.01	
SWITCH*22	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	300.00	0.0012	0.01	
SWITCH*24	F NONE	NONE	250.00	0.0012	0.00	250.00	0.0012	0.01	
SWITCH*26	F NONE	NONE	2500.00	0.0012	0.00	2500.00	0.0012	0.01	
SWITCH*28	F NONE	NONE	300.00	0.0012	0.00	300.00	0.0012	0.01	
SWITCH*30	F NONE	NONE	300.00	0.0012	0.00	300.00	0.0012	0.01	
SWITCH*32	F NONE	NONE	3000.00	0.0012	0.00	200.00	0.0012	0.01	
SWITCH*34	F NONE	NONE	200.00	0.0012	0.00	200.00	0.0012	0.01	
BREAKER 35	F NONE	NONE	3550.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50	
BREAKER 36	F NONE	NONE	550.00	0.0070	0.01	250.00	0.0070	0.50	
BREAKER 37	F NONE	NONE	3000.00	0.0070	0.01	2500.00	0.0070	0.50	
BREAKER 38	F NONE	NONE	550.00	0.0070	0.01	300.00	0.0070	0.50	
BREAKER 39	F NONE	NONE	3000.00	0.0070	0.01	300.00	0.0070	0.50	
BREAKER 40	F NONE	NONE	3000.00	0.0070	0.01	200.00	0.0070	0.50	
TOTAL RESULTS			<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->				
	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	
	(OC/Y)	(H/Y)	(Mw/Y)	(MwH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(Mw/Y)	(MwH/Y)	
	0.0672	0.13	136.84	273.68	0.0534	2.67	37.91	1893.69	
CONTINGENCY LEGEND:									
LABEL EVENTS									
BUS 1	: OPEN BUS	1001	MID230A						
SWITCH*2	: OPEN LINE FROM BUS	1001	MID230A		TO BUS	1101	MID230B		CKT *
SWITCH 3	: OPEN LINE FROM BUS	1001	MID230A		TO BUS	1201			CKT *1
SWITCH 5	: OPEN LINE FROM BUS	1001	MID230A		TO BUS	1401			CKT *1
BUS 8	: OPEN BUS	1101	MID230B						
SWITCH*9	: OPEN LINE FROM BUS	1101	MID230B		TO BUS	1001	MID230A		CKT *
SWITCH 11	: OPEN LINE FROM BUS	1101	MID230B		TO BUS	1301			CKT *1
SWITCH 13	: OPEN LINE FROM BUS	1101	MID230B		TO BUS	1501			CKT *1
SWITCH 14	: OPEN LINE FROM BUS	1101	MID230B		TO BUS	2001			CKT *1
SWITCH*16	: OPEN LINE FROM BUS	1201			TO BUS	1601			CKT *
SWITCH*18	: OPEN LINE FROM BUS	1301			TO BUS	1701			CKT *
SWITCH*20	: OPEN LINE FROM BUS	1401			TO BUS	1801			CKT *
SWITCH*22	: OPEN LINE FROM BUS	1501			TO BUS	1901			CKT *
SWITCH*24	: OPEN LINE FROM BUS	1601			TO BUS	1201			CKT *
SWITCH*26	: OPEN LINE FROM BUS	1701			TO BUS	1301			CKT *
SWITCH*28	: OPEN LINE FROM BUS	1801			TO BUS	1401			CKT *
SWITCH*30	: OPEN LINE FROM BUS	1901			TO BUS	1501			CKT *
SWITCH*32	: OPEN LINE FROM BUS	2001			TO BUS	2101			CKT *
SWITCH*34	: OPEN LINE FROM BUS	2101			TO BUS	2001			CKT *
BREAKER 35	: OPEN LINE FROM BUS	1001	MID230A		TO BUS	1101	MID230B		CKT @1
BREAKER 36	: OPEN LINE FROM BUS	1201			TO BUS	1601			CKT @1
BREAKER 37	: OPEN LINE FROM BUS	1301			TO BUS	1701			CKT @1
BREAKER 38	: OPEN LINE FROM BUS	1401			TO BUS	1801			CKT @1
BREAKER 39	: OPEN LINE FROM BUS	1501			TO BUS	1901			CKT @1
BREAKER 40	: OPEN LINE FROM BUS	2001			TO BUS	2101			CKT @1

Det finns 5 stycken frånskiljare i modellen som visas i Figur 28. De är numrerade med 3, 5, 11, 13 och 14 i tabellen ovan. Varje brytare i modellen har dessutom två implicita frånskiljare som inte visas i diagrammet. Fel på implicita frånskiljare visas med en asterisk framför numret, t.ex. SWITCH*2 är sektioneringsbrytarens frånskiljare mot A-skenan. Eftersom det är 6 brytare i modellen finns det 12 implicita frånskiljare.

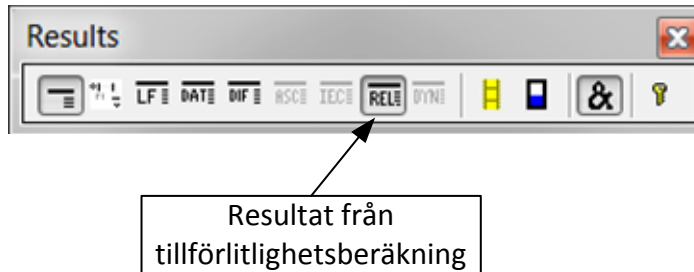
3.6 Utdata från tillförlitlighetsanalys

Resultaten för tillförlitlighetsmodulen redovisas i ett antal rapporter vilka väljs när RA-/SRA-analyserna körs, där ett antal nyckeltal återges:

- Överlastade ledningar/transformatorer
Totalt antal överlastade ledningar/transformatorer redovisas tillsammans med varje enskild lednings överlast.
- Noder med för hög/låg spänning
Totalt antal noder med spänning över/under givna gränsvärden redovisas tillsammans med varje enskild nods över/underspänning.
- Frekvens för felfall (händelser/år)
Totala antalet felfall/år redovisas, tillsammans med frekvensen för varje enskilt felfall.
- Varaktighet för felfall (h)
Varaktigheten för varje enskilt felfall redovisas.
- Sannolikhet för felfall (h/år)
Sannolikheten för varje enskilt felfall redovisas i h/år tillsammans med summan av sannolikheten för alla fel.
- Bortkopplad last (MW)
Anger hur stor last som tappar matning vid varje enskilt felfall.
- Störningsindex (p.u.)
Indexet är ett mått på hur allvarligt ett felfall är. Allvarlighetsgraden redovisas för varje enskilt felfall och som en summa av index för alla fel.
- Bortkopplad effekt (MW/år)
Bortkopplad effekt är produkten av bortkopplad last och frekvensen för lastbortkopplingen, redovisas för varje enskilt felfall och som en summa för alla felfall.
- Icke levererad energi (MWh/år)
Är ett mått på den energi som borde ha levererats, men inte kom fram p.g.a. ett fel. Redovisas för varje enskilt fel, samt som en summa för alla felfall.

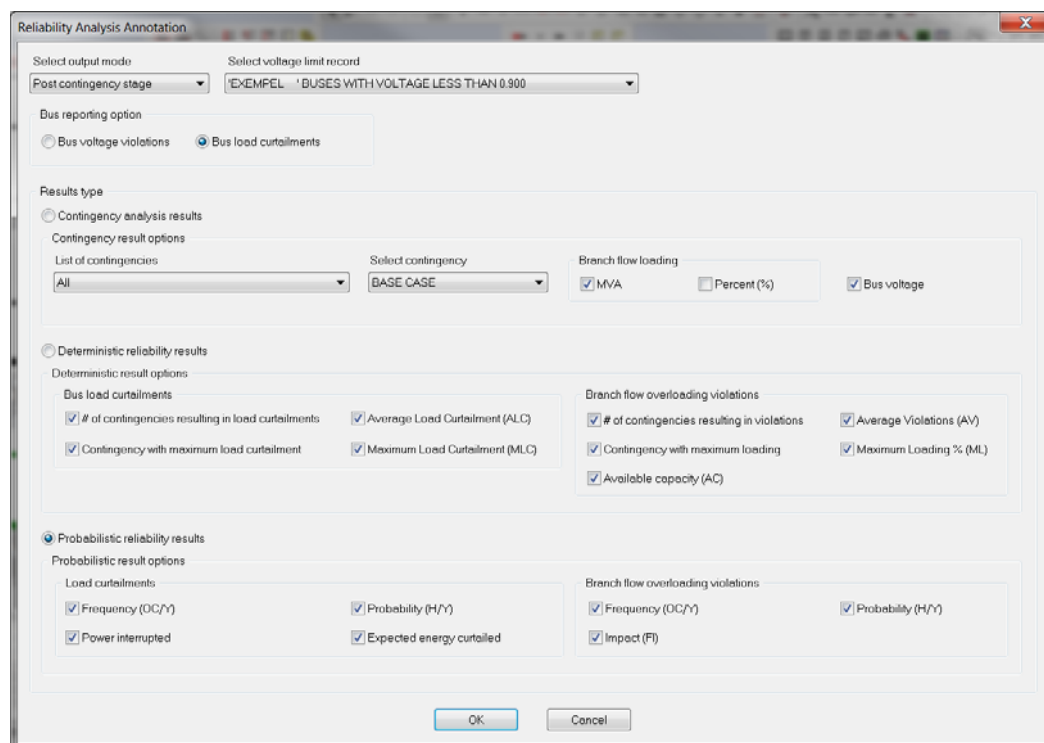
De redovisade nyckeltalen beskrivs även i kapitel 4.

Efter en genomförd RA- eller SRA-analys kan resultaten presenteras grafiskt i slider-diagrammet, genom att välja vyn för tillförlitlighetsberäkningar enligt Figur 30

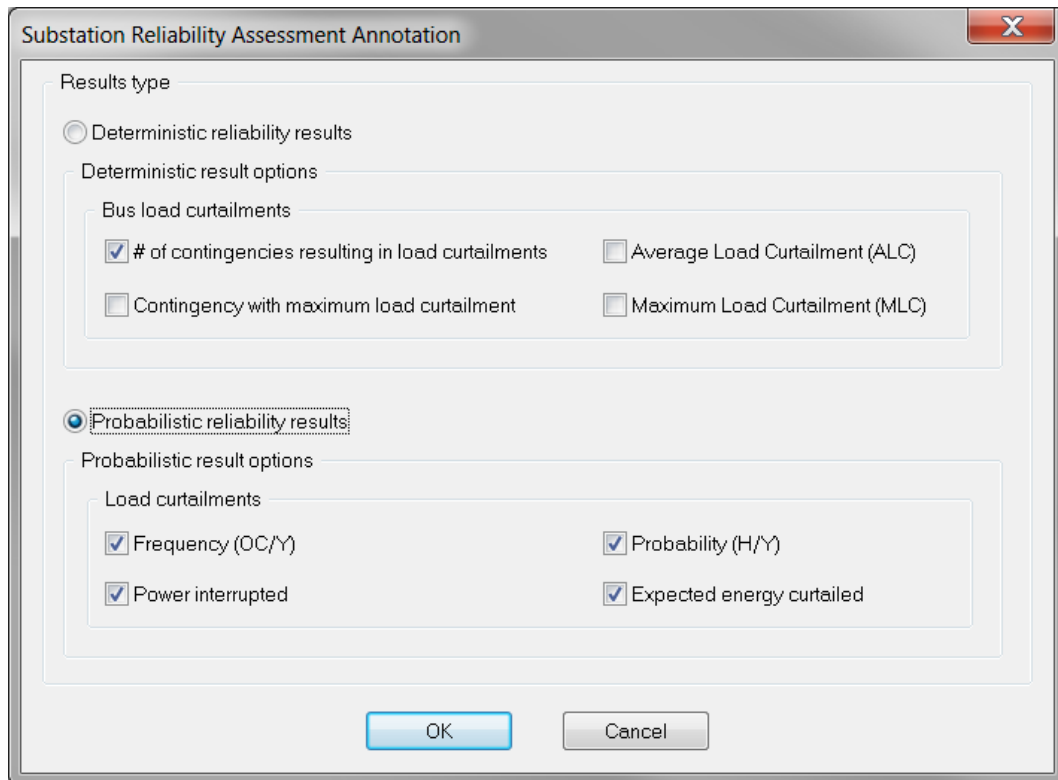


Figur 30 Verktygsfält för resultatvisning

Figur 31 och Figur 32 visar vilka inställningar som kan göras för presentation av tillförlitlighetsdata i slider-diagram. För RA-analysen kan det göras något fler inställningar än för SRA-analysen.



Figur 31 Diagram annotation för RA-analys



The image shows a software dialog box titled "Substation Reliability Assessment Annotation". It contains two main sections for selecting results types and options. The "Results type" section has two radio buttons: "Deterministic reliability results" (unselected) and "Probabilistic reliability results" (selected). The "Deterministic result options" section is nested under the first radio button and contains a sub-section "Bus load curtailments" with four checkboxes: "# of contingencies resulting in load curtailments" (checked), "Average Load Curtailment (ALC)" (unchecked), "Contingency with maximum load curtailment" (unchecked), and "Maximum Load Curtailment (MLC)" (unchecked). The "Probabilistic result options" section is nested under the second radio button and contains a sub-section "Load curtailments" with four checkboxes: "Frequency (OC/Y)" (checked), "Probability (H/Y)" (checked), "Power interrupted" (checked), and "Expected energy curtailed" (checked). At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

Substation Reliability Assessment Annotation

Results type

☐ Deterministic reliability results

Deterministic result options

Bus load curtailments

☒ # of contingencies resulting in load curtailments

☐ Average Load Curtailment (ALC)

☐ Contingency with maximum load curtailment

☐ Maximum Load Curtailment (MLC)

☒ Probabilistic reliability results

Probabilistic result options

Load curtailments

☒ Frequency (OC/Y)

☒ Probability (H/Y)

☒ Power interrupted

☒ Expected energy curtailed

OK Cancel

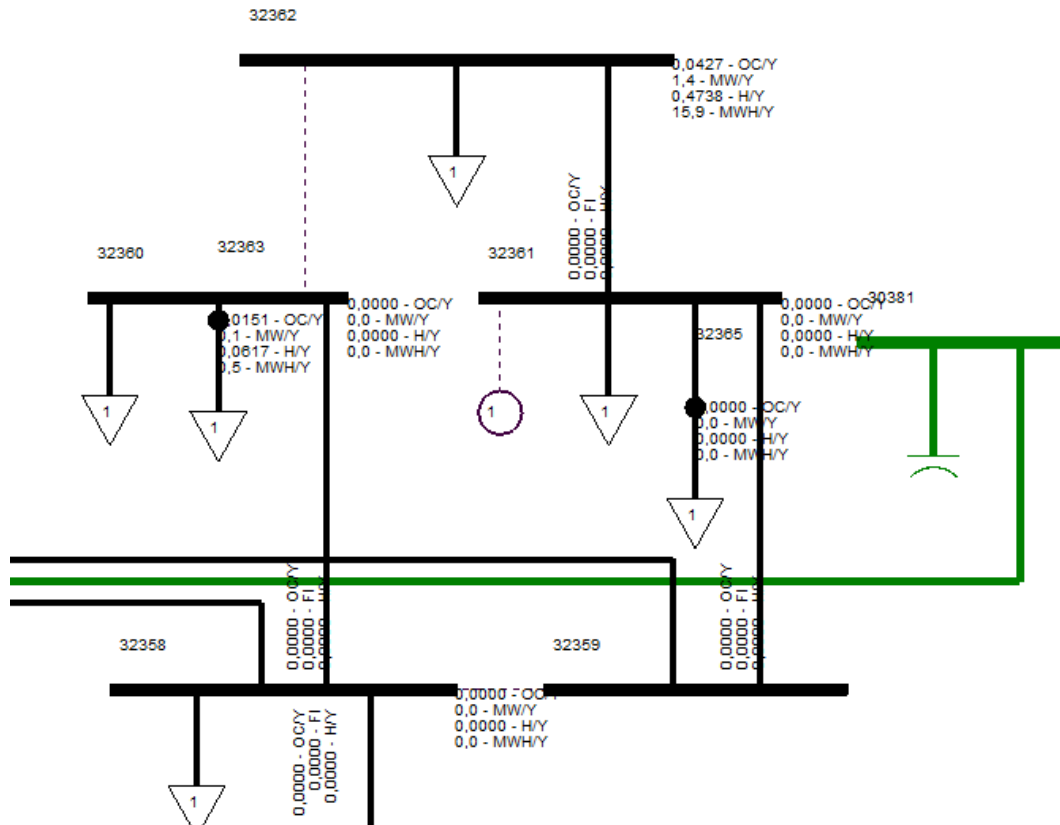
Figur 32 Diagram annotation för SRA-analys

I Tabell 23 förklaras vilka inställningar som kan göras för grafisk presentation av resultaten från tillförlitlighetsberäkning.

Tabell 23 Förklaring av grafisk presentation av resultat

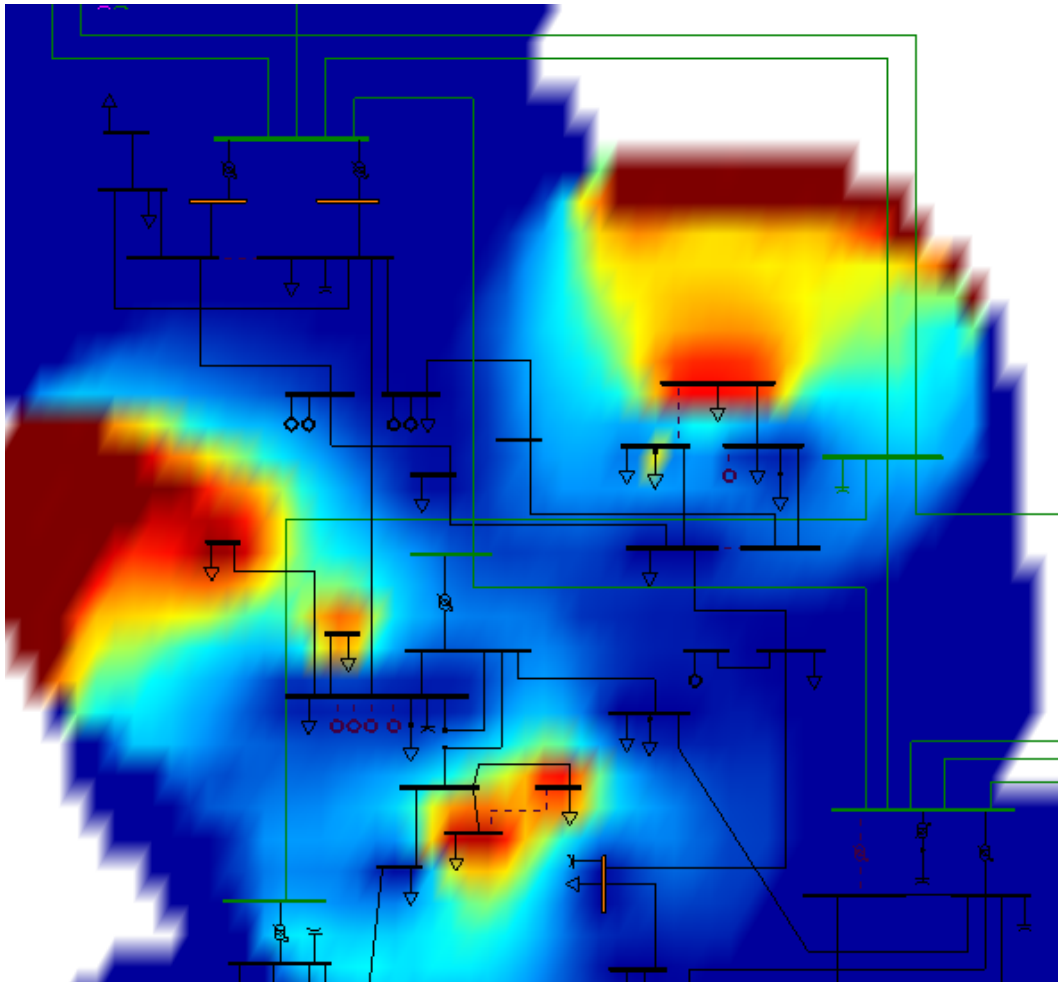
Parameter	Innebörd
Select output mode	Anger för vilket tillstånd utdata redovisas.
Select voltage limit record	Anger vilken spänningsgräns-överskridning som redovisas i diagrammet, endast en spänningsgränsöverskridning åt gången kan visas.
Bus reporting option	Anger om resultat för spänningsgränsöverskridning eller bortkopplad last redovisas.
Results type	Anger vilka av nedanstående resultat som visas, endast en av följande grupper kan visas åt gången: • Contingency result options • Deterministic result options • Probabilistic result options
Contingency result options	Visar resultat för enskilda felfall.
Deterministic result options	Visar deterministiska resultat.
Probabilistic result options	Visar probabilistiska resultat.

I Figur 33 visas exempel på probabilistiska resultat, för nod 32362 gäller att det sker 0.0427 fel/år i systemet som leder till lastbortfall för den anslutna lasten, icke levererad energi p.g.a. att den till noden anslutna lasten faller bort uppgår till 15.9 MWh/år.



Figur 33 Probabilistiska resultat i slider-diagram

Om man utöver den grafiska presentationen använder funktionen Contour får man ett mycket kraftigt verktyg som snabbt grafiskt visar vilka delar i systemet som är känsliga för fel. I Figur 34 visas probabilistiska resultat med Contour.



Figur 34 Probabilistiska resultat med Contour

3.7 Buggar

Under utredningen har ett antal buggar i PSS/E identifierats enligt Tabell 24. **Error! Reference source not found.** nedan. Tillverkaren av PSS/E, Siemens Power Technologies International har meddelats, och kommer att åtgärda dem till kommande versioner av programmet. Denna utredning är genomförd med PSS/E-version 32.1.0, men buggarna har även kunnat bekräftas i version 33.1.0. Under maj 2012 släpptes version 33.1.1 av PSS/E, där kunde konstateras att en utav nedanstående buggar åtgärdats.

Tabell 24 Buggar

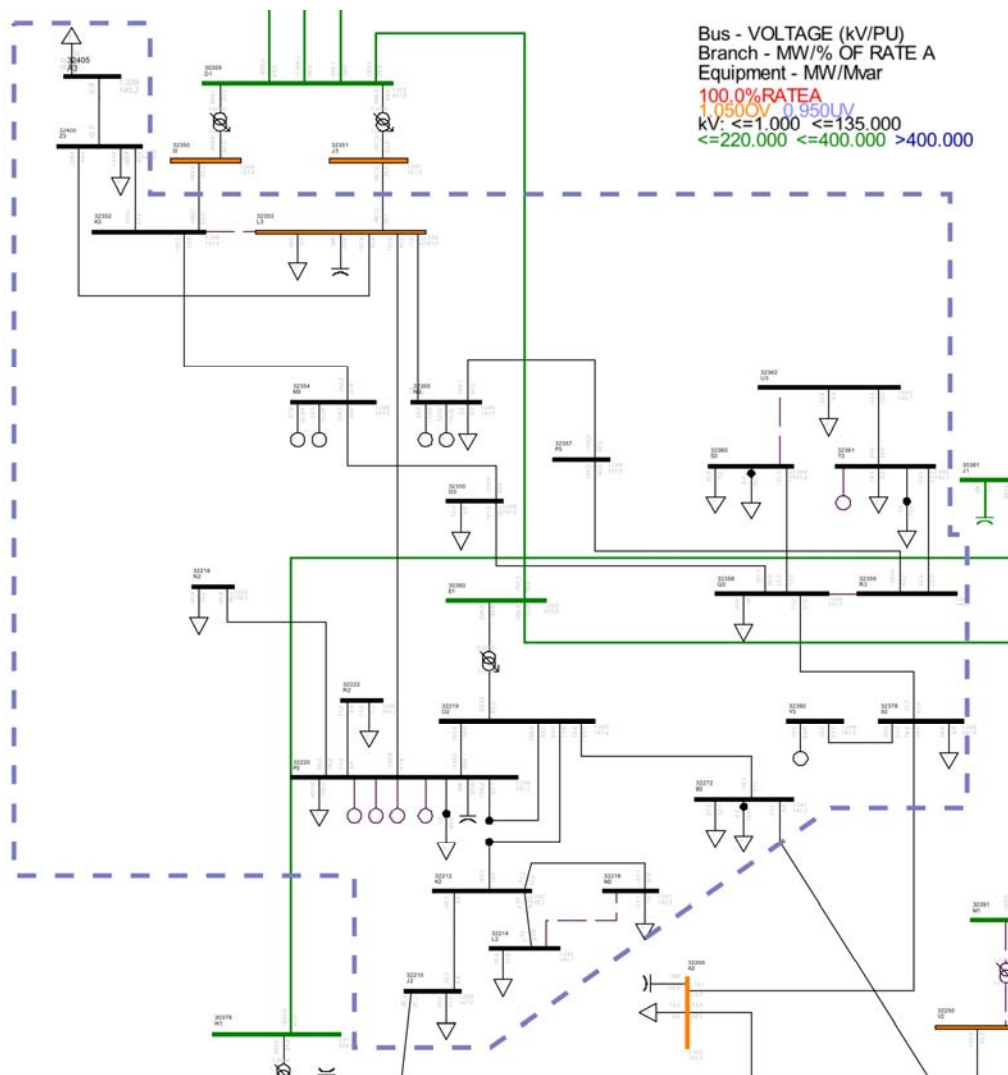
Bugg	I RA tar PSS/E inte hänsyn till inlagd data för felstatistik för noder, utan använder istället inlagd data för de linjer som är anslutna till respektive noder.
Problem	Felstatistik för noder kan i nuläget inte användas.
Åtgärd	Åtgärd utlovades till version 31.1.1 av PSS/E, men tester visar att buggen ej åtgärdats i den versionen. Tills buggen är åtgärdad kan nodfel simuleras genom att skapa ett egendefinerat felfall som kopplar bort alla ledningar som är anslutna till respektive nod.
Bugg	För vissa kombinationer av fel beräknas inte bortkopplad last korrekt i tillståndet "Post switching", utan den sätts till 0 MW. Se stycke 4.2.2.
Problem	Sannolikheten för kombinerade fel är väldigt låg, varför denna bugg har liten inverkan på beräkningsresultat.
Åtgärd	Kommer att åtgärdas, men ej i version (33.1.1)
Bugg	För vissa fel i SRA tas inte all bortkopplad last med i tillståndet "Post fault". Se stycke 4.2.5.
Problem	Den bortkopplade lasten och därmed icke levererade energin blir för lågt beräknade.
Åtgärd	Åtgärd utlovades till version 31.1.1 av PSS/E, men tester visar att buggen ej åtgärdats i den versionen. Tills buggen är åtgärdad kan det i vissa fall räcka att utöka "sink system" till grannoderna till den last som borde ha kopplats bort.

4 Tillämpning på projekt

Tillförlitlighetsanalyserna (RA och SRA) har tillämpats på var sitt projekt, av sekretesskäl har stationsnamn utelämnats i denna rapport. Indata, tillvägagångssätt och resultat redovisas i detta kapitel för både RA-analys och SRA-analys.

4.1 Probabilistic Reliability Assessment

I Figur 35 visas slider-diagram för det studerade nätet. Den studerade PSS/E-balansen innehåller många fler noder än vad som visas i slider-diagrammet, därför måste de genomförda analyserna avgränsas till det studerade området. Den streckade linjen visar vilka noder som ingår i studien.



Figur 35 Slider-diagram för exempelnät

I denna exempelstudie kommer enbart *en* layout att analyseras för att åskådliggöra metoderna för tillförlitlighetsanalys. Men i en verklig studie kan flera alternativa layouter komma att ställas mot varandra, där de i studien framtagna nyckeltalen används som hjälpmedel i valet av layout.

4.1.1 Indatafiler

Det första steget i RA-analysen är att skapa indata-filer, innehållet i dessa visas nedan, filerna kan skapas i en valfri text-editor.

En Subsystem-fil med namn Exempel.sub skapas. I filen definieras de i studien använda Subsystemen. I detta fall används endast ett subsystem som består av all noder i exempel-området vilket visas i Figur 35 ovan. Subsystemets namn anges till "EXEMPEL" och alla ingående noder listas enligt texten nedan som visar filens innehåll:

Tabell 25 .sub-fil

```
COM DEFINIERA DET SUBSYSTEM SOM STUDIEN GENOMFÖRS PÅ
```

```
SUBSYSTEM EXEMPEL
```

```
BUS 30360
```

```
BUS 32210
```

```
BUS 32212
```

```
BUS 32214
```

```
BUS 32216
```

```
BUS 32218
```

```
BUS 32219
```

```
BUS 32220
```

```
BUS 32221
```

```
BUS 32222
```

```
BUS 32228
```

```
BUS 32229
```

```
BUS 32272
```

```
BUS 32273
```

```
BUS 32352
```

```
BUS 32353
```

```
BUS 32354
```

```
BUS 32355
```

```
BUS 32356
```

```
BUS 32357
```

```
BUS 32358
```

```
BUS 32359
```

```
BUS 32360
```

```
BUS 32361
```

```
BUS 32362
BUS 32363
BUS 32365
BUS 32378
BUS 32380
BUS 32400
BUS 32405
END

END
```

En .mon-fil med namn Exempel.mon skapas. I filen anges vilka ledningar och noder som ska övervakas med avseende på överlast och avvikande spänning. I detta fall övervakas alla ledningar, transformatorer och noder i exempel-systemet som visas i Figur 35 ovan. Texten nedan visar filens innehåll:

Tabell 26 .mon-fil

```
COM SPECIFICERAR VILKA OBJEKT SOM ÖVERVAKAS

MONITOR BRANCHES IN SUBSYSTEM EXEMPEL
MONITOR VOLTAGE RANGE SUBSYSTEM EXEMPEL 0.9 1.05
END
```

En .con-fil med namn Exempel.con skapas. I filen anges vilka felfall som ska tas med i studien. I detta fall tas fel på alla ledningar, tvålindnings-transformatorer, noder och generatorer med som finns i exempel-systemet vilket visas i Figur 35 ovan. Texten nedan visar filens innehåll:

Tabell 27 .con-fil

```
COM FELFALL FÖR RELIABILITY ASSESSMENT

SINGLE LINE IN SUBSYSTEM EXEMPEL
SINGLE BUS IN SUBSYSTEM EXEMPEL
SINGLE MACHINE IN SUBSYSTEM EXEMPEL

END
```

En .prb-fil med namn Exempel.prb skapas. I filen anges felstatistik för de komponenter som ska ingå i studien, för att fel på en viss komponent ska kunna ingå måste detta fel även vara specificerat i .con filen. I detta fall tas fel på alla ledningar, tvålindningstransformatörer, noder och generatorer med som finns i exempel-systemet vilket visas i Figur 35 ovan. Texten nedan visar filens innehåll:

Tabell 28 .prb-fil

```
COM ANGE FELSTATISTIK FÖR DE KOMPONENTER SOM INGÅR I STUDIEN

COM LEDNINGSFEL: XM=0.3 OHM/KM, BM=0.000003 S/KM, FELFREKVEN ANSL.=0.015
GGR/ÅR, VARAKTIGHET ANSL.=4
COM FELFREKVEN LEDN.=0.0175 FEL/(KM*ÅR), VARAKTIGHET LEDN.=15 H
LINES IN SUBSYSTEM EXEMPEL 0.3 0.000003 0.015 4 0.0175 15

COM TRANSFORMATORFEL: FELFREKVEN=0.03 FEL/ÅR, VARAKTIGHET=600 H
TRANSFORMERS IN SUBSYSTEM EXEMPEL 0.03 600

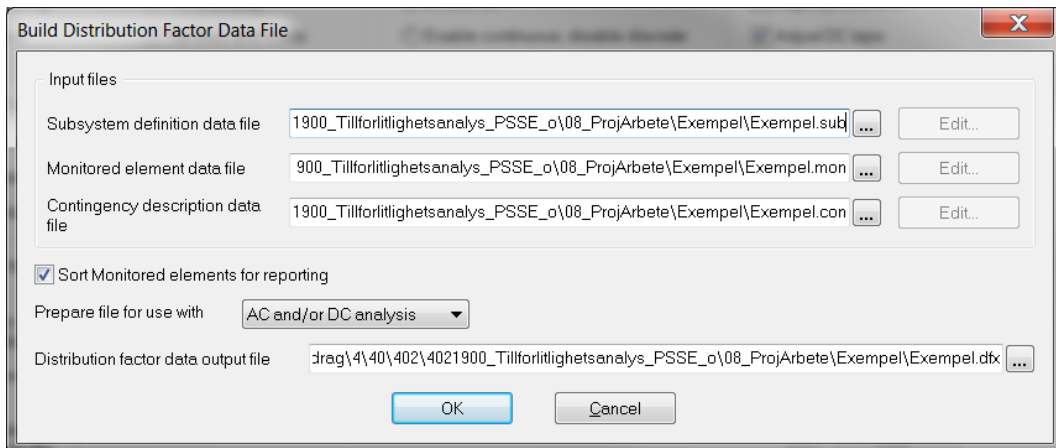
COM NODFEL: FELFREKVEN=0.005 FEL/ÅR, VARAKTIGHET FEL=10 H
COM FREKVEN OPLAN. UNDERH.=0.0 GGR/ÅR, VARAKTIGHET OPLAN. UNDERH.=0 H
COM FREKVEN PLAN. UNDERH.=0.0 GGR/ÅR, VARAKTIGHET PLAN. UNDERH.=0 H
BUSES IN SUBSYSTEM EXEMPEL 0.005 10 0.0 0.0 0.0 0.0

COM GENERATORFEL: FEL PÅ GENERATORER MED EFFEKT 0-9999 MW
COM FELFREKVEN=0.05 FEL/ÅR, VARAKTIGHET=300 H
MACHINES 0 9999 IN SUBSYSTEM EXEMPEL 0.05 300

END
```

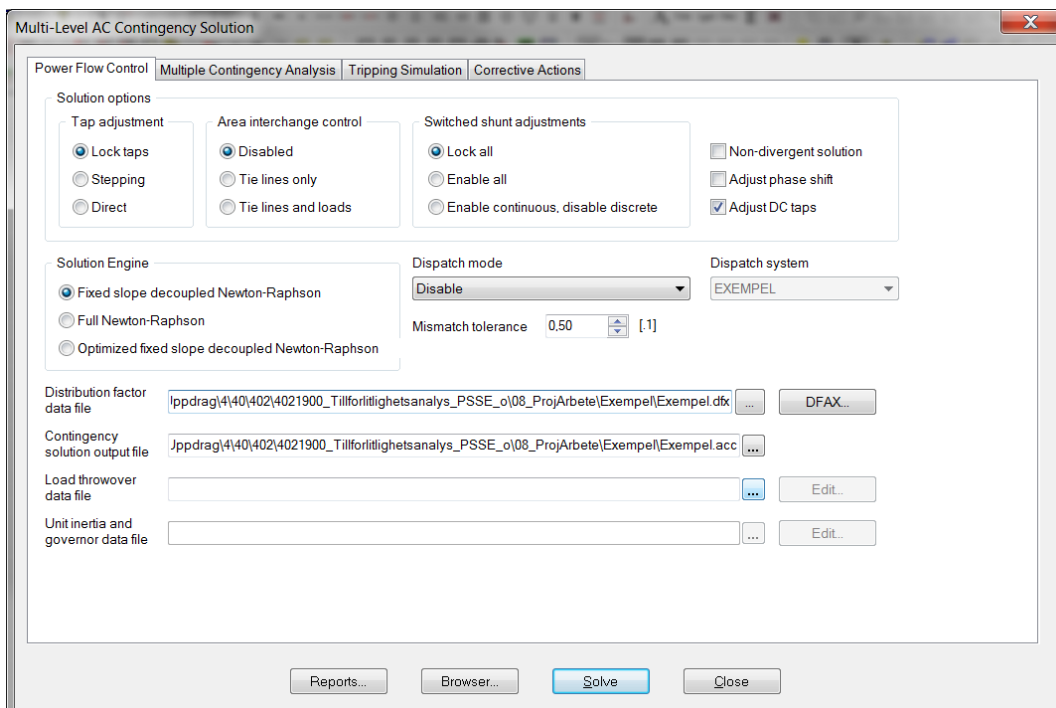
4.1.2 Genomförande

Efter att alla indata-filer är skapade körs aktiviteten Multi-Level-ACCC, Figur 36 visar dialogrutan för att skapa .dfx-filen. De tidigare skapade indata-filerna Exempel.sub, Exempel.mon och Exempel.con läses in, och en .dfx-fil skapas enligt figuren.



Figur 36 Dialogruta för .dfx-fil

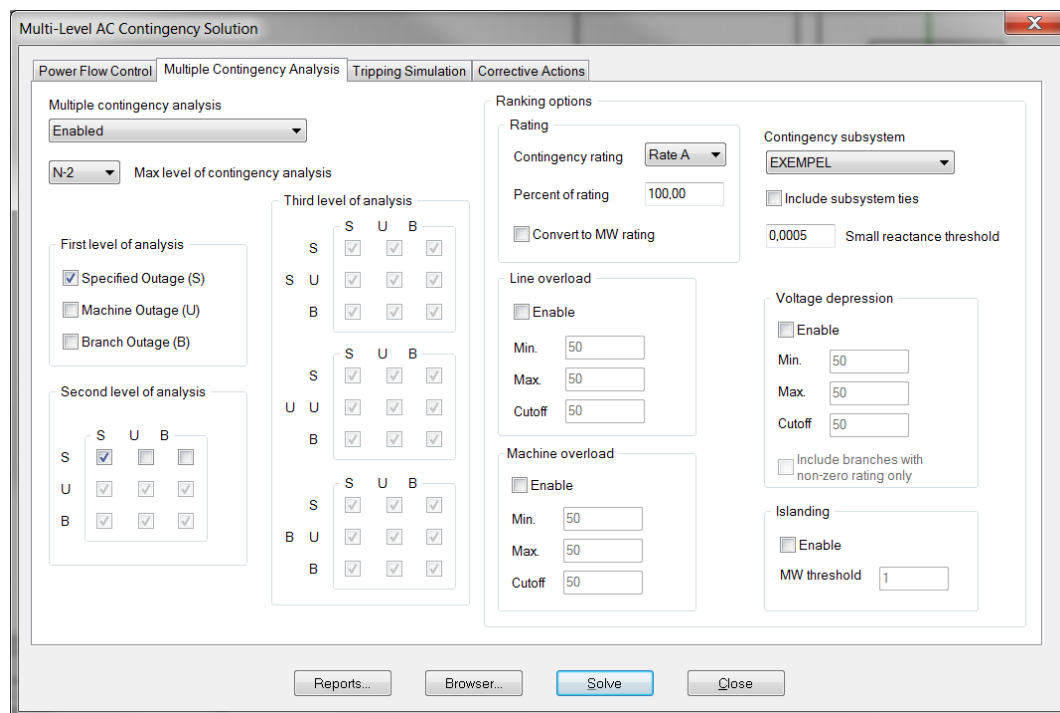
Figur 37 visar dialogrutan för Multi-Level ACCC-analys, där den nyligen skapade .dfx-filen är inläst. Multi-Level ACCC-analysen genererar en utdatafil, Exempel.acc enligt figuren nedan. Det kan även genereras ett antal rapporter i Multi-Level ACCC-analysen, men de går ej igenom i denna rapport, ej heller flikarna "Tripping Simulation" eller "Corrective Actions" går igenom.



Figur 37 Dialogruta för Multi-Level ACCC-analys, flik 1

I filen "Load throwover data file" anges hur laster redistribueras till en annan nod om den ursprungliga noden skulle bli bortkopplad. I filen "Unit Inertia and Governor Data File" anges hur generatorer styrs. Användandet av dessa båda filer redovisas inte i denna rapport.

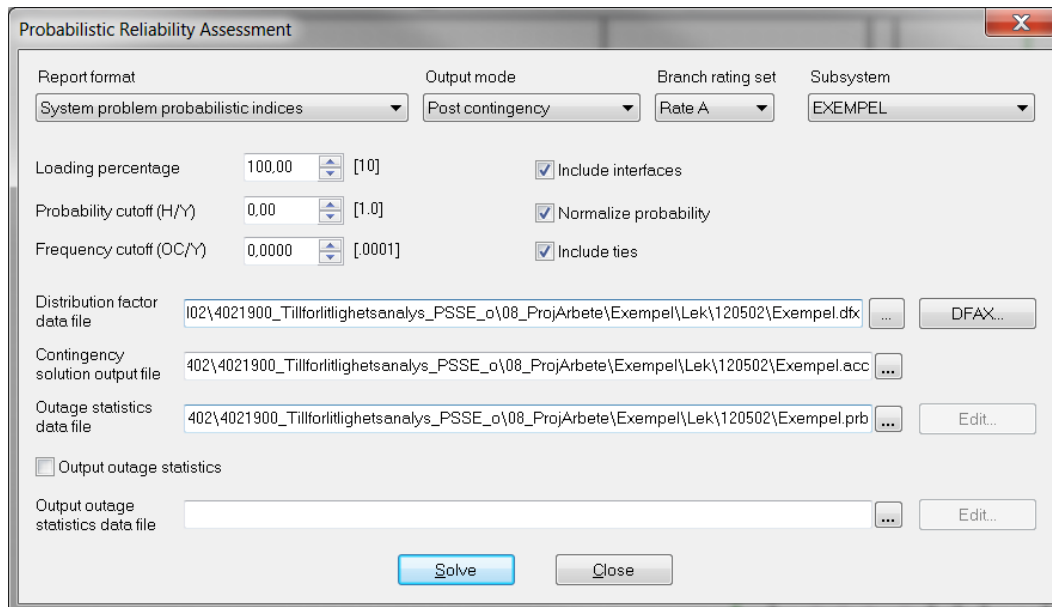
I den andra fliken för Multi-Level ACCC-analys anges vilka fel som ska tas med i analysen. För att ett fel ska kunna tas med i RA-analysen måste det ha tagits med i Multi-Level ACCC-analysen. Figur 38 visar den andra fliken för Multi-Level ACCC-analys. I den vänstra delen av dialogrutan anges hur djup (t.ex. N-1, N-2, N-3) analysen ska vara, samt vilka fel som ska beaktas. I detta exempel genomförs en N-2-analys, och enbart de fel som är specificerade i filen Exempel.con behandlas. Det finns även möjlighet att låta PSS/E generera felfall automatiskt, om detta önskas klickas rutorna "Machine Outage" och "Branch Outage" i, samt att rutorna "Enable" i den högra delen av dialogrutan klickas i för de önskade felen. Eftersom det inte är önskvärt att ta upp automatiskt genererade fel i detta exempel kan det helt bortses från den högra delen av dialogrutan.



Figur 38 Dialogruta för Multi-Level ACCC-analys, flik 2

När alla inställningar är gjorda klickar man på "Solve"-knappen, varpå den specificerade utdatafilen Exempel.acc genereras.

När .acc-filen har skapats kan RA-analysen köras igång. Figur 39 visar dialogrutan för RA-analysen med de tidigare skapade filerna Exempel.dfx, Exempel.acc och Exempel.prb inlästa.



Figur 39 Dialogruta för RA-analysen

4.1.3 Resultat

RA-analysen kan generera ett antal rapporter, dels rent deterministiska som enbart redovisar vilka felfall som behandlas och vad de leder till (t.ex. överlast, avvikande spänning), men också probabilistiska rapporter som även innehåller felfrekvenser och varaktigheter. De rapporter som kan genereras i RA-analysen listas i Tabell 29.

Tabell 29 Utdata från RA-analysen

Rapport	Innehåll
System problem summary	Redovisar antal fel och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande avvikande spänning, överlast, bortkopplad last eller ej konvergerad balans.
System loss of load	Redovisar antal fel och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande bortkopplad last, för lastbortkopplingar indelade i effektintervall om 10 MW.
Bus loss of load	Redovisar antal fel och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande bortkopplad last, för lastbortkopplingar indelade efter vilken nod lasten sitter på.
Branch flow overloading	Redovisar antal fel och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande överlastade ledningar och transformatorer.
Bus voltage violation	Redovisar antal fel och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande för hög/låg spänning. Resultaten redovisas per nod.
Contingency summary	Redovisar ej konvergerad balans, bortkopplad last, överlast, eller avvikande spänning för varje enskilt felfall.
System problem probabilistic indices	Redovisar antal fel, felfrekvens, sannolikhet och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande avvikande spänning, överlast, bortkopplad last eller ej konvergerad balans.
System load curtailment probabilistic indices	Redovisar antal fel, felfrekvens, sannolikhet, icke levererad energi och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande bortkopplad last, för lastbortkopplingar indelade i effektintervall om 10 MW.
Bus load curtailment probabilistic indices	Redovisar antal fel, felfrekvens, sannolikhet, icke levererad energi och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande bortkopplad last, för lastbortkopplingar indelade efter vilken nod lasten sitter på.

Branch flow overloading probabilistic indices	Redovisar antal fel, felfrekvens, sannolikhet och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande överlastade ledningar och transformatorer.
Bus voltage violation probabilistic indices	Redovisar antal fel, felfrekvens, sannolikhet och det fel som orsakar den kraftigaste störningen gällande avvikande spänning. Resultaten redovisas per nod.
Contingency summary with outage statistics	Redovisar felfrekvens och sannolikhet för varje enskilt felfall med avseende på konvergerad balans, bortkopplad last, överlast, eller avvikande spänning.

Utöver de nyckeltal som beskrivs i tabellen ovan redovisas ytterligare ett antal som utdata från RA-analysen: "A.I.P.", "I.P.", "B.I.P.", "B.E.U.", dessa nyckeltal beskrivs inte i denna rapport, för deras definitioner hänvisas till PSS/E-manualen.

I aktuell version av PSS/E (33.1.0) tas inte felstatistik för nodfel med som den borde, vilket påverkar nedanstående resultat. För en utförligare beskrivning av detta fel, se kapitel 3.7.

För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31, de probabilistiska resultaten redovisas och kommenteras nedan:

System problem report

<-- FAILURE CRITERIA -->	FREQ.	DURATION	PROB.	IMPACT	NO. OF	WORST.	WORST
	(OC/Y)	(HOURS)	(H/Y)		CONT.	VIOL.	CONT.
'EXEMPEL ' BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.900 (PU)	0.0008	9.9	0.0	0.00	81	0.845	25_17
'EXEMPEL ' BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.050 (PU)	0.6396	14.5	9.3	0.06	50	1.068	3_33
OVERLOAD (%)	1.4765	14.6	21.6	1.42	82	196.465	31_4
LOSS OF LOAD (MW)	1.1863	13.8	16.4	1146.70	381	560.280	26_10
NOT CONVERGE	0.0003	6.8	0.0		5		
ENTIRE SYSTEM TOTAL	2.7185	14.2	38.7		481		

Rapporten är en sammanställning av alla fel och deras konsekvenser i det studerade området. Som exempel kan nämnas att det sker 1,4765 fel/år som leder till överlast, den genomsnittliga varaktigheten för dessa fel är 14,6 h, sannolikheten att någon del i systemet är överlastad är 21,6 h/år, det är 82 fel som orsakar överlast, och det värsta av dem är det som betecknas 31_4.

För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31.

System load curtailment report

<-- LOAD CURTAILMENTS -->		FREQ. DURATION		PROB.	I.P.	E.U.E.	NO. OF	WORST	CONT.
<-----	(MW)	----->	(OC/Y)	(HOUR)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	CONT.	
0.0	-- 10.0		0.0153	4.1	0.1	0.12	0.50	47	1_26
10.0	-- 20.0		0.0471	11.4	0.5	0.52	5.90	35	12_15
30.0	-- 40.0		0.2137	13.4	2.9	6.72	89.70	77	28_15
40.0	-- 50.0		0.0000	6.1	0.0	0.00	0.01	4	12_16
50.0	-- 60.0		0.3243	13.4	4.3	16.79	225.19	137	4_23
60.0	-- 70.0		0.0001	6.0	0.0	0.00	0.03	10	24_4
80.0	-- 90.0		0.0002	6.8	0.0	0.02	0.10	11	28_16
90.0	-- 100.0		0.5851	14.7	8.6	56.06	824.99	4	1_5
100.0	-- 110.0		0.0004	7.0	0.0	0.04	0.27	31	27_7
110.0	-- 120.0		0.0000	2.4	0.0	0.00	0.00	1	12_22
150.0	-- 160.0		0.0000	2.5	0.0	0.00	0.00	1	26_8
500.0	-- 510.0		0.0000	1.6	0.0	0.00	0.00	17	1_35
510.0	-- 520.0		0.0000	1.1	0.0	0.00	0.00	1	27_9
530.0	-- 540.0		0.0000	1.4	0.0	0.00	0.00	1	24_12
540.0	-- 550.0		0.0000	1.4	0.0	0.00	0.00	1	28_8
550.0	-- 560.0		0.0000	1.4	0.0	0.00	0.00	2	4_32
560.0	-- 570.0		0.0000	1.4	0.0	0.00	0.00	1	26_10
ENTIRE SYSTEM			1.1863	13.8	16.4	80.27	1146.70	381	

Rapporten är en sammanställning av alla fel som ger lastbortfall i det studerade området, indelade i effektintervall. Som exempel kan nämnas att inom effektintervallet 0-10 MW sker det 0,0153 fel/år som leder till lastbortfall, den genomsnittliga varaktigheten för dessa fel är 4,1 h, sannolikheten för fel som leder till lastbortfall i intervallet är 0,1 h/år, den totala icke levererade energin för fel inom intervallet uppgår till 0,5 MWh/år, det är 47 fel som orsakar lastbortfall inom intervallet, och det värsta av dem är det som betecknas 1_21.

För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31.

Rapporten ovan tar inte hänsyn till överlastade komponenter, eller avvikande spänning, utan undersöker enbart om det finns anslutning mellan last och produktion eller ej.

Bus load curtailment report

<-B U S E S W I T H-> LOAD FREQ. DURATION PROB. A.I.P. I. P. E.U.E. B.I.P. B.E.U. NO. OF WORST										
<-LOAD CURTAILMENTS(MW)-> (MW) (OC/Y) (HOUR) (H/Y) (MW/OC) (MW/Y) (MWH/Y) CONT. CONT.										
ENTIRE SYSTEM	25952.5	1.1863	13.84	16.42	67.67	80.27	1146.70	0.0031	0.0442	381
32214	135.00	50.6	0.0264	8.51	0.22	50.60	1.33	11.35	0.0264	68 1_2
32216	135.00	51.1	0.1275	13.58	1.73	51.10	6.51	88.48	0.1275	68 1_3
32218	135.00	95.8	0.5851	14.72	8.61	95.81	56.06	824.99	0.5851	27 1_5
32220	135.00	401.0	0.0000	1.60	0.00	401.00	0.00	0.00	0.0000	23 1_35
32222	135.00	11.0	0.0472	11.38	0.54	11.00	0.52	5.91	0.0472	66 1_11
32355	135.00	3.5	0.0000	5.78	0.00	3.52	0.00	0.00	0.0000	26 1_42
32356	135.00	52.3	0.0000	5.66	0.00	52.25	0.00	0.00	0.0000	26 1_43
32360	135.00	22.9	0.1709	13.97	2.39	22.88	3.91	54.62	0.1709	61 1_23
32361	135.00	18.9	0.1714	13.97	2.40	18.92	3.24	45.33	0.1714	64 1_25
32362	135.00	33.6	0.2146	13.39	2.87	33.55	7.20	96.42	0.2146	101 1_25
32363	135.00	8.0	0.1862	13.16	2.45	8.00	1.49	19.59	0.1862	99 1_23

Rapporten är en sammanställning av alla fel som ger lastbortfall i det studerade området, indelade per nod. Som exempel kan nämnas att för nod 32214 som har en ansluten last på 50,6 MW sker det 0,0264 fel/år som leder till lastbortfall, den genomsnittliga varaktigheten för dessa fel är 8,51 h, sannolikheten för fel som leder till lastbortfall är 0,22 h/år, den totala icke levererade energin för felen uppgår till 11,35 MWh/år, det är 68 fel som orsakar lastbortfall, och det värsta av dem är det som betecknas 1_2.

För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31.

Rapporten ovan tar inte hänsyn till överlastade komponenter, eller avvikande spänning, utan undersöker enbart om det finns någon anslutning mellan last och produktion eller ej.

Branch flow overloads report

<----- O V E R L O A D E D L I N E S ----->				FREQ. DURATION		PROB.	IMPACT MAX VIO.	NO. OF WORST
<----- F R O M -----> <----- T O -----> CKT				(OC/Y)	(HOUR)	(H/Y)	(PU)	(%) CONT. CONT.
ENTIRE SYSTEM				1.4765	14.6	21.6	1.42	0.00 82
30360	400.00	32219	135.00 T1	0.7187	14.8	10.6	0.87	116.31 14 2_12
32219	135.00	32220	135.00 1	0.0002	6.5	0.0	0.00	111.30 2 13_1
32219	135.00	32228	135.00 1	0.0002	7.0	0.0	0.00	111.16 1 7_7
32220	135.00	32228	135.00 1	0.0002	7.0	0.0	0.00	111.17 1 7_7
32220	135.00	32353	135.00 1	0.0033	13.6	0.0	0.01	196.46 39 31_4
32352	135.00	32400	135.00 2	0.3796	14.5	5.5	0.31	108.17 17 16_3
32353	135.00	32400	135.00 1	0.3752	14.5	5.5	0.23	104.32 15 10_7

Rapporten är en sammanställning av alla fel som ger överlast i det studerade området, indelade per linje/transformator. Som exempel kan nämnas att för transformatorn mellan nod 30360 och 32219 sker det 0,7187 fel/år som leder till lastbortfall, den genomsnittliga varaktigheten för dessa fel är 14,8 h, sannolikheten för fel som leder till lastbortfall är 10,6 h/år, den maximala

överlasten är 16,31 %, det är 14 fel som orsakar överlasten, och det värsta av dem är det som betecknas 2_12.

För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31.

Bus voltage violation report

		'EXEMPEL		' BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.900			
<----- BUSES WITH ----->		FREQ.	DURATION	PROB.	IMPACT	MAX VIO.	NO. OF WORST CONT.
<-- VOLTAGE VIOLATIONS-->		(OC/Y)	(HOUR)	(H/Y)	(PU)		CONT.
ENTIRE SYSTEM		0.0008	9.9	0.0	0.00	0.0000	81
32218	135.00	0.0000	6.2	0.0	0.00	0.8621	24 31_4
32220	135.00	0.0000	6.2	0.0	0.00	0.8768	20 31_4
32221	135.00	0.0000	6.2	0.0	0.00	0.8768	20 31_4
32222	135.00	0.0000	6.2	0.0	0.00	0.8767	21 31_4
32228	135.00	0.0000	5.7	0.0	0.00	0.8768	17 31_4
32356	135.00	0.0001	6.3	0.0	0.00	0.8454	2 25_17
32357	135.00	0.0003	10.4	0.0	0.00	0.8577	33 29_14
32358	135.00	0.0001	6.3	0.0	0.00	0.8457	2 25_17
32359	135.00	0.0005	10.4	0.0	0.00	0.8577	49 29_14
32360	135.00	0.0001	6.3	0.0	0.00	0.8455	2 25_17
32361	135.00	0.0007	10.4	0.0	0.00	0.8547	57 29_14
32362	135.00	0.0007	10.4	0.0	0.00	0.8539	57 29_14
32363	135.00	0.0001	6.3	0.0	0.00	0.8455	2 25_17
32365	135.00	0.0007	10.4	0.0	0.00	0.8672	53 20_23

		'EXEMPEL		' BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.050			
<----- BUSES WITH ----->		FREQ.	DURATION	PROB.	IMPACT	MAX VIO.	NO. OF WORST CONT.
<-- VOLTAGE VIOLATIONS-->		(OC/Y)	(HOUR)	(H/Y)	(PU)		CONT.
ENTIRE SYSTEM		0.6396	14.5	9.3	0.06	0.0000	50
32210	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0625	23 3_33
32212	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0629	20 3_33
32214	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0617	19 4_32
32216	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0611	17 3_33
32219	135.00	0.5838	14.7	8.6	0.01	1.0680	41 3_33
32220	135.00	0.5835	14.7	8.6	0.01	1.0539	7 5_1
32221	135.00	0.5835	14.7	8.6	0.01	1.0539	7 5_1
32222	135.00	0.5835	14.7	8.6	0.01	1.0538	5 5_1
32228	135.00	0.5838	14.7	8.6	0.01	1.0680	36 3_33
32229	135.00	0.5837	14.7	8.6	0.01	1.0677	36 3_33
32272	135.00	0.0007	7.3	0.0	0.00	1.0639	25 3_33
32273	135.00	0.0007	7.3	0.0	0.00	1.0639	24 3_33
32352	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0613	23 16_20
32353	135.00	0.0559	12.0	0.7	0.00	1.0628	32 28_8
32354	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0586	22 3_33
32355	135.00	0.0000	2.4	0.0	0.00	1.0618	25 28_8
32356	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0582	21 3_33
32357	135.00	0.0000	2.4	0.0	0.00	1.0612	23 28_8

32358	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0582	20	3_33
32359	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0607	21	28_8
32360	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0580	19	3_33
32361	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0612	20	28_8
32362	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0583	19	3_33
32363	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0580	18	3_33
32365	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0612	19	28_8
32378	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0585	17	25_11
32380	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0588	16	25_11
32400	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0540	9	16_20
32405	135.00	0.0000	1.6	0.0	0.00	1.0540	9	16_20

Rapporten är en sammanställning av alla fel som ger avvikande spänning i det studerade området, indelade per nod. Som exempel kan nämnas att för nod 32218 sker det färre än 0,00005 fel/år som leder till för låg spänning, den genomsnittliga varaktigheten för dessa fel är 6,2 h, sannolikheten för felen är lägre än 0,05 h/år, den lägsta spänningen är 0,8621 p.u., det är 24 fel som orsakar spänningsfallet, och det värsta av dem är det som betecknas 31_4.

För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31.

Contingency summary report

CONTINGENCY	FREQ. (OC/Y)	DURATION (HOUR)	PROB. (H/Y)	MISMATCH (MW)	TOT.LOAD CURT. (MW)	LOADING (%)	VLT.DROP (PU)	VLT.RISE (PU)	MIN.VLT. (PU)	MAX.VLT. (PU)
SINGLE 1	0.0300	601.2	18.0	0.10	0.00	96.40	0.0255	0.0000	1.0045	1.0450
1_1	0.0005	13.9	0.0	0.46	0.00	130.57	0.0638	0.0000	0.9759	1.0388
1_2	0.0001	8.4	0.0	0.43	50.60	93.11	0.0208	0.0001	1.0066	1.0461
1_3	0.0003	13.4	0.0	0.42	51.10	93.13	0.0214	0.0000	1.0064	1.0460
1_4	0.0008	14.2	0.0	0.45	0.00	113.62	0.0343	0.0000	1.0003	1.0426
1_5	0.0012	14.4	0.0	0.30	95.81	84.93	0.0137	0.0017	1.0082	1.0476
1_6	0.0002	12.9	0.0	0.05	0.00	98.25	0.0265	0.0000	1.0045	1.0450

Rapporten är en sammanställning av alla fel i det studerade området, eftersom det är så många fel redovisas endast ett fåtal här. Som exempel kan nämnas felet som kallas "SINGLE 1" som inträffar 0,0300 ggr/år har en varaktighet om 601,2 h, en sannolikhet om 18 h/år och medför en lastbortkoppling om 0,00 MW, en högsta lastad komponent om 96,40 %, en spänningssänkning om 0,0255 p.u., en spänningshöjning om 0,000 p.u., en lägsta spänning om 1,0045 p.u. och en högsta spänning om 1,0450 p.u..

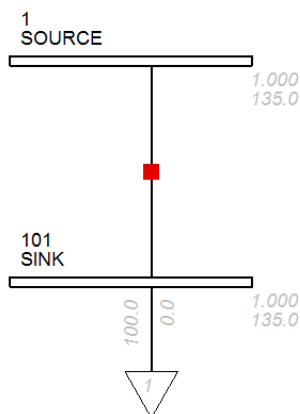
För den intresserade läsaren redovisas alla utdatafiler i sin helhet i Elforsk rapport 12:31.

4.2 Substation Reliability Assessment

I detta kapitel redovisas enkla beräkningar av tillförlitligheten för olika stationer.

4.2.1 En brytare

Modell av en brytare visas i figuren nedan. Nod 1 är source och har nodtyp 3 (swing bus). Nod 101 är sink och har en ansluten last på 100 MW. Brytaren har en kapacitet på 200 MVA (Rate A).



Figur 40 Modell av en brytare och en last

Tillförlitlighetsdata för brytaren är följande:

BREAKERS IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.007 72 0 0 0.1666666 10

Brytarfel inträffar vart 143:e år ($1/143 \approx 0,007$) och reparationstiden är 72 timmar. Underhåll av brytaren utförs vart sjätte år ($f=1/6 \approx 0.1666666...$) och underhållet pågår under 10 timmar. Beräkning av tillförlitlighet med PSS/E ger resultat enligt följande tabell.

Tabell 30 PSS/E resultat för en brytare och last

<----- CONTINGENCY LABEL ----->			STUCK	<----- POST FAULT ----->			<----- POST SWITCHING ----->		
PRIMARY	MD	SECONDARY	MD BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.
				(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)
BREAKER 5	F	NONE	NONE	100.00	0.0070	0.01	100.00	0.0070	0.50
BREAKER 5	M	NONE	NONE	0.00	0.0000	0.00	100.00	0.1667	1.67
TOTAL RESULTS			<----- POST FAULT ----->			<----- POST SWITCHING ----->			
	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	
	(OC/Y)	(H/Y)	(MWH/Y)	(MWH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(MWH/Y)	(MWH/Y)	
	0.0070	0.01	0.70	1.40	0.1737	2.17	17.37	217.07	
CONTINGENCY LEGEND:									
LABEL EVENTS									
BREAKER 5	:	OPEN LINE FROM BUS	1 SOURCE	135.00 TO BUS	101 SINK	135.00	CKT @1		

I tabellen ovan visas beräkning av både spontant brytarfel (MD=F) och planerat underhåll av brytaren (MD= M).

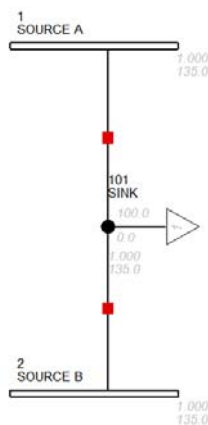
Frekvensen för brytarfel är 0,007 gånger/år. Med en switching time på två timmar blir sannolikheten för POST FAULT $0,007/\text{år} * 2 \text{ h} = 0,014 \text{ h/år}$.

Bortkopplad last i POST FAULT är därmed $100 \text{ MW} * 0,014 \text{ h/år} = 1,4 \text{ MWh/år}$. Efter POST FAULT inträder tillståndet POST SWITCHING. Eftersom det inte finns någon reservmatningsmöjlighet för lasten blir lasten bortkopplad under hela reparationstiden för brytaren. Sannolikheten för detta tillstånd är $0,007/\text{år} * 72 \text{ h} = 0,504 \text{ h/år}$. Bortkopplad energi under POST SWITCHING är $100 \text{ MW} * 0,504 \text{ h/år} = 50,4 \text{ MWh/år}$

Sannolikheten för underhåll är $0,1666667/\text{år} * 10 \text{ h} = 1,666667 \text{ h/år}$ vilket redovisas under POST SWITCHING. Bortkopplad energi under ett brytarunderhåll är $100 \text{ MW} * 1,666667 \text{ h/år} = 166,6667 \text{ MWh/år}$.

4.2.2 Två brytare

Modell av ett ben i ett tvåbrytarställverk visas i figuren nedan. Nod 1 och nod 2 är source och har nodtyp 3 (swing bus). Nod 101 är sink och har en ansluten last på 100 MW. Brytarna har en kapacitet på 200 MVA (Rate A).



Figur 41 Modell av två brytare och en last

Observera att PSS/E alltid modellerar implicita frångiljare på bägge sidor om brytaren. Dessa frångiljare används automatisk av programmet för att isolera brytaren vid t.ex. brytarfel.

Om vi antar samma tillförlitlighetsdata som ovan, samt antar att risken för misslyckad brytning är 0,45% för varje brytarmanöver, blir det följande resultat i PSS/E:

Tabell 31 PSS/E resultat för två brytare och en last

<----- CONTINGENCY LABEL ----->			STUCK		<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->			
PRIMARY	MD SECONDARY	MD BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.
			(MW)	(OC/Y)		(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)
BREAKER 8	F NONE	NONE	100.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50		
BREAKER 8	F NONE	BREAKER 9	100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00		
BREAKER 8	M BREAKER 9	F NONE	100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00		
BREAKER 8	PF BREAKER 9	F NONE	100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00		
BREAKER 9	F NONE	NONE	100.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50		
BREAKER 9	F NONE	BREAKER 8	100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00		
BREAKER 9	M BREAKER 8	F NONE	100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00		
BREAKER 9	PF BREAKER 8	F NONE	100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00		
TOTAL RESULTS			<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->					
	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.		
	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)		
	0.0141	0.03	1.41	2.81	0.0000	0.00	0.00	0.00		
CONTINGENCY LEGEND:										
LABEL EVENTS										
BREAKER 8	: OPEN LINE FROM BUS	1 SOURCE A	135.00 TO BUS	101 SINK	135.00 CKT @1					
BREAKER 9	: OPEN LINE FROM BUS	101 SINK	135.00 TO BUS	2 SOURCE B	135.00 CKT @1					

Fel på en enskild brytare

Vid brytarfel på en brytare öppnar den andra brytaren för att isolera felet i POST FAULT. Den bortkopplade energin för de bägge brytarna blir $2 \times 0,007/\text{år} \times 2 \text{ h} \times 100 \text{ MW} = 2,8 \text{ MWh}/\text{år}$.

I POST SWITCHING har den felaktiga brytarens implicita fränksiljare öppnats för att isolera brytaren och den andra brytaren har slagits till för att försörja lasten. Det är därmed ingen bortkopplad last under post switching. Sannolikheten för post switching för en brytare är $0,007/\text{år} \times 72 \text{ h} = 0,504 \text{ h}/\text{år}$. Fel på en brytare redovisas på de grönmarkerade raderna i tabellen ovan.

Samtidigt fel på två brytare

Reparationstiden för en felaktig brytare är 72 timmar. Det finns en risk att det blir fel på den andra brytaren under denna tid. Denna risk är $0,007 \times 0,007 \times 72/8760 = 0,0000004$ gånger/år. Varaktigheten för denna sällsynta felkombination är 36 timmar. Sannolikheten blir därmed $0,000014 \text{ h}/\text{år}$, dvs $0.05 \text{ s}/\text{år}$. Denna felkombination redovisas i mod PF för primär brytare och mod F för sekundär brytare (gula rader i tabellen ovan).

En bugg har upptäckts och rapporterats till PTI. Den innebär att denna feltyp inte beräknas rätt i PSS/E och det alltid skrivs ut noll i POST SWITCHING för felkombination PF – F, dvs de gula raderna i tabellen ovan. Den handräkning som har gjorts i föregående stycke visar dock att sannolikheten för denna felkombination är extremt låg och dess bidrag till den totala felfrekvensen är negligerbar.

Misslyckad brytning

Risken för misslyckad brytarmanöver anges i PSS/E som h/y. Detta innebär att 0,45% risk för misslyckad brytning anges som sannolikheten $8760 \times 0,0045 = 39,42 \text{ h}/\text{år}$. På de blå raderna i tabellen ovan redovisas sannolikheten för misslyckad brytning. Felfrekvensen för denna händelse är $0,007 \times 0,0045 = 0,0000315$ gånger/år. I PSS/E skrivs frekvensen ut med 4 decimaler vilket

innebär att resultatet skrivs ut som 0,0000 men resultatet ingår i den totala summeringen i slutet på tabellen.

Brytarunderhåll och samtidigt brytarfel

I felstatistiken för brytarna är det angivet att det görs 10 timmars underhåll vart sjätte år. Lasten är då matad via den andra brytaren. Risken för samtidigt fel på en brytare vid underhåll på en annan brytare redovisas på de ofärgade raderna i tabellen ovan. Felfrekvensen för denna händelse är $0,007 * 0,166667 * 10 / 8760 = 0,00000133$ gånger/år.

Summering av resultat

I slutet av tabellen redovisas totala värden för POST FAULT och POST SWITCHING. Den totala felfrekvensen för alla störningar under POST FAULT är 0,0141, varav enskilda brytarfel bidrar med 0,014 och övriga felkombinationer bidrar med 0,0001.

Jämförelse av en eller två brytare

Vid jämförelse av resultaten i Tabell 30 och Tabell 31 framgår det att sannolikheten för bortkopplad last i POST FAULT är dubbelt så stor med två brytare jämfört med en brytare. Däremot, för POST SWITCHING minskas mängden ej levererad energi (EUE) till noll vid tvåbrytarutförande. Med endast en brytare är EUE 217 MWh/år.

4.2.3 Fel på fränkskiljare

Vi ska nu komplettera modellen med felstatistik för fränkskiljare.

Tillförlitlighetsdata för fränkskiljare antas till följande:

SWITCHES IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.0012264 8 0 0 0.5 4

Fränkskiljarfel inträffar vart 815:e år ($1/815 \approx 0,0012264$) och reparationstiden är 8 timmar. Underhåll av brytaren utförs vartannat år ($f=0.5$) och underhållet pågår under 4 timmar. Beräkning av tillförlitlighet med PSS/E ger resultat enligt följande tabell.

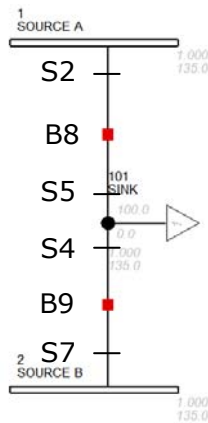
Tabell 32 PSS/E resultat för två brytare med fränkskiljare och en last

<----- CONTINGENCY LABEL ----->				STUCK		<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->	
PRIMARY	MD SECONDARY	MD BREAKER		LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.
				(Mw)	(OC/Y)	(H/Y)	(Mw)	(OC/Y)	(H/Y)
SWITCH*2	F NONE	BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*4	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*4	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*4	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*5	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*5	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*5	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*7	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*7	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F SWITCH*7	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F BREAKER 9	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	F BREAKER 9	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*4	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*4	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*4	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*5	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*5	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*5	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*7	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M SWITCH*7	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M BREAKER 8	F NONE		100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M BREAKER 8	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M BREAKER 9	F NONE		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	M BREAKER 9	F BREAKER 8		100.00	0.0000	0.00	100.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	PF SWITCH*4	F NONE		100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
SWITCH*2	PF SWITCH*4	F BREAKER 9		100.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00

TOTAL RESULTS	<----- POST FAULT ----->				<----- POST SWITCHING ----->			
	FREQ. (OC/Y)	PROB. (H/Y)	I.P. (MW/Y)	E.U.E. (MWH/Y)	FREQ. (OC/Y)	PROB. (H/Y)	I.P. (MW/Y)	E.U.E. (MWH/Y)

	0.0166	0.03	1.66	3.31	0.0025	0.02	0.25	1.99
CONTINGENCY LEGEND:								
LABEL EVENTS								
SWITCH*2	:	OPEN LINE FROM BUS	1	SOURCE A	135.00 TO BUS	101 SINK	135.00 CKT *	
BREAKER 8	:	OPEN LINE FROM BUS	1	SOURCE A	135.00 TO BUS	101 SINK	135.00 CKT @1	
SWITCH*4	:	OPEN LINE FROM BUS	101	SINK	135.00 TO BUS	2 SOURCE B	135.00 CKT *	
BREAKER 9	:	OPEN LINE FROM BUS	101	SINK	135.00 TO BUS	2 SOURCE B	135.00 CKT @1	
SWITCH*5	:	OPEN LINE FROM BUS	101	SINK	135.00 TO BUS	1 SOURCE A	135.00 CKT *	
SWITCH*7	:	OPEN LINE FROM BUS	2	SOURCE B	135.00 TO BUS	101 SINK	135.00 CKT *	

De implicita frånskiljarna som PSS/E automatiskt har lagt in i modellen visas i följande figur med PSS/E:s numrering. S för switch och B för breaker.



Figur 42 Tvåbrytarmodell med PSS/E:s frånskiljare

Som synes Tabell 32 finns det ett stort antal felkombinationer som leder till bortkoppling av lasten i modellen. Enkelfel på följande komponenter leder till lastbortkoppling i POST FAULT.

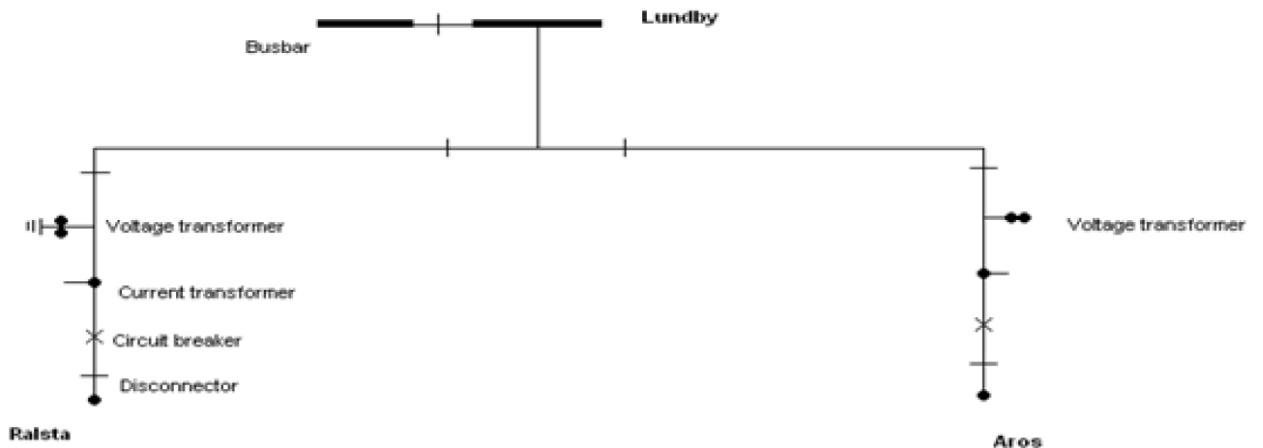
Tabell 33 Felfrekvens för enkelfel för objekt i Figur 42

Objekt	Felfrekvens gånger/år
Brytare B8	0,007
Brytare B9	0,007
Frånskiljare S4	0,0012264
Frånskiljare S5	0,0012264
Totalt	0,0164528

Total felfrekvens för POST FAULT i PSS/E är 0,0166. Detta innebär att de övriga felkombinationerna i Tabell 32 har en sammanlagd felfrekvens på $0,0166 - 0,0164528 = 0,0001472$, dvs en mycket liten påverkan på den totala felfrekvensen.

4.2.4 Beräkning för station Lundby

I referens [2] görs en handberäkning av tillförlitligheten för 130 kV station Lundby. Följande figur visar hur matningen av Lundby representeras i ref [2].



Figur 43 Testnät för beräkning av tillförlitlighet för Lundby

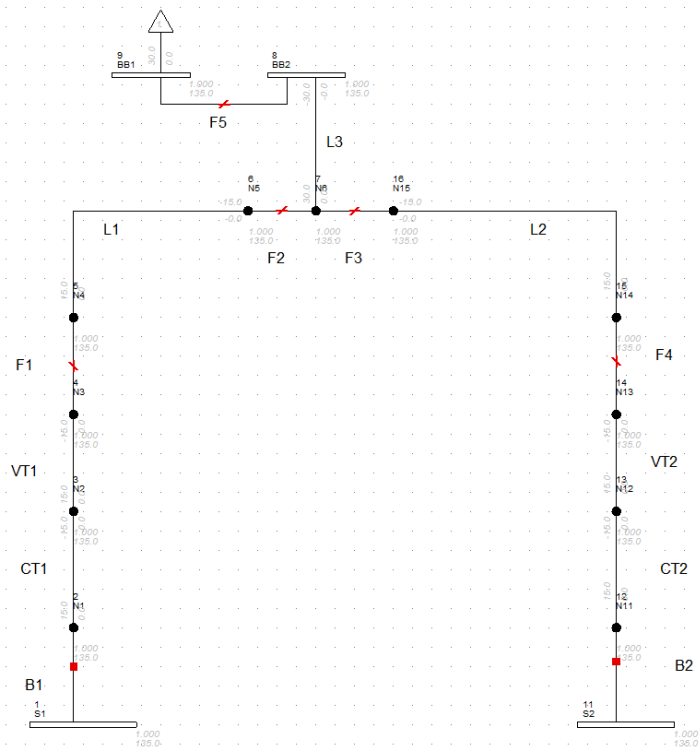
130 kV station Lundby är ansluten med ett enkelt påstick till ledning från Ralsta till Aros. Ledningsfacken i Ralsta och Aros representeras med frånskiljare, brytare, strömtransformator och spänningstransformator. Vid påstickspunkten finns det två stycken frånskiljare på respektive matarledning. I Lundby finns det två skenor med en frånskiljare.

Komponenterna i nätet har följande felstatistik enligt referens [2]. Förutom brytare och frånskiljare är även felstatistik för spännings- och strömtransformatorer samt luftledning med i beräkningen. Den antagna felstatistiken framgår av följande tabell.

Tabell 34 Exempel på felstatistik för 145 kV komponenter

Objekt	Apparatfel		Underhåll	
	Frekvens, /år	Reparationstid, h	Tid, h	Intervall, år
Skena	0,00219	12	-	-
Brytare	0,007	72	10	6
Frånskiljare	0,0012264	8	4	2
Strömtransformator	0,0021	8	-	-
Spänningstransformator	0,001752	8	-	-
Luftledning, per km	0,000797	8	48	3

Nätmodellen i PSS/E ser ut på följande sätt:.



Figur 44 PSS/E-modell av testnät Lundby

I PSS/E finns inte ström- och spänningstransformatorer representerade. Dessa har därför modellerats som ledningar i modellen och markeras med CT respektive VT. Felstatistik för mättransformatorerna läggs in för dessa fiktiva ledningar i nätmodellen.

Subsystem filen till PSS/E ser ut på följande sätt

Tabell 35 Subsystemfil för nät Lundby

```
COM
COM SUBSYSTEM description file for Lundby test system
COM
SUBSYSTEM 'SUBSTATION'      / Definierar nod 1 - 16 som SUBSTATION, dvs alla noder
  BUSES 1 16                /
END
SUBSYSTEM 'SOURCE'          / Anger nod 1 och 11 som SOURCE
  BUS 1                      /
  BUS 11                     /
END
SUBSYSTEM 'SINK'            / Anger nod 9 som SINK
  BUS 9                      /
END
END                          / Avslutar SUB-filen
```

Felstatistik för alla komponenter i nätet anges i en Probabilistic file i PSS/E. Följande fil har använts för analys av Lundby:

Tabell 36 Felstatistikfil för nät Lundby

```
BREAKERS IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.007 72 0 0 0 0 / Generella data för brytare i modellen
SWITCH FROM BUS 4 TO BUS 5 CKT *1 0.0012264 8 0 0 0.5 4 / Specifika data för de fränkskiljare
SWITCH FROM BUS 14 TO BUS 15 CKT *2 0.0012264 8 0 0 0.5 4 / som finns i modellen
SWITCH FROM BUS 6 TO BUS 7 CKT *1 0.0012264 8 0 0 0.5 4
SWITCH FROM BUS 16 TO BUS 7 CKT *1 0.0012264 8 0 0 0.5 4
SWITCH FROM BUS 8 TO BUS 9 CKT *1 0.0012264 8 0 0 0.5 4
LINE FROM BUS 2 TO BUS 3 CKT C1 0.0021 8 0 0 0 0 / Strömtransformator
LINE FROM BUS 12 TO BUS 13 CKT C2 0.0021 8 0 0 0 0 / Strömtransformator
LINE FROM BUS 3 TO BUS 4 CKT V1 0.001752 8 0 0 0 0 / Spänningstransformator
LINE FROM BUS 13 TO BUS 14 CKT V2 0.001752 8 0 0 0 0 / Spänningstransformator
LINE FROM BUS 5 TO BUS 6 CKT L1 0.004 8 0 0 0.333333 48 / Ledning Ralsta - påstick
LINE FROM BUS 15 TO BUS 16 CKT L2 0.004 8 0 0 0.333333 48 / Ledning Aros - påstick
LINE FROM BUS 7 TO BUS 8 CKT L3 0.00099 8 0 0 0.333333 48 / Ledning Lundby - påstick
BUS 8 0.00219 12 / Samlingsskenor i Lundby
BUS 9 0.00219 12
END / Slut på probability fil
```

Första raden anger generell felstatistik för brytare. De övriga raderna i filen anger felstatistik för varje enskild komponent i det studerade nätet. Dessa data är tagna från Tabell 34, förutom för luftledningarna där samma data har angivits som vid handräkningen i ref [2].

I denna modell används inte generell felstatistik för fränkskiljare eftersom denna statistik då även skulle gälla för de implicita fränkskiljare som alltid modelleras i PSS/E för varje brytare. Istället anges statistik för varje enskild fränkskiljare. Därigenom simuleras det inte något fel på de implicita fränkskiljarna som inte finns i verkligheten.

I ref [2] görs det en handräkning av tillförlitligheten för matningen av Lundby där enkelfel på komponenter beaktas. Vid beräkning i PSS/E har därför frekvensgränsen (cut off) valts så att endast primärfel beräknas. Resultatet visas i följande tabell.

Tabell 37 PSS/E resultat för station Lundby

<----- CONTINGENCY LABEL ----->			STUCK		<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->		
PRIMARY	MD SECONDARY	MD BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	
			(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	
LINE 14	F NONE	NONE	30.00	0.0021	0.00	0.00	0.0021	0.02	
LINE 17	F NONE	NONE	30.00	0.0021	0.00	0.00	0.0021	0.02	
LINE 19	F NONE	NONE	30.00	0.0018	0.00	0.00	0.0018	0.01	
LINE 21	F NONE	NONE	30.00	0.0018	0.00	0.00	0.0018	0.01	
SWITCH 23	F NONE	NONE	30.00	0.0012	0.00	0.00	0.0012	0.01	
SWITCH 25	F NONE	NONE	30.00	0.0012	0.00	0.00	0.0012	0.01	
LINE 27	F NONE	NONE	30.00	0.0040	0.01	0.00	0.0040	0.03	
LINE 29	F NONE	NONE	30.00	0.0040	0.01	0.00	0.0040	0.03	
SWITCH 31	F NONE	NONE	30.00	0.0012	0.00	30.00	0.0012	0.01	
SWITCH 33	F NONE	NONE	30.00	0.0012	0.00	30.00	0.0012	0.01	
LINE 35	F NONE	NONE	30.00	0.0010	0.00	30.00	0.0010	0.01	
LINE 35	M NONE	NONE	0.00	0.0000	0.00	30.00	0.3333	16.00	
BUS 36	F NONE	NONE	30.00	0.0022	0.00	30.00	0.0022	0.03	
SWITCH 37	F NONE	NONE	30.00	0.0012	0.00	30.00	0.0012	0.01	
SWITCH 37	M NONE	NONE	0.00	0.0000	0.00	30.00	0.5000	2.00	
BUS 38	F NONE	NONE	30.00	0.0022	0.00	30.00	0.0022	0.03	
BREAKER 39	F NONE	NONE	30.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50	
BREAKER 40	F NONE	NONE	30.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50	
TOTAL RESULTS			<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->				
	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	
	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	
	0.0412	0.08	1.24	2.47	0.8424	18.09	25.27	542.70	
CONTINGENCY LEGEND:									
LABEL EVENTS									
LINE 14	: OPEN LINE FROM BUS	2 N1	135.00	TO BUS	3 N2	135.00	CKT C1		
LINE 17	: OPEN LINE FROM BUS	12 N11	135.00	TO BUS	13 N12	135.00	CKT C2		
LINE 19	: OPEN LINE FROM BUS	3 N2	135.00	TO BUS	4 N3	135.00	CKT V1		
LINE 21	: OPEN LINE FROM BUS	13 N12	135.00	TO BUS	14 N13	135.00	CKT V2		
SWITCH 23	: OPEN LINE FROM BUS	4 N3	135.00	TO BUS	5 N4	135.00	CKT *1		
SWITCH 25	: OPEN LINE FROM BUS	14 N13	135.00	TO BUS	15 N14	135.00	CKT *2		

LINE 27	:	OPEN LINE FROM BUS	5 N4	135.00 TO BUS	6 N5	135.00 CKT L1
LINE 29	:	OPEN LINE FROM BUS	15 N14	135.00 TO BUS	16 N15	135.00 CKT L2
SWITCH 31	:	OPEN LINE FROM BUS	6 N5	135.00 TO BUS	7 N6	135.00 CKT *1
SWITCH 33	:	OPEN LINE FROM BUS	16 N15	135.00 TO BUS	7 N6	135.00 CKT *1
LINE 35	:	OPEN LINE FROM BUS	7 N6	135.00 TO BUS	8 BB2	135.00 CKT L3
BUS 36	:	OPEN BUS	8 BB2	135.00		
SWITCH 37	:	OPEN LINE FROM BUS	8 BB2	135.00 TO BUS	9 BB1	135.00 CKT *1
BUS 38	:	OPEN BUS	9 BB1	135.00		
BREAKER 39	:	OPEN LINE FROM BUS	1 S1	135.00 TO BUS	2 N1	135.00 CKT @1
BREAKER 40	:	OPEN LINE FROM BUS	11 S2	135.00 TO BUS	12 N11	135.00 CKT @2

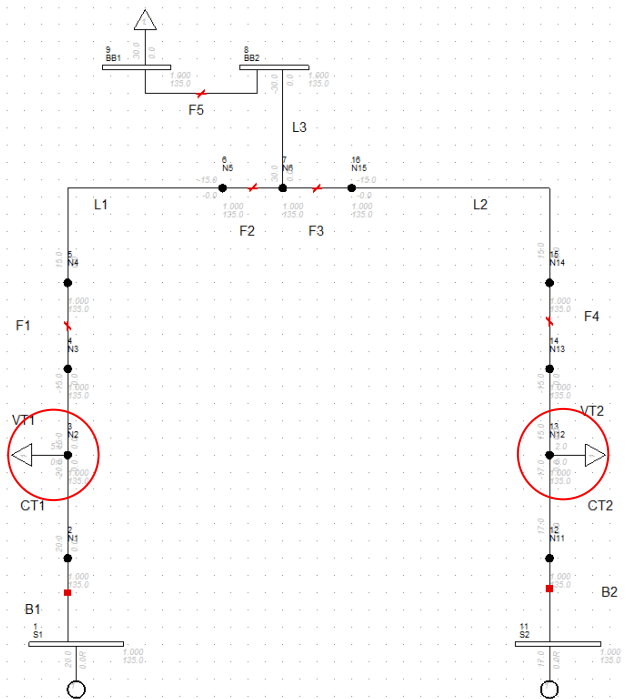
Fel på varje enskild komponent leder till att lasten ansluten på nod 9 blir bortkopplad under POST FAULT. Vid POST SWITCHING har PSS/E isolerat felet mha tillgängliga frånskiljare och matar återigen laster när så är möjligt via andra matningsvägar. Vid fel på komponenter i Lundby och i påstickspunkten finns det dock ingen reservmatningsmöjlighet, så då blir det lastbortkoppling även för POST SWITCHING.

I Tabell 36 anges även data för underhåll av luftledningar (48 timmar vart tredje år). Det är endast underhåll av den radiella påsticksledningen L3 (line 35 i PSS/E) som leder till lastbortfall. Detta redovisas som POST SWITCHING på den första gröna raden i tabellen ovan. Sannolikheten för underhåll är $1/3 \cdot 48 = 16$ h/år. Med en icke försörjd last på 30 MW blir EUE $30 \text{ MW} \cdot 16 \text{ h/år} = 480 \text{ MWh/år}$.

På motsvarande sätt leder underhåll på frånskiljare F5 (switch 37 i PSS/E) till ett lastbortfall av $30 \text{ MW} \cdot 0,5 \text{ ggr/år} \cdot 4 \text{ h} = 60 \text{ MWh/år}$. Dessa två underhållsåtgärder leder alltså till energibortfall på 540 MWh/år . PSS/E har beräknat ett totalt bortfall på $542,7 \text{ MWh/år}$ för POST SWITCHING. De resterande $2,7 \text{ MWh/år}$ kommer från de komponentfel som leder till ej försörjd last under reparationstiden, dvs frånskiljare F2 och F3 samt "nedströms".

4.2.5 Bugg vid beräkning av bortkopplad last

Vid testberäkningar med olika konfigurationer har det visat sig att SRA kan ge fel resultat för bortkopplad last. Följande nät visar ett exempel på när buggen kan uppträda. Modellen för Lundby har kompletterats med två nya laster; 5 MW i nod 3 och 2 MW i nod 13, se följande figur.



Figur 45 Testnät Lundby kompletterad med två ytterligare laster

De två nya lastnoderna anges som sink bus i subsystemfilen. Beräkning med SRA ger följande resultat.

Tabell 38 PSS/E resultat för station Lundby kompletterad med två ytterligare laster

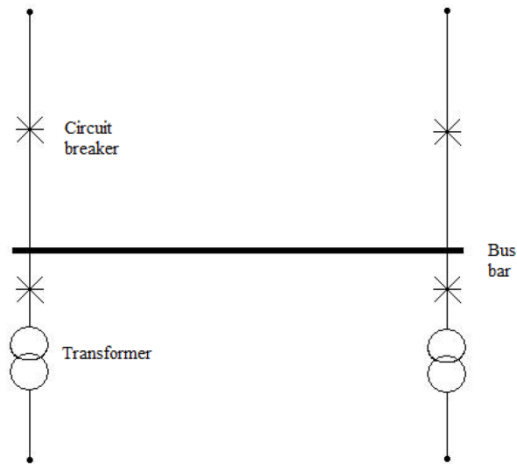
<----- CONTINGENCY LABEL ----->				STUCK		<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->				
PRIMARY	MD	SECONDARY	MD	BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.		
					(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)		
LINE 14	F	NONE		NONE	37.00	0.0021	0.00	5.00	0.0021	0.02		
LINE 17	F	NONE		NONE	37.00	0.0021	0.00	2.00	0.0021	0.02		
LINE 19	F	NONE		NONE	37.00	0.0018	0.00	5.00	0.0018	0.01		
LINE 21	F	NONE		NONE	37.00	0.0018	0.00	2.00	0.0018	0.01		
SWITCH 23	F	NONE		NONE	35.00	0.0012	0.00	5.00	0.0012	0.01		
SWITCH 25	F	NONE		NONE	32.00	0.0012	0.00	2.00	0.0012	0.01		
LINE 27	F	NONE		NONE	35.00	0.0040	0.01	0.00	0.0040	0.03		
LINE 29	F	NONE		NONE	32.00	0.0040	0.01	0.00	0.0040	0.03		
SWITCH 31	F	NONE		NONE	37.00	0.0012	0.00	30.00	0.0012	0.01		
SWITCH 33	F	NONE		NONE	37.00	0.0012	0.00	30.00	0.0012	0.01		
LINE 35	F	NONE		NONE	37.00	0.0010	0.00	30.00	0.0010	0.01		
LINE 35	M	NONE		NONE	0.00	0.0000	0.00	30.00	0.3333	16.00		
BUS 36	F	NONE		NONE	37.00	0.0022	0.00	30.00	0.0022	0.03		
SWITCH 37	F	NONE		NONE	37.00	0.0012	0.00	30.00	0.0012	0.01		
SWITCH 37	M	NONE		NONE	0.00	0.0000	0.00	30.00	0.5000	2.00		
BUS 38	F	NONE		NONE	37.00	0.0022	0.00	30.00	0.0022	0.03		
BREAKER 39	F	NONE		NONE	37.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50		
BREAKER 40	F	NONE		NONE	37.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50		
TOTAL RESULTS					<----- POST FAULT ----->				<----- POST SWITCHING ----->			
	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.
	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)
	0.0412	0.08	1.49	2.98	0.8525	18.17	25.31	542.98				

I POST FAULT öppnar de två brytarna B1 och B2 för alla komponentfel. Den totalt bortkopplade lasten ska därmed alltid vara $30+5+2 = 37$ MW. I tabellen ovan saknas dock en last (2 eller 5 MW) i några felfall, se gulmarkerade rader.

Efter diverse tester visar det sig att buggen försvinner om även nod 2 och 12 definieras som sink bus, även om det inte finns några laster på dessa noder. Buggen är rapporterad till Siemens-PTI och den är åtgärdad i nästa uppdatering av programmet (33.1.1).

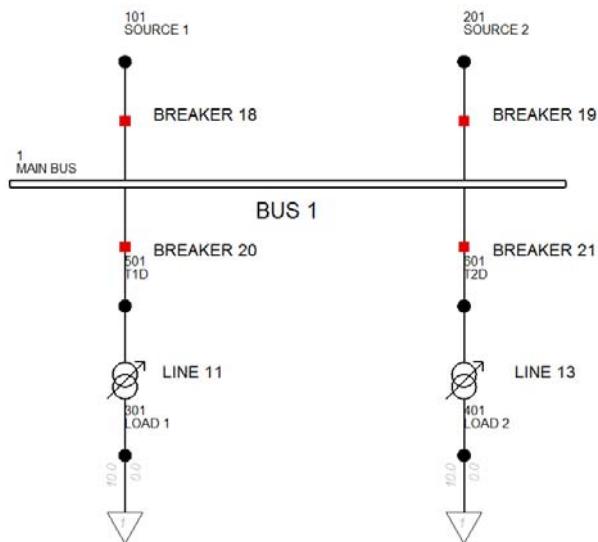
4.2.6 Station med en samlingsskena

I ref [2] görs det en tillförlitlighetsberäkning för hand för en station med en samlingsskena, två ingående matningar samt två transformatorfack enligt följande figur.



Figur 46 Modell av station med en samlingsskena

I PSS/E kan man modellera stationen enligt följande figur.



Figur 47 PSS/E-modell av station med en samlingsskena

Nod 101 och 102 är swing bus eftersom de är source i analysen. Nod 301 och 401 är sink med 10 MW last på vardera noden.

Systemet för tillförlitlighetsberäkningar definieras med följande subsystemfil.

Tabell 39 Subsystem för modell av station med en samlingsskena

```
COM
COM SUBSYSTEM description file for Single Bus Substation system
COM
SUBSYSTEM 'SUBSTATION' / Definierar nod 1 - 601 som SUBSTATION
    BUSES 1 601 / dvs alla noder
END /
SUBSYSTEM 'SOURCE' / Anger nod 101 och 201 som SOURCE
    BUS 101 /
    BUS 201 /
END /
SUBSYSTEM 'SINK' / Anger nod 301 OCH 401 som SINK
    BUSES 301 401 /
END /
END / Avslutar SUB-filen
```

I detta fall ska alla noder i nätet ingå i "substation". Detta görs enklast med kommando BUSES 1 601 där 1 är lägsta nodnumret och 601 är det högsta nodnumret i PSS/E-modellen.

Felstatistikfilen ser ut på följande sätt.

Tabell 40 Felstatistik för modell av station med en samlingsskena

```
BREAKERS IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.007 72 0 0 0 0
TRANSFORMERS IN SUBSYSTEM SUBSTATION 0.0026 46
BUS 1 0.0022 12
END / slut på felstatistikfil
```

Generell felstatistik anges för brytare och transformatorer och specifik statistik för samlingsskenan (nod 1). Därigenom blir det inga fel på övriga noder i modellen, som ju inte är skenor utan endast hjälpnoder för att koppla samman de komponenter som ska modelleras. Notera att det inte är någon inlagd felstatistik för frånskiljare i denna beräkning.

Om vi först gör en tillförlitlighetsberäkning med frekvensgränsen (cut off) vald till 0,0001 gör vi en analys med endast primärfel på de ingående komponenterna. Resultatet visas i följande tabell.

Tabell 41 PSS/E resultat för station med en samlingsskena och n-1 fel på komponenter

<----- CONTINGENCY LABEL ----->			STUCK		<----- POST FAULT ----->		<----- POST SWITCHING ----->		PROB.
PRIMARY	MD SECONDARY	MD BREAKER	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.	
			(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(H/Y)
BUS 1	F NONE	NONE	20.00	0.0022	0.00	20.00	0.0022	0.03	
LINE 11	F NONE	NONE	10.00	0.0026	0.01	10.00	0.0026	0.12	
LINE 13	F NONE	NONE	10.00	0.0026	0.01	10.00	0.0026	0.12	
BREAKER 18	F NONE	NONE	20.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50	
BREAKER 19	F NONE	NONE	20.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50	
BREAKER 20	F NONE	NONE	20.00	0.0070	0.01	10.00	0.0070	0.50	
BREAKER 21	F NONE	NONE	20.00	0.0070	0.01	10.00	0.0070	0.50	
TOTAL RESULTS									
<----- POST FAULT ----->			<----- POST SWITCHING ----->						
FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.		
(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)		
0.0354	0.07	0.66	1.31	0.0214	1.27	0.24	13.00		

Vid fel på någon av transformatorerna blir det 10 MW lastbortkoppling både i POST FAULT och POST SWITCHING. Vid fel på övriga komponenter (samlingsskena och fyra brytare) blir det 20 MW lastbortkoppling i POST

FAULT. Vid brytarfel kommer reläskydden att öppna de övriga brytarna för att isolera felet.

Vid POST SWITCHING har frånskiljare manövrerats för att isolera den felaktiga brytaren och övriga brytare har kopplats till för att försörja lasten igen. Om felet är på brytare 18 eller 19 kan hela stationen matas via den andra brytaren. Om felet är på brytare 20 eller 21 blir det bortkoppling av underliggande last under hela reparationstiden för brytaren. Den andra lasten kan dock matas på vanligt sätt vilket innebär att lastbortfallet endast blir 10 MW i POST SWITCHING.

Genom att minska på frekvensgränsen kan vi även inkludera kombinationsfel (primär- och sekundärfel) i analysen. Följande tabell visar hur tillförlitlighetsindex förändras när sekundärfel samt misslyckad brytarmanöver (stuck breaker) tas med i analysen.

Tabell 42 Känslighetsanalys av tillförlitlighetsberäkning av station med en samlingsskena

Feltyper			Resultat					
			POST FAULT			POST SWITCHING		
Primär	Sekundär	Stuck breaker	ggr/år	h/år	MWh/år	ggr/år	h/år	MWh/år
X			0,0354	0,07	1,31	0,0214	1,27	13,00
X	X		0,0354	0,07	1,31	0,0214	1,27	13,00
X	X	X	0,0358	0,07	1,33	0,0217	1,29	13,16

Sekundärfel (dvs samtidigt fel på två komponenter) har mycket liten påverkan på resultatet. Det blir ingen skillnad med den noggrannhet som PSS/E skriver ut resultaten med. När risken för misslyckad brytarmanöver (0,45%) tas med blir det en liten förändring i resultatet, men den är inte särskilt stor.

Det kan även nämnas att den handberäkning av sekundärfel som görs i ref [2] är felaktig. Felfrekvensen för samtidigt fel på två brytare är $0,007 \cdot 0,007 \cdot 72 / 8760 = 0,0000004$ gånger/år men i ref [2] används formeln $0,007 \cdot 0,007 \cdot 72 = 0,003528$, vilket är drygt halva felfrekvensen för en enskild brytare. Dvs, det är nästan lika stor risk att det samtidigt blir fel på två brytare samtidigt som risken för fel på en brytare! Den beräknade felfrekvensen är alltså 8760 gånger för stor. En rimlighetsbedömning borde ha förhindrat detta misstag att slinka igenom utan upptäckt. Detta misstag är genomgående i referens [2] vid beräkning av kombinationsfel.

4.2.7 Station med två samlingsskenor

Om vi lägger in en sektioneringsbrytare i samlingsskenan får vi den PSS/E modell som visas i Figur 48. Fördelen med denna utformning är att det endast är fel på sektioneringsbrytaren som leder till bortkoppling av bägge transformatorerna. Vid alla andra brytarfel (med korrekt bortkoppling) öppnar sektioneringsbrytaren och driften på den andra samlingsskenan är opåverkad. Detta innebär att mängden bortkopplad last minskar vid apparatfel i stationen.

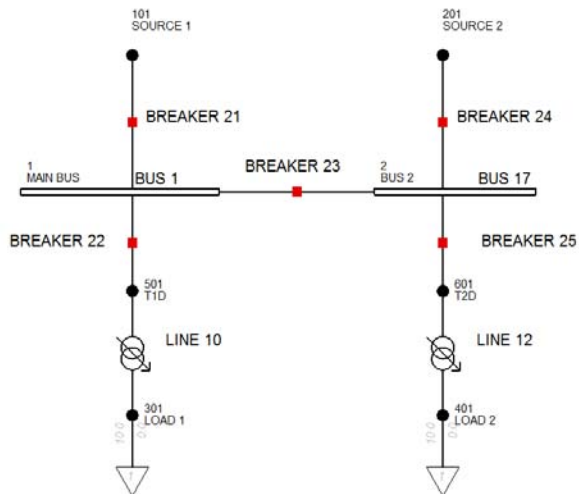
Följande tabell visar resultaten i PSS/E vid beräkning av primärfel, dvs bortfall av endast en komponent.

Tabell 43 PSS/E resultat för station med en sektionerad samlingsskena och n-1 fel på komponenter

<----- CONTINGENCY LABEL ----->			STUCK			<----- POST FAULT ----->			<----- POST SWITCHING ----->		
PRIMARY	MD	SECONDARY	MD	BREAKER		LOAD CU.	FREQ.	PROB.	LOAD CU.	FREQ.	PROB.
						(MW)	(OC/Y)	(H/Y)	(MW)	(OC/Y)	(H/Y)
BUS 1	F	NONE		NONE		10.00	0.0022	0.00	10.00	0.0022	0.03
LINE 10	F	NONE		NONE		10.00	0.0026	0.01	10.00	0.0026	0.12
LINE 12	F	NONE		NONE		10.00	0.0026	0.01	10.00	0.0026	0.12
BUS 17	F	NONE		NONE		10.00	0.0022	0.00	10.00	0.0022	0.03
BREAKER 21	F	NONE		NONE		10.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50
BREAKER 22	F	NONE		NONE		10.00	0.0070	0.01	10.00	0.0070	0.50
BREAKER 23	F	NONE		NONE		20.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50
BREAKER 24	F	NONE		NONE		10.00	0.0070	0.01	0.00	0.0070	0.50
BREAKER 25	F	NONE		NONE		10.00	0.0070	0.01	10.00	0.0070	0.50
TOTAL RESULTS						<----- POST FAULT ----->			<----- POST SWITCHING ----->		
	FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.		FREQ.	PROB.	I.P.	E.U.E.		
	(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)		(OC/Y)	(H/Y)	(MW/Y)	(MWH/Y)		
	0.0446	0.09	0.52	1.03		0.0236	1.30	0.24	13.00		

Det är endast fel på brytare 23 (sektioneringsbrytaren) som leder till 20 MW lastbortfall i POST FAULT. Felfrekvensen är 0.007 gånger/år.

De övriga felen leder till 10 MW lastbortfall i POST FAULT. Den totala frekvensen för dessa fel är 0,0376 gånger/år. Eftersom det är fler komponenter i modellen ökar felfrekvensen jämfört med Tabell 41 men mängden bortkopplad energi (i POST FAULT) minskar från 1,31 till 1,03 MWh/år med en sektioneringsbrytare.



Figur 48 PSS/E-modell av station med två samlingsskenor

5 Slutsatser

I PSS/E finns det två olika moduler för att genomföra tillförlitlighetsberäkningar. Probabilistic Reliability Assessment används för att analysera ett normalt PSS/E-nät där stationer representeras med en nod. Den andra modulen, Substation Reliability Assessment, kan användas för att göra analys av en eller flera stationer med en detaljerad modell där varje komponent representeras med sin felstatistik.

Probabilistic Reliability Assessment används för att beräkna tillförlitligheten för ett nät. Den använder PSS/E:s belastningsfördelningsmodell och räknar igenom de felfall som har valts för analysen (n-1, n-2 eller n-3) och analyserar konsekvenserna av varje störning. Sannolikhetsdata för störningar på t.ex. stationer, ledningar, kablar och transformatorer anges i en datafil. Programmet genomför en deterministisk studie, dvs alla specificerade störningar räknas igenom och de felfall som leder till överskridande av inställda gränsvärden (t.ex. överlaster, överspänning, underspänning, bortkopplad last eller nätkollaps) rapporteras. Med hjälp av felstatistik beräknas sedan index för varje konsekvens. Detta index är en funktion av hur mycket gränsvärdet är överskridet samt sannolikheten för felfallet.

Felstatistik kan anges med generella data, t.ex. risken för ledningsfel kan anges som antalet fel per km och år. Det går också att ange specifika data för varje objekt om så önskas.

Med denna modul i PSS/E är det mycket enkelt att snabbt räkna igenom tusentals olika felfall och få olika index som visar hur allvarliga konsekvenser det blir i systemet. Det är därigenom möjligt att t.ex. jämföra olika nätalternativ för att avgöra vilken nätförstärkning som är mest robust.

Resultatet från beräkningarna är beroende av kvalitén på indata. De flesta index är direkt proportionella mot den angivna felfrekvensen för objekten (t.ex. ledningar). Det bör dock noteras att även om det finns osäkerheter angående felfrekvenser och bortkopplingstider går det att jämföra de relativa skillnaderna mellan olika alternativ. T.ex., det går att avgöra att alternativ A har 30% mindre risk för överlast än alternativ B.

Slutsatsen är att denna typ av beräkning är ett användbart verktyg för att analysera tillförlitligheten för olika nätalternativ och resultaten kan användas vid utvärdering av nätförstärkningar. Funktionen är väldigt effektiv när det gäller att identifiera svaga punkter i nätet, speciellt i kombination med funktionen Contour, som grafiskt åskådliggör var det sker flest/alvarligast fel.

Substation Reliability Assessment kan användas för att göra en detaljerad studie av t.ex. ett ställverk. Huvudkomponenterna i ställverket läggs då in i en objektbaserad modell där samlingsskenor, brytare, frånskiljare och eventuellt spännings- och strömtransformatorer modelleras och felstatistik anges för varje ingående komponent. Det är därigenom möjligt att modellera alla typer av ställverk. Denna analys beräknar risken för bortkopplad last pga olika fel i ställverket, eller ställverkets omgivning (t.ex. inkommande ledningar). Bortkopplad last är antingen last som isoleras från nätet pga

brytarmanöver eller last som reduceras pga att objekt (brytare, frånskiljare, ledning eller transformator) har begränsad kapacitet för effektöverföring.

Fel på en komponent samt alla kombinationer av samtidigt fel på två godtyckliga komponenter analyseras av programmet. Det görs ingen belastningsfördelningsberäkning i denna analys utan en förenklad transportmodell används i stället. Det innebär att det endast är bortkopplad last som beräknas i denna modul.

Det går också att lägga in statistik för risken för misslyckad brytarmanöver i analysen. Programmet analyserar två tillstånd för alla felfall; POST FAULT är tillståndet efter det att felaktig komponent har isolerats mha brytare. POST SWITCHING är tillståndet efter det att omkopplingar gjorts med frånskiljare och brytare för att om möjligt återställa matningen under reparationstiden av den felaktiga komponenten.

Alla felkombinationer som leder till bortkopplad last redovisas i programmet. De viktigaste nyckeltalen från analysen är frekvens, varaktighet samt totalt bortkopplad energi. Det är relativt enkelt att genomföra en tillförlitlighetsanalys av en station med detta verktyg i PSS/E och det har stora fördelar gentemot t.ex. handräkning eller Excel-modeller.

Under arbetets gång har det upptäckts ett antal mindre buggar i PSS/E. Dessa är rapporterade till programleverantören och ska bli åtgärdade i framtida versioner av programmet.

Det bedöms inte finnas något behov av ett externt hjälpprogram för att föra in data från en extern källa till PSS/E. Inmatningen av indata är så pass enkel att det inte tar lång tid att göra den manuellt.

Ett problem vid tillförlitlighetsberäkningar är avsaknaden av indata. I dagsläget finns det ingen bra sammanställning av felstatistik som kan användas i PSS/E. ENTSO-E sammanställer felfrekvenser för komponenter, men någon varaktighet för komponentfel sammanställs inte, och den kommer också att variera stort mellan olika nätbolag och platser, beroende av lagerhållning och avstånd till servicepersonal.

Eftersom PSS/E redan har en så stor spridning bland nätbolag bedöms programmet vara något att satsa på när det gäller tillförlitlighetsberäkningar. Dessutom har de flesta nätbolag redan modeller av sina nät inlagda i PSS/E-format, vilket kraftigt underlättar beräkningarna.

Referenser

- [1] Manual till PSS/E 32.0.5
- [2] Substation Reliability Analysis using PSS/E, Kamyar Nosrati, examensarbete KTH, 2011

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