

TSFS17 Elkraftsystem

Säkerhet – 14 augusti 2003 blackout

Erik Frisk

17 november, 2023

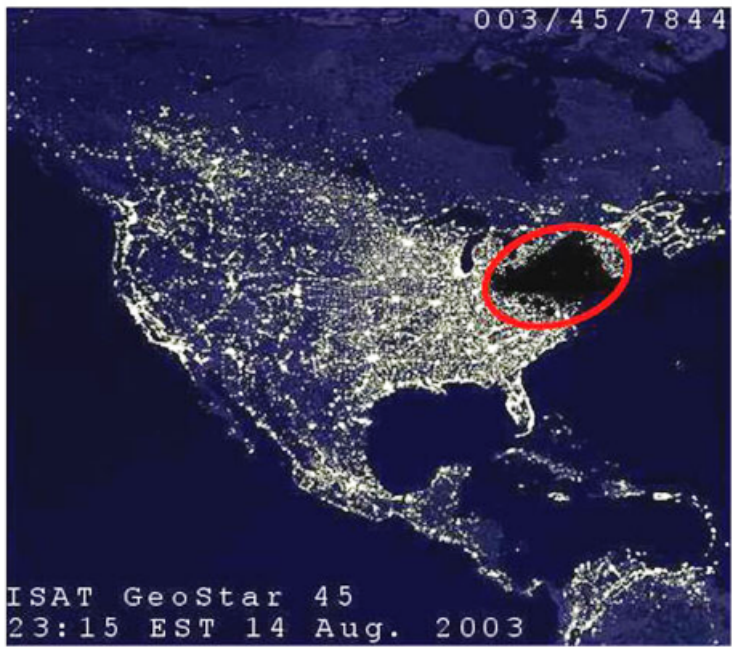
- 1 Nordamerikanska kraftnätet och stabil distribution
- 2 Förutsättningar den 14 augusti
- 3 Ohio kollapsar
- 4 Nordöstra USA-Kanada kollapsar
- 5 Orsaker och slutsatser

- Strax efter 16:00 startade ett händelseförlopp som gjorde mellanvästern, nordöstra USA, samt delar av Kanada strömlöst.
- Påverkade 55 miljoner människor
- En normal last på 68,000 MW försvann
- Tog upp till 4 dagar att återställa kraftnätet
- Kostnader i USA, 5-10 miljarder USD
- Undantagstillstånd utlyst

Händelsen i korthet - 14 augusti, 2003

- Fram till 15:05 är kraftnätet elektriskt säkert med en del incidenter och misstag innan
- 15:05 stängs en 345-kV ledning i Ohio ned pga. kontakt med träd
- En följd av ledningar blir överbelastade inom 1 timme och stängs också ned
- 16:05 Kollaps i Ohio
- 16:05-16:09 Kollaps i delar av Michigan
- 16:10:36 - 16:10:39, full kollaps i hela området

003/45/7844



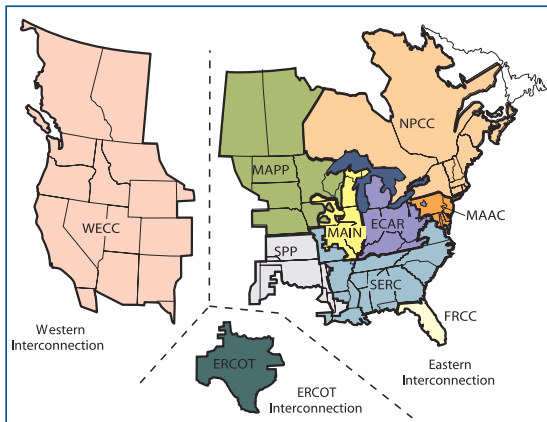
ISAT GeoStar 45
23:15 EST 14 Aug. 2003



- 1 Nordamerikanska kraftnätet och stabil distribution
- 2 Förutsättningar den 14 augusti
- 3 Ohio kollapsar
- 4 Nordöstra USA-Kanada kollapsar
- 5 Orsaker och slutsatser

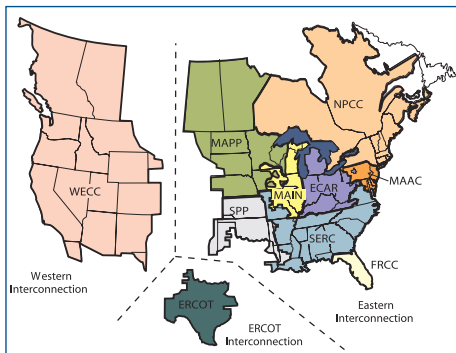
Nordamerikanska kraftnätet

- Nordamerikanska nätet är egentligen 3 elektriska nät
- Näten isolerade förutom några få DC-länkar



Nordamerikanska kraftnätet

- Hade de otur i Ohio? Absolut!
- Varje del i kraftnätet del av en stor kopplad, väldigt komplicerad, maskin
- Ett fel någonstans sprider sig väldigt fort
- Stor ingenjörsmässig framgång att dessa nät fungerar

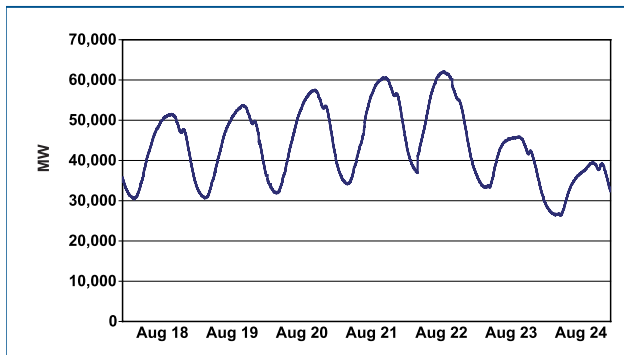


Vad krävs för tillförlitlig drift av kraftnätet

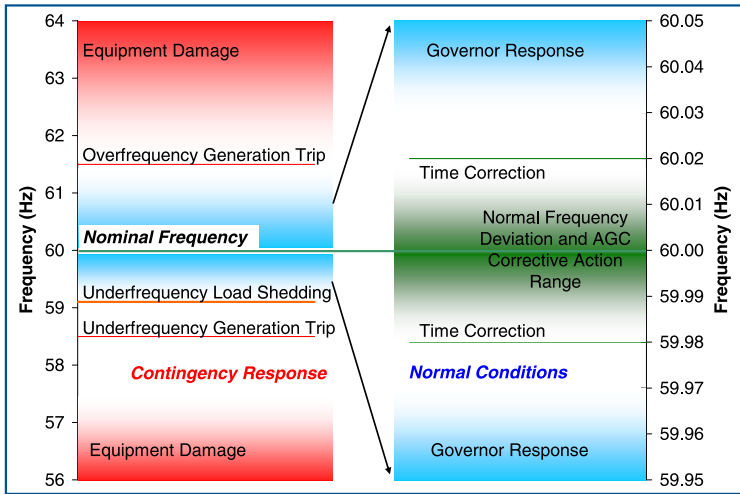
- 1 Balansera energiproduktion och konsumtion
- 2 Balansera produktion och konsumtion av reaktiv effekt
- 3 Övervaka transmissionsledningars temperatur
- 4 Stabilitet
- 5 Upprätthåll N-1 kriterium
- 6 Underhåll
- 7 Planer för akuta situationer

Balansera effektproduktion och konsumtion

- Förväntad last går att prediktera (dygn, temperatur, väder, ...)
- Generatorer grovplaneras per timme, och finregleras sedan kontinuerligt
- Högre produktion än behov ger ökad frekvens
- Lägre produktion än behov ger minskad frekvens



Normala och icke-normala frekvensintervall



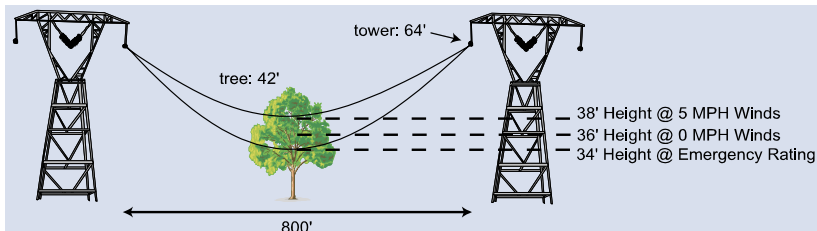
Balansera reaktiv effektproduktion och konsumtion

- Hålla spänning inom fastställda gränser
- Genererad reaktiv effekt (generatorer, kondensatorbatteri) leder typiskt till minskad spänningsnivå
- Förbrukad reaktiv effekt leder typiskt till ökad spänningsnivå
- Om inte tillräckligt med reaktiv effekt finns för att balansera kan det resultera i spänningsskollapser



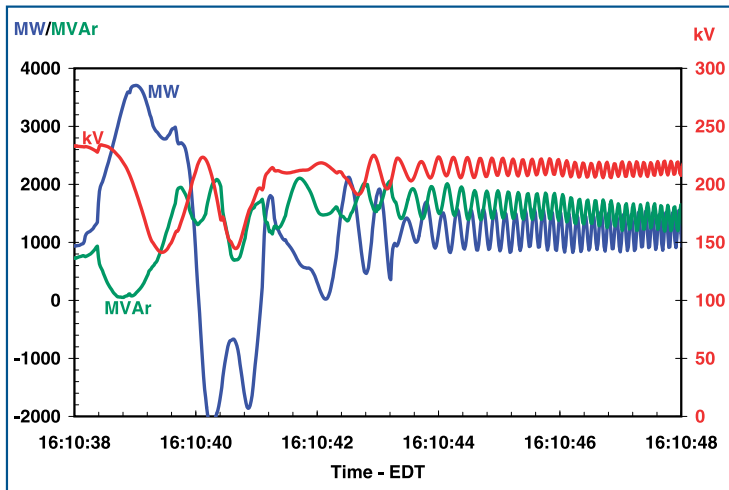
Temperatur

- Undvika överhettning i komponenter
- Luftflöden påverkar
- Högre energiflöden ger högre temperatur och transmissionsledningar förlängs
- ...



Stabilitet

Spänning, aktiv och reaktiv effekt, Ontario till Detroit. Stora svängningar!



- Kraftnätet skall vara säkert även om 1, godtycklig, incident inträffar
- Exempelvis om en generator går ned eller om en transmissionledning faller från
- Efter en incident har operatörerna 30 minuter på sig att åter uppfylla kriteriet

Varför är det inte fler blackouts?

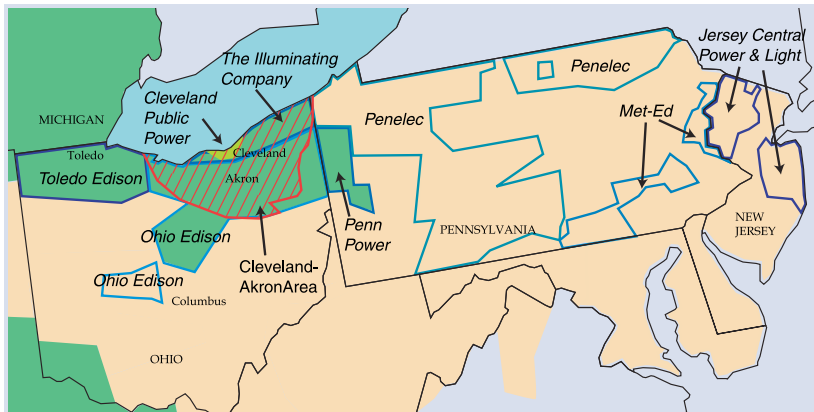
- Noggrant planerad drift
- Förberedda på det värsta
- Möjlig till mycket snabb respons vid akuta situationer
- Se till att ha buffrade resurser av kraftgenerering

- 1 Nordamerikanska kraftnätet och stabil distribution
- 2 Förutsättningar den 14 augusti
- 3 Ohio kollapsar
- 4 Nordöstra USA-Kanada kollapsar
- 5 Orsaker och slutsatser

Förutsättningar den 14 augusti

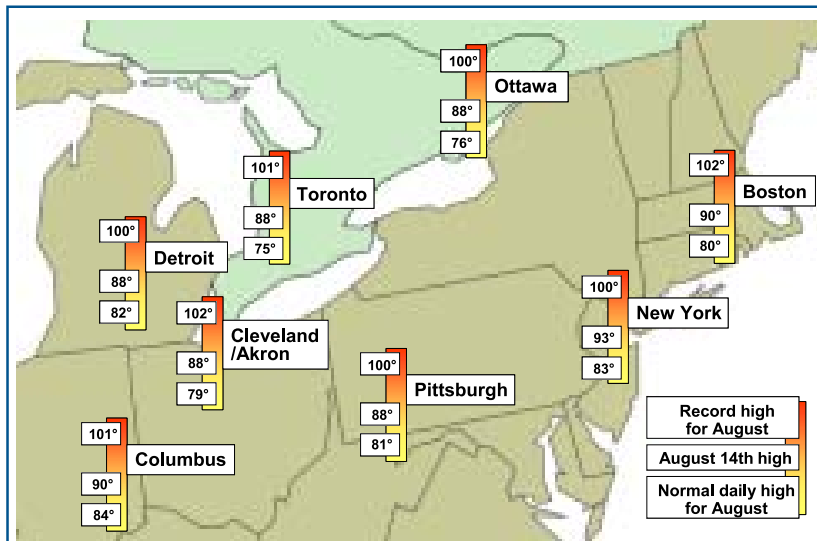
- Före 15:05 är nätet elektriskt säkert
- 15:05 uppfylldes N-1-kriteriet
- Klockan 15:05 går Harding-Chamberlain ledningen ned och startar kedjan som skall leda till blackout
- Viktig slutsats, inget av det som hände innan 15:05 var direkt orsak till det som hände
- Det var alltså inte:
 - Tillgänglighet på generatorer eller transmissionsledningar
 - Höga effektflöden
 - Låga spänningsnivåer eller frekvensfluktuationer innan 15:05
 - Låg tillgänglighet på reaktiv effekt
- Men nätet var tydligt känsligt/utsatt, och det förstod man inte fullt ut

Last den 14 augusti

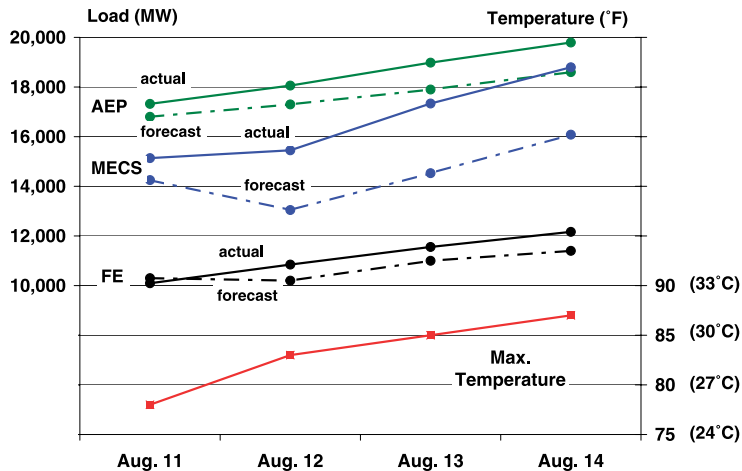


Area	All-Time Peak Load (MW)	Load on August 14, 2003 (MW)
Cleveland-Akron Area (including Cleveland Public Power)	7,340	6,715
FirstEnergy Control Area, Ohio	13,299	12,165
FirstEnergy Retail Area, including PJM	24,267	22,631

Temperaturer den 14 augusti

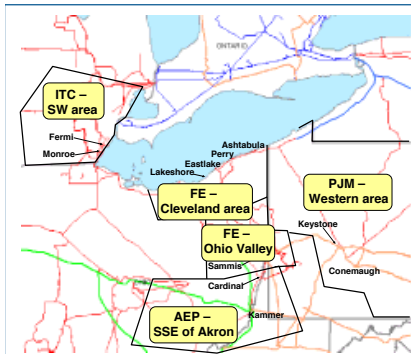


Last- och temperaturprediktioner den 14 augusti



- Konstant underprediktion (lite)

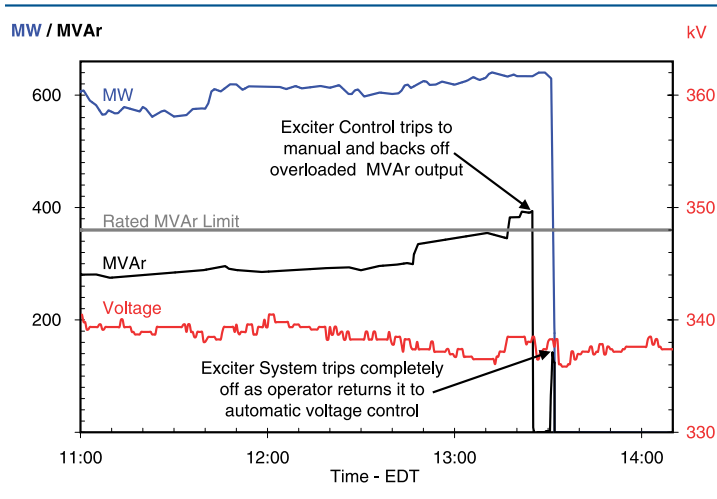
Eastlake 5 generator



- Generatoren viktig källa för reaktiv kraft
- Operator ökar generering av reaktiv kraft
- Gör så tills enhetens säkerhetssystem stänger ned den, 13:31
- I sig inte säkerhetskritiskt, nätet fortfarande säkert
- Dock, minskar styrmöjligheter av nätet och ökar importen av kraft.
- Reaktiv kraft måste i huvudsak genereras lokalt

Generator Eastlake 5 går ned (13:31)

För att täcka upp ökat behov av reaktiv effekt ökas effektuttaget från Eastlake 5



Sammanfattning

- Högsommarvärme, men inte extrema temperaturer
- Ingen extrem last
- Signifikant last från luftkonditioneringsutrustning som konsumerar reaktiv effekt (induktionsmotorer)
- Små mariginaler för reaktiv kraft
- 4 av 5 kondensatorbatterier ur drift för inspektion
 - något man normalt ej gör under hög last
 - ej meddelat grannar att det ev. var begränsad möjlighet att generera reaktiv effekt vid incidenter
 - Problem: First Energy i Ohio förstod ej hur viktigt detta var
 - Beträktade ej dessa kondensatorbatterier som kritiska komponenter
- En generator (Eastlake 5) och ett kärnkraftverk (Perry) huvudsakliga producenter av reaktiv effekt i området (1852 MW/930 MVar)

- Import av 3,900 MW och 400 MVAR behövdes att täcka behov
- Reglereffekt: 688 MVAR varav 660 MVAR från Perry
- Små variationer i nätet ger att området har stor brist på reaktiv effekt om exempelvis exempelvis Perry tappas.
- First Energy förstod inte hur små marginalerna var
- First Energy börjar ta de 4 kondensatorbatterierna i drift i förtid under dagen

Ohio vs. omvärlden

- Hävdats av många att problemen berodde på energiflöden till angränsande områden och att det egentligen inte var Ohios fel
- Effektnivåerna var höga, men inte utanför begränsningar och simuleringar har visat att inter-regionala flöden hade minimal påverkan på förloppet.
- Nivåerna den 14 augusti hade klarats utan tillbud tidigare
- Senare simuleringar har visat att blackout kunde/skulle undvikits

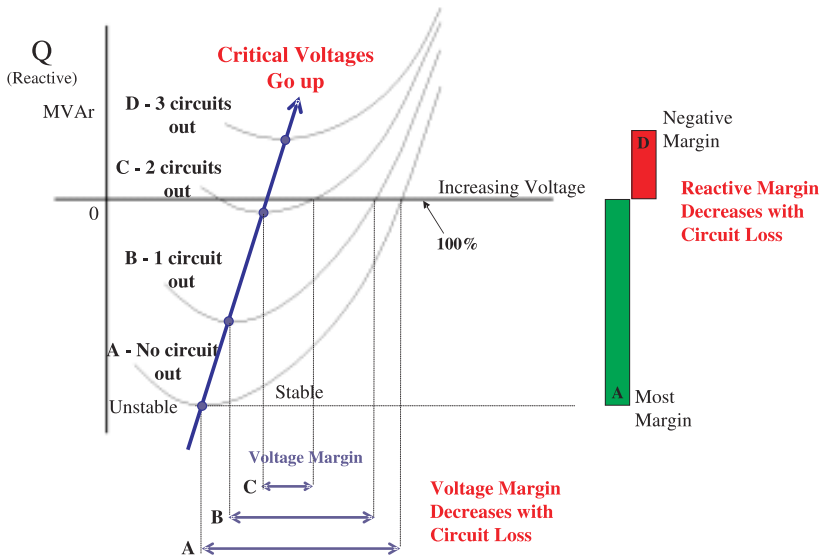
Spänningsfall börjar synas i näten

- Stort behov av A/C och liknande resurser
- Start 100%, 97.3% då Eastlake 5 (13:31), 95.9% Chamberlain-Harding (15:05)
- First Energy förstod inte hur utsatt nätet var, rapporterades som normalt
- Lägsta tillåtna trösklar, lägre än grannar, inkompatibilitet
- Lägre spänningar, högre förluster

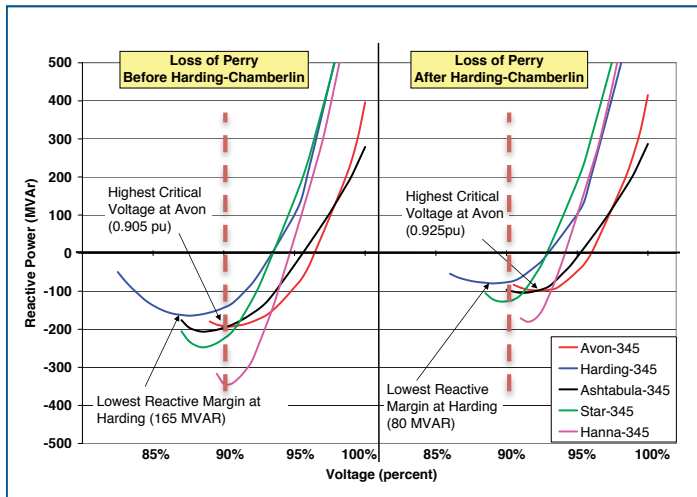
Table 4.3. Comparison of Voltage Criteria (Percent)

345 kV/138 kV	FE	PJM	AEP	METC ^a	ITC ^b	MISO	IMO ^c
High	105	105	105	105	105	105	110
Normal Low	90	95	95	97	95	95	98
Emergency/Post N-1 Low	90	92	90 ^d		87		94
Maximum N-1 deviation	5 ^e			5			10

Spänningsfall och stabilitet

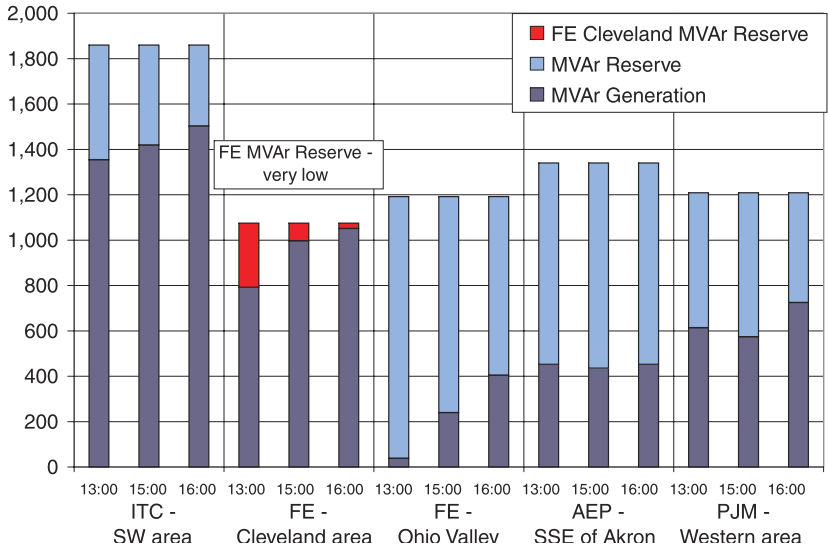


VQ-diagram för Ohio



90% OK för First Energy, men inte för grannarna

Reaktiv kraft, reserver



Sammanfattning av förutsättningarna

- First Energy förstod inte att de hade väldigt lite reaktiv effektmarginal
- Företaget visste att om de förlorade Eastlake 5 och/eller Perry så hade de väldigt små marginaler
- Simulering visade att innan 15:05 var systemet säkert
- Efter Harding-Chamberlain (15:05) så är det inte N-1, kan ej återställa till N-1 på under 30 minuter
- Skulle behöva importera reaktiv kraft, vilket fanns resurser för i närliggande områden, men det är svårt över långa avstånd vid hög last
- First Energy låg precis på gränsen av vad som är tillåtet (spänningsmarginaler)
- Detta sammantaget med väldigt lite reaktiv reglereffekt lämnar området i ett mycket känsligt läge

- 1 Nordamerikanska kraftnätet och stabil distribution
- 2 Förutsättningar den 14 augusti
- 3 Ohio kollapsar**
- 4 Nordöstra USA-Kanada kollapsar
- 5 Orsaker och slutsatser

Varför kollapsar Ohio

- Fas 1 (12:15-14:14) - En normal eftermiddag förfaller
- Fas 2 (14:14-15:39) - First Energy's datorproblem
- Fas 3 (15:05-15:57) - Viktiga transmissionsledningarna faller ifrån
- Fas 4 (15:39-16:08) - 138kV distributionssystemet kollapsar

Tidsperspektiv

- Runt 15:46 började insikten komma att läget är allvarligt
- Att droppa 1,500 MW i lokal last hade kunnat stoppa skeendet, men inget gjordes
- 20 minuter senare var allt för sent

Fas 1 (12:15-14:14) - En normal eftermiddag förfaller

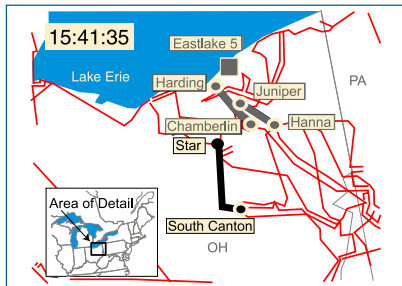
- 12:15 - 16:04, Tillståndsskattare avstängd
 - 12:05, stora skattningsfel och ingenjör startade om och fick konvergens
 - Glömde slå på att den automatiskt skulle köras var 5:e minut, gick på lunch
 - Först 16:04 var tillståndsskattaren igång igen, ungefär 2 minuter innan förfallet började
- Viss oro på FE, ringer runt och ber om mer reaktiv kraft; operatörerna låg redan nära maximal produktion
- 13:31, Eastlake 5
 - Trippar pga. operatörer ökar produktionen av reaktiv kraft
 - First Energy gjorde ingen ny säkerhetsanalys efter Eastlake 5
 - Ska visa sig att de ej heller gjorde en efter att Harding-Chamberlain går ned 15:15 och ej längre N-1
- 14:02, 345kV-ledning går ned pga. trädkontakt
Egentligen inte viktigt, nätet fortfarande elektriskt säkert, men spelade roll för problem med tillståndsskattaren. De visste inte om att denna ledning gått ned.

Fas 2 (14:14-15:39) - Datorproblem

- 14:14 görsvinner alla larmfunktioner i kontrollrummet
- Sedan går huvuddator och backupdator ned utan att någon märker något på 1 timme
- Huvudproblem: operatörerna arbetade med felaktiga data och fick inga larm när de försökte lösa det problem de visste att de hade
- De tror att det inte får några larm, när det beror på att larmsignalleringen gått ned. De litade på larmsystemet när de inte borde gjort det.
- Hade ej aktiverat funktioner som larmar när övervakningssystemet ej betar sig som väntat.

Fas 3 (15:05-15:57) - Transmissionsledningar försvinner

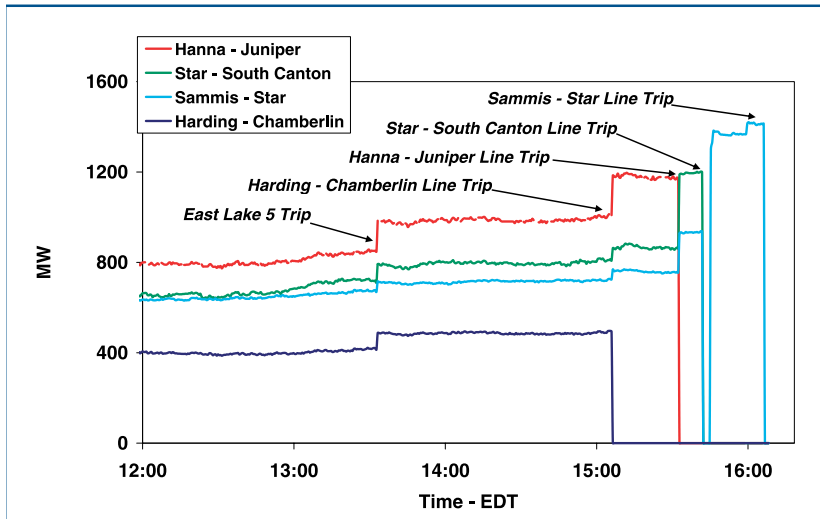
- 15:05 -
Harding-Chamberlain
345kV-ledning ned
(trädkontakt),
(Endast 44% av maxlast)
- 15:32 - Hanna-Juniper
345kV-ledning (trädkontakt)
- 15:41 - Star-South Canton
345 kV-ledning (träd)



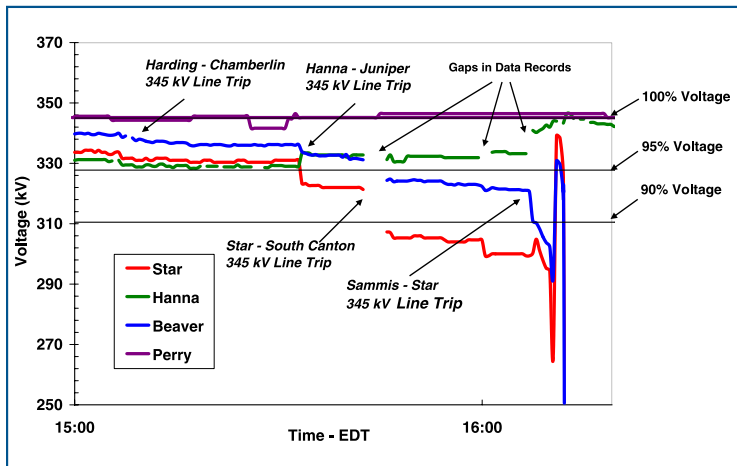
"There is no indication that FE's operators clearly identified their situation as a possible emergency until 15:45 when shift manager thought it looked like they were losing the system; even then they never officially declared an emergency"

De förstod inte riktigt allvaret fortfarande.

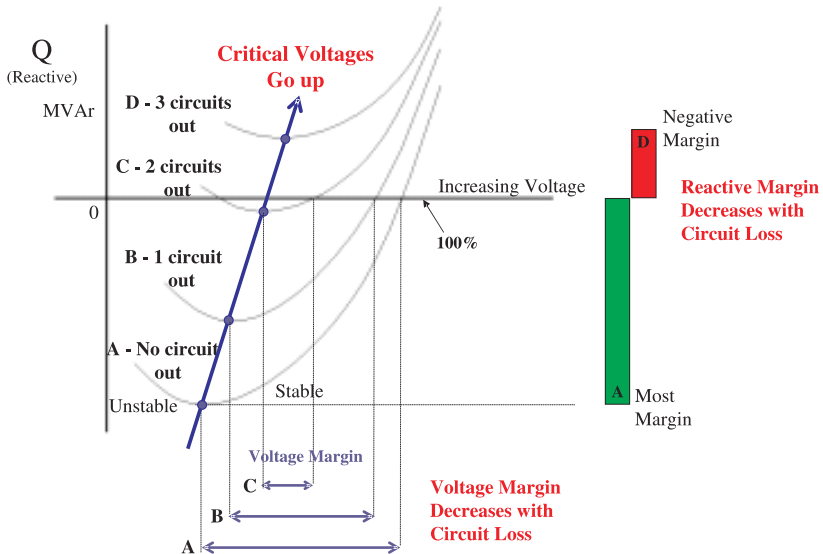
Effektflöden i viktiga ledningar under fas 3



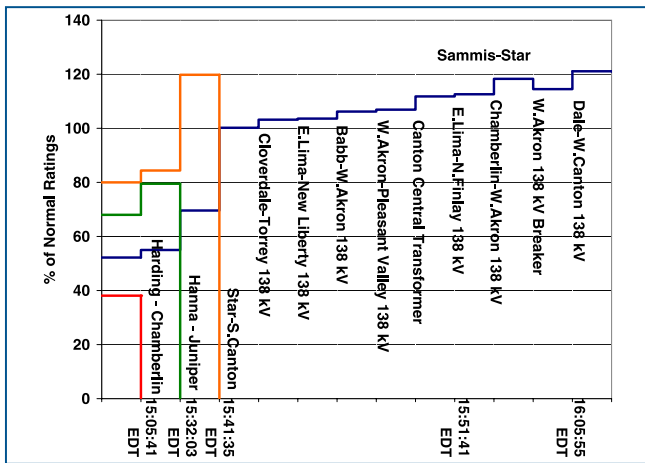
Spänningar i viktiga ledningar under fas 3



Kom ihåg



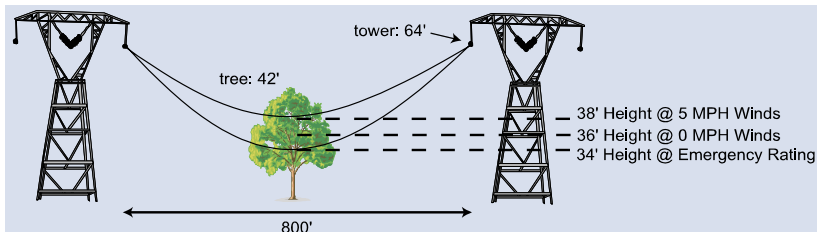
Fas 4 - Norra Ohio kollapsar



- 7 st. 138-kV ledningar trippar på 20 minuter
- Simuleringar visar att med begränsade, lokala, avkopplingar av laster så hade nivåerna stabiliserats i nätet

Varför så mycket trädkontakt?

- Varmt och hög last
- Lite vind, mindre kylning, (1.5 m/s föll till 0.6 m/s vid 15:00)
- Otillräcklig hantering av trädväxt



- 1 Nordamerikanska kraftnätet och stabil distribution
- 2 Förutsättningar den 14 augusti
- 3 Ohio kollapsar
- 4 Nordöstra USA-Kanada kollapsar**
- 5 Orsaker och slutsatser

Tre huvudorsaker till eskalering den 14 augusti

- ① Sammis-Star 345kV-ledning i norra Ohio faller ifrån
- ② Många huvudledningar övervakades av Zone 3(distans) impedansreläer. Detekterar överlast snarare än verkliga fel.
- ③ Reläskydd för ledningar okordinerade och inkompatibla

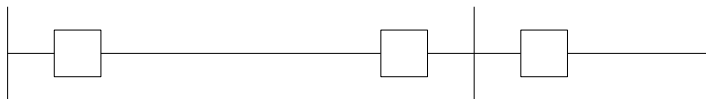
Generella orsaker

- Fel/tripping ger strömspikar som detekteras av reläer som också trippar
- Överlast
- Load-shedding

Zone 1/2/3-reläer

Impedansreläer övervakar upplevd impedans hos ledningen

$$Z = \frac{V}{I}$$



Zone 1 85-90%



Zone 2 125-180%

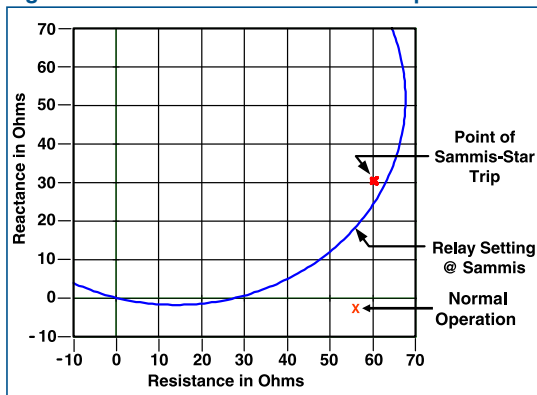


Zone 3 150-200%

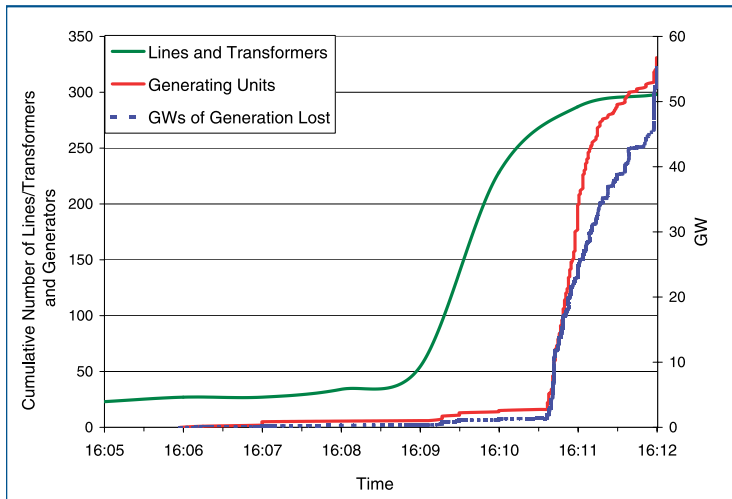


- Sammis-Star trippade pga. Zone-3 relä
- Inga fel vid tillfället
- Men fungerade enligt specifikation

Figure 6.4. Sammis-Star 345-kV Line Trip



Sammi-Star (16:05:57) slutliga orsaken



Eskaleringen efter Sammis-Star väldigt snabb

- 16:05-16:10.36 - Höga laster och typer av reläer ger spridning
 - 16:10.36-16:10.44 - Norra Ohio helt avskuret och sprider sig till Michigan västerut, Pennsylvania, och New York avskurna
 - 16:10.43-16:10:45 - New Jersey och Ontario avskurna
- Hade automatisk lastavkoppling funnits visar simulering att skadan kunnat minskats signifikant, eller helt undvikits

1.
16:05:57



2.
16:05:58



3.
16:09:25



4.
16:10:37



5.
16:10:39



6.
16:10:40



7.
16:10:41



8.
16:10:44



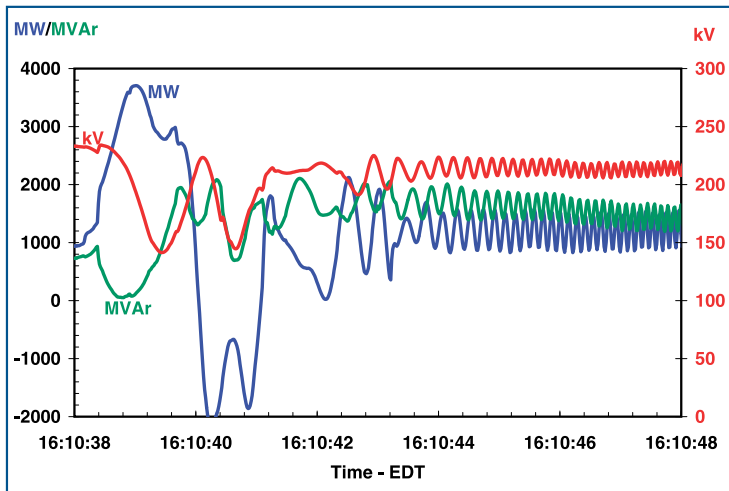
9.
16:10:45



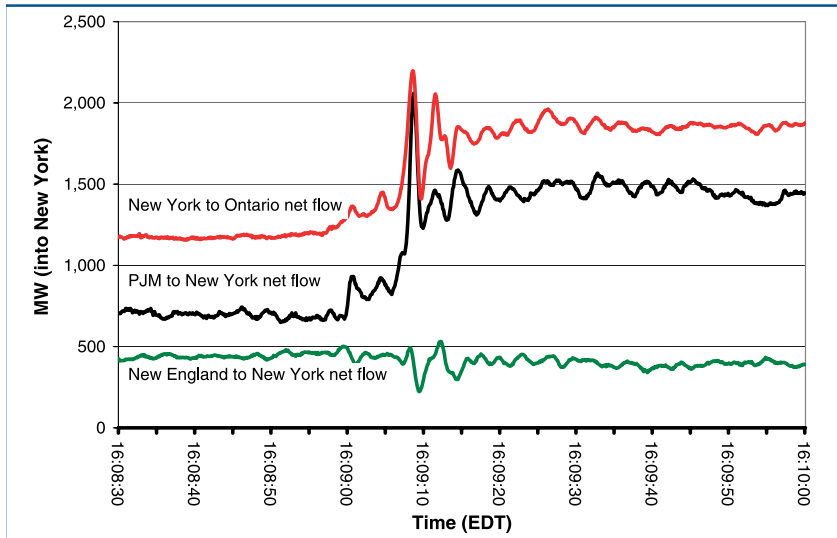
10.
16:13:00



Aktiv och reaktiv effekt/spänning Ontario-Detroit



En impuls effekt på olika delar av nätet



Varför stannade kaskaden?

- Avstånden gjorde att distansreläer ej trippade
- 500kV och 765kV-system bättre på att absorbera störningar
- Automatisk load-shedding fungerade

- 16:06, små (100 MW) effektoscillationer, ökade effektflöden från Pennsylvania
- 16:09, 700 MW effektoscillationer
- 16:10:39, 4000 MW
- Inom 6 sekunder är kontakten med Pennsylvania bruten
- Tre sekunder senare, kontakten med New England bryts

- 1 Nordamerikanska kraftnätet och stabil distribution
- 2 Förutsättningar den 14 augusti
- 3 Ohio kollapsar
- 4 Nordöstra USA-Kanada kollapsar
- 5 Orsaker och slutsatser**

Huvudsakliga orsakstyper

Cause 1

Inadequate
System
Understanding

Cause 2

Inadequate
Situational
Awareness

Cause 3

Inadequate
Tree
Trimming

Cause 4

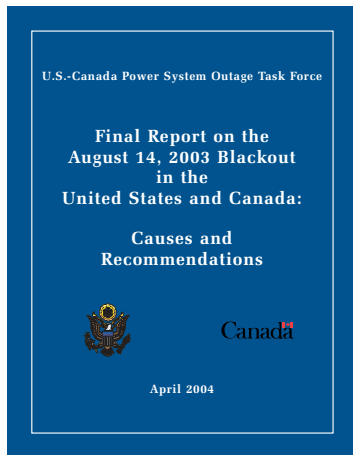
Inadequate
RC Diagnostic
Support

Exempel på slutsatser

- Åtgärdsprogram med 46 övergripande rekommendationer
- Första punkten: göra det olagligt att inte följa säkerhetsregleringar
- 96 nya tillförlitlighetsregleringar
- Three T:s: Trees, training, and tools
- Utvecklingsmål: Smart-grid som kan övervaka och reglera sig själv helt autonomt
- <https://www.naspi.org> - North American SynchroPhasor Initiative

Några åtgärder hos First Energy

- Nya kapacitansbankar har installerats för att få bättre reserver av reaktiv kraft och därmed spänningsstabilitet
- Automatisk lastavkoppling har installerats
- Nytt träningscenter för operatörer, inklusive möjlighet att träna på realtidsdata
- Nya trädtrimningsrutiner



- En intressant rapport som jag kan rekommendera om man vill veta mer.
- Mycket generell diskussion om kraftnät och säkerhet, inte enbart om den specifika händelsen.
- QR-Länk till rapport (Googla titeln, finns på <https://www.energy.gov/>)

