

# Fö 11 - TSFS11 Energitekniska System Säkerhet – 14 augusti 2003 blackout

Erik Frisk

16 maj, 2016



## 14 augusti, 2003

- 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



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



## 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





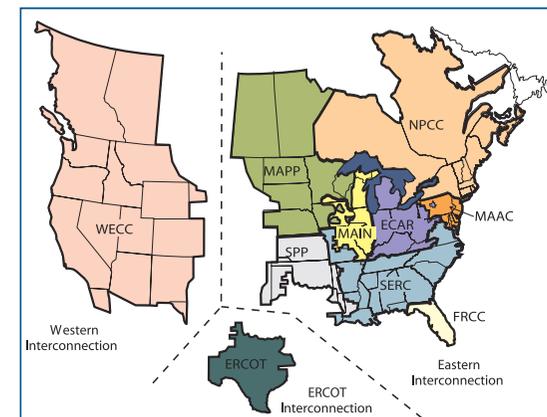
## Outline

- 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

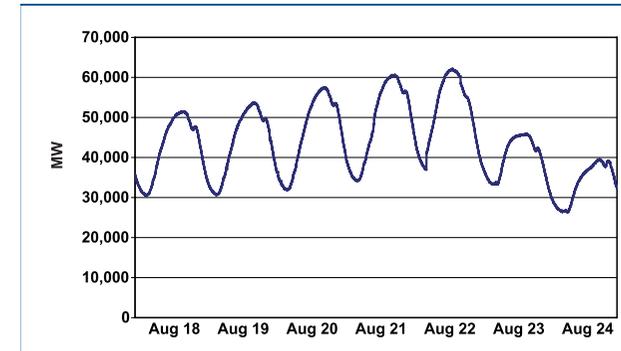


## Vad krävs för tillförlitlig drift av kraftnätet

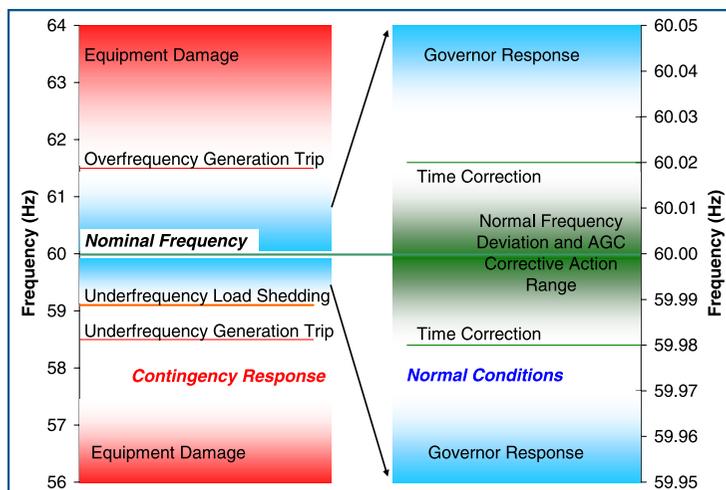
- 1 Balansera energiproduktion och konsumtion
- 2 Balansera produktion och konsumtion av reaktiv effekt
- 3 Övervaka transmissionsledningars temperatur
- 4 Stabilitet
- 5 Upprätthåll N-1 kriterium
- 6 Underhåll
- 7 Planer för akuta situationer

## Balansera effektproduktion och konsumtion

- Förväntad last går att prediktera (dygn, temperatur, väder, ...)
- Högre produktion än behov ger ökad frekvens
- Lägre produktion än behov ger minskad frekvens



## Normala och icke-normala frekvensintervall



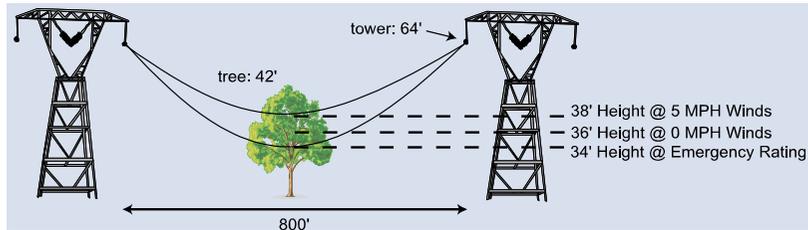
## Balansera reaktiv effektproduktion och konsumtion

- 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 kan tillgodoseas kan det resultera i spänningskollapser



## Temperatur

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



## N-1 kriterium

- 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



## Outline

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

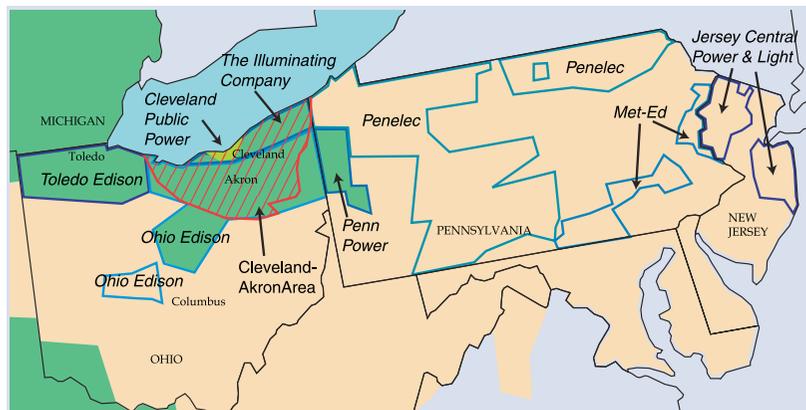


## Förutsättningar den 14 augusti

- 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



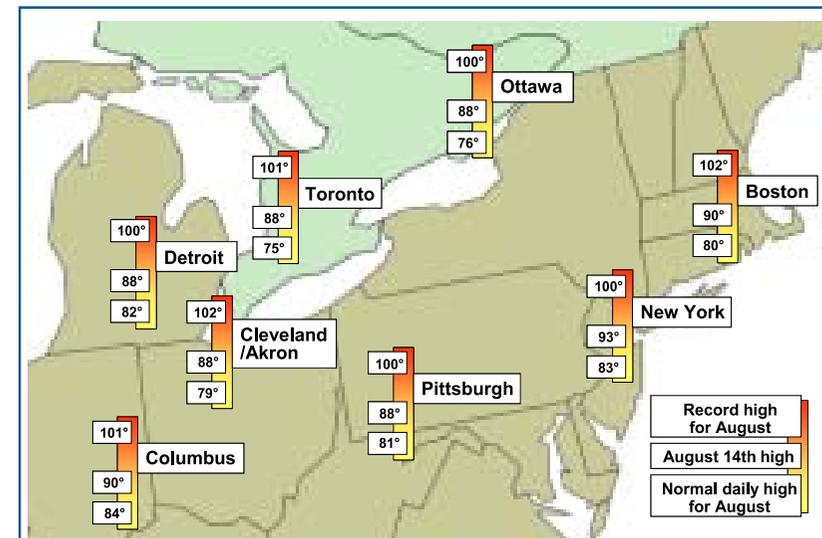
## Last den 14 augusti



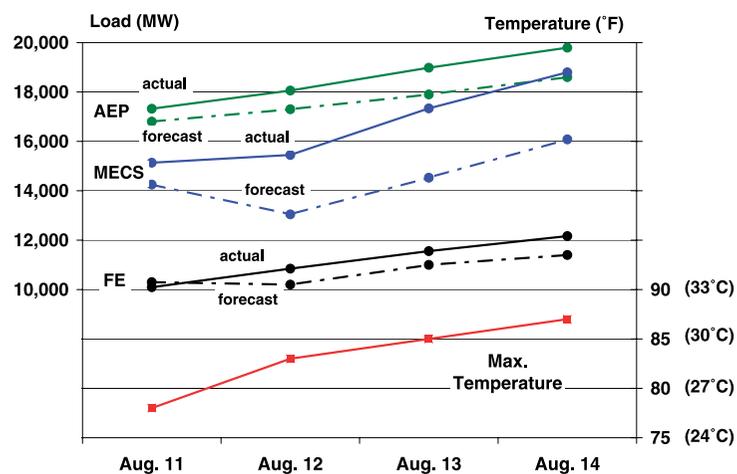
Area	All-Time Peak Load (MW)	Load on August 14, 2003 (MW)
Cleveland-Akron Area (including Cleveland Public Power)	7,340	6,715
FirstEnergy Control Area, Ohio	13,299	12,165
FirstEnergy Retail Area, including PJM	24,267	22,631



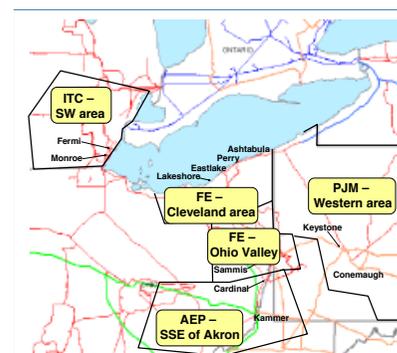
## Temperaturer den 14 augusti



## Last- och temperaturprediktioner den 14 augusti



## Eastlake 5 generator

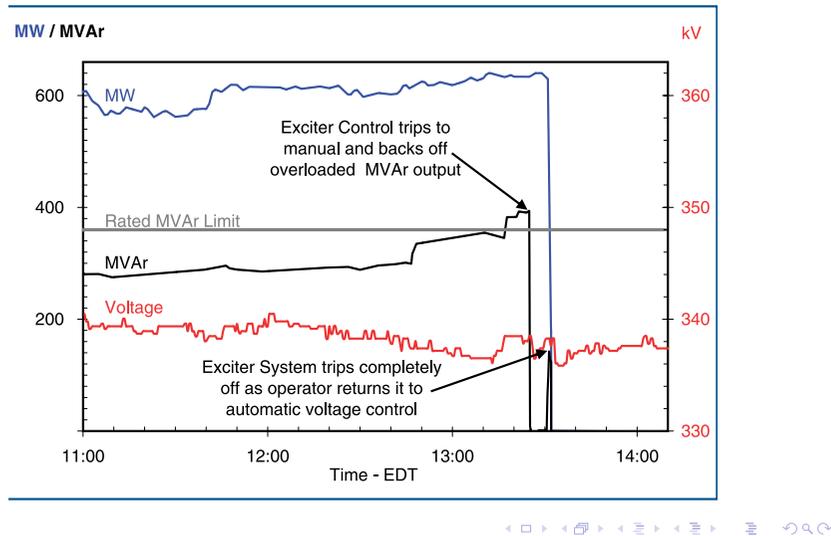


- Generatorn viktig källa för reaktiv kraft
- Operator ökar generering av reaktiv kraft
- Gör så tills enhetens säkerhetssystem stänger ned den, 13:31
- I sig inte säkerhetskritiskt, nätet fortfarande säkert
- Dock, minskar styrmöjligheter av nätet och ökar importen av kraft.
- Reaktiv kraft måste i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



## Generator Eastlake 5 går ned (13:31)

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



## Last innan 15:05 Cleveland-Akron området

- Import av 3900 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

## Sammanfattning

- Högsommarvärme, men inte extrema temperaturer
- Ingen extrem last
- Signifikant last från luftkonditioneringsutrustning som konsumerar reaktiv effekt (induktionsmotorer)
- Små marginaler 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)

## OHIO vs. omvärlden

- Hävdats av många att problemen berodde på energiflöden till angränsande områden och att det egentligen inte var OHIO:s 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

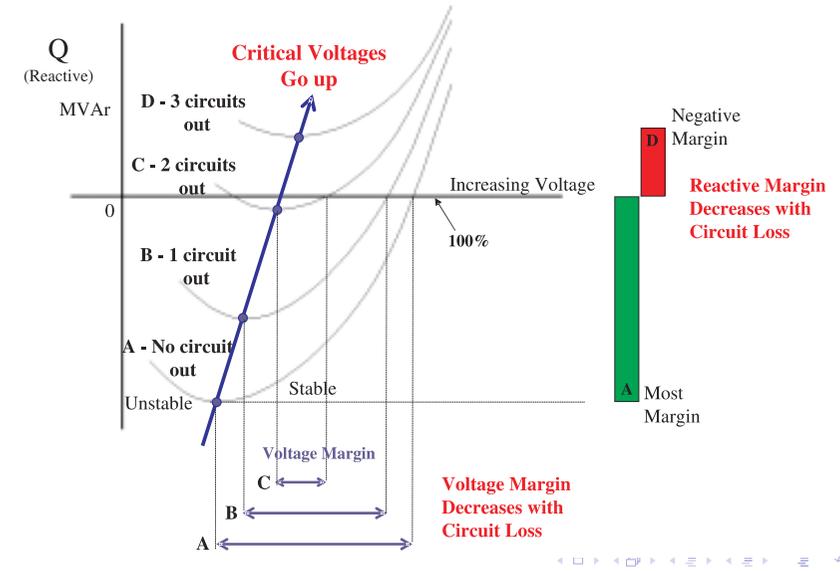
- Start 100%, 97.3% då Eastlake 5 (13:31), 95.9% Chamberlain-Harding (15:05)
- First Energy förstod inte hur utsatt nätet var
- Lägsta tillåtna trösklar, lägre än grannar, inkompatibilitet
- Lägre spänningar, högre förluster

Table 4.3. Comparison of Voltage Criteria (Percent)

	345 kV/138 kV	FE	PJM	AEP	METC <sup>a</sup>	ITC <sup>b</sup>	MISO	IMO <sup>c</sup>
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 <sup>d</sup>		87		94
Maximum N-1 deviation		5 <sup>e</sup>			5			10

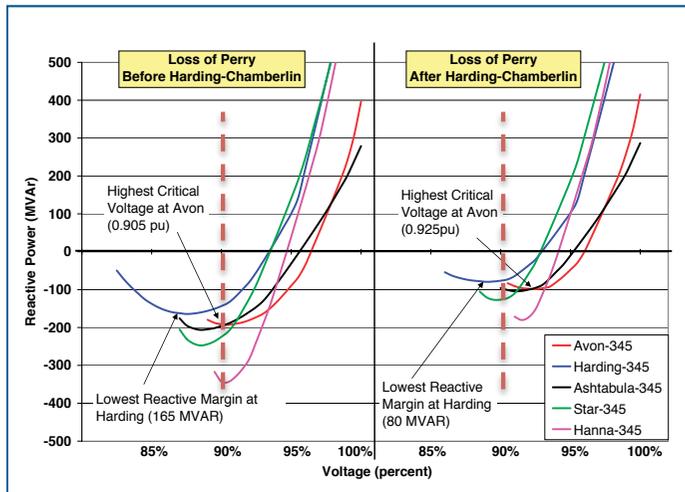
Navigation icons

# Spänningsfall och stabilitet



Navigation icons

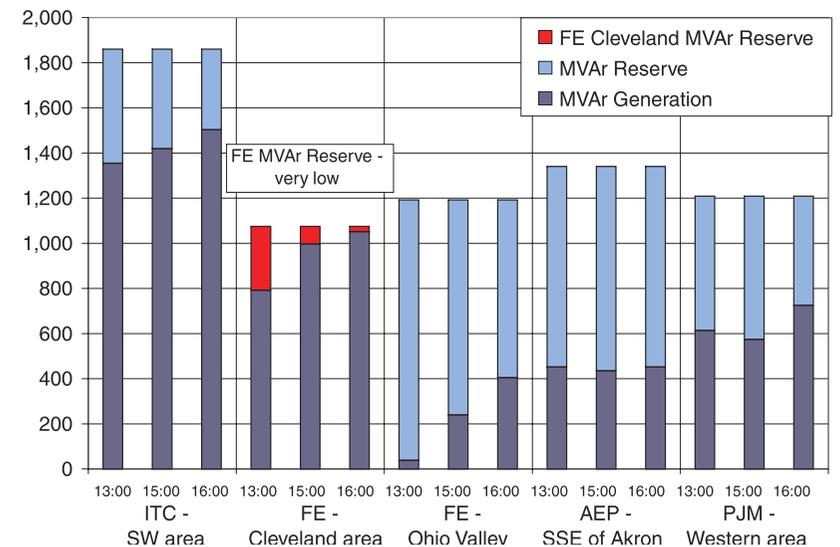
# VQ-diagram för Ohio



90% OK för First Energy, men inte för grannarna

Navigation icons

# Reaktiv kraft, reserver



Navigation icons

## 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
- 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



## Outline

- 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 transmissionsledningar faller ifrån
- Fas 4 (15:39-16:08) - 138kV distributionssystemet kollapsar

### Tidsperspektiv

- Runt 15:46 började insiktien komma att läget är allvarligt
- Att droppa 1500 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
  - Först 16:04 var tillståndsskattaren igång igen
- 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.



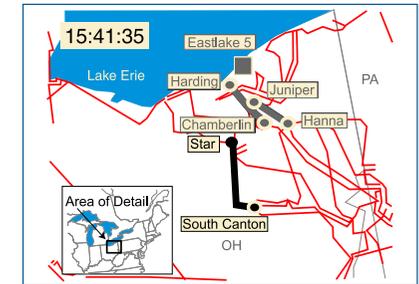
## Fas 2 (14:14-15:39) - Datorproblem

- 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)

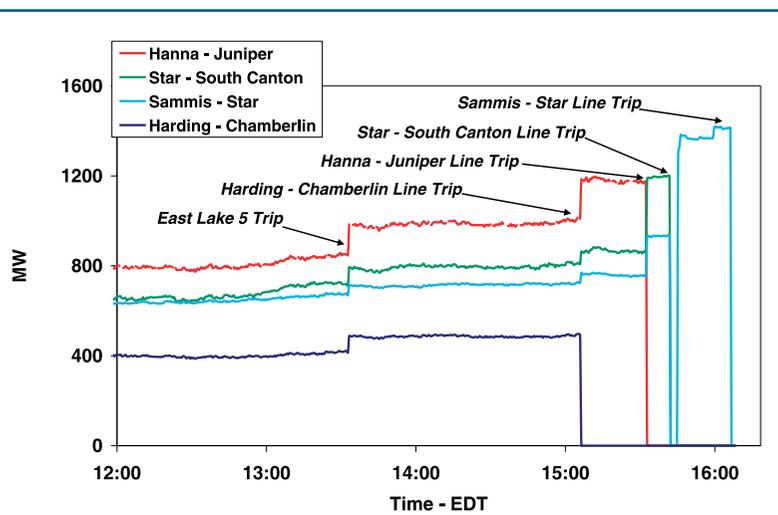


"There is no indication that FE's operators clearly identified their situation as a possible emergency until 15:45 when shift manager thought it looked like they were losing the system; even then they never officially declared an emergency"

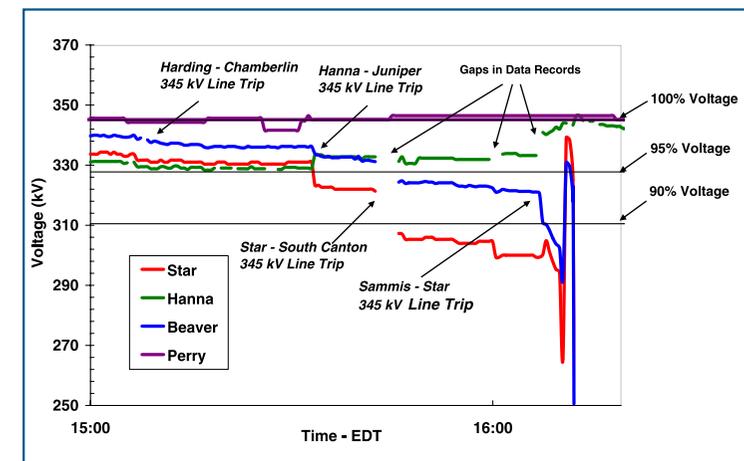
De förstod inte riktigt allvaret fortfarande.

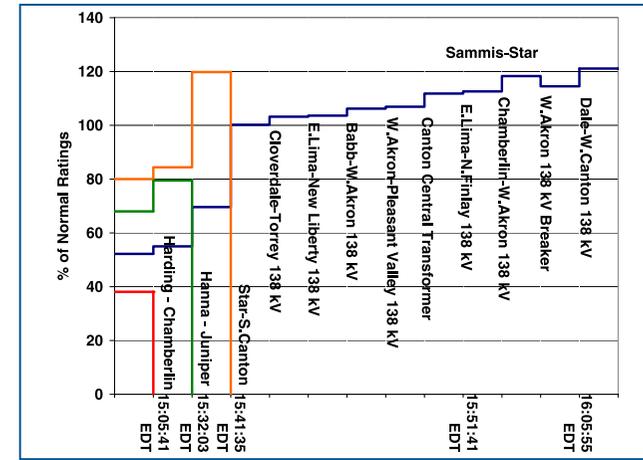
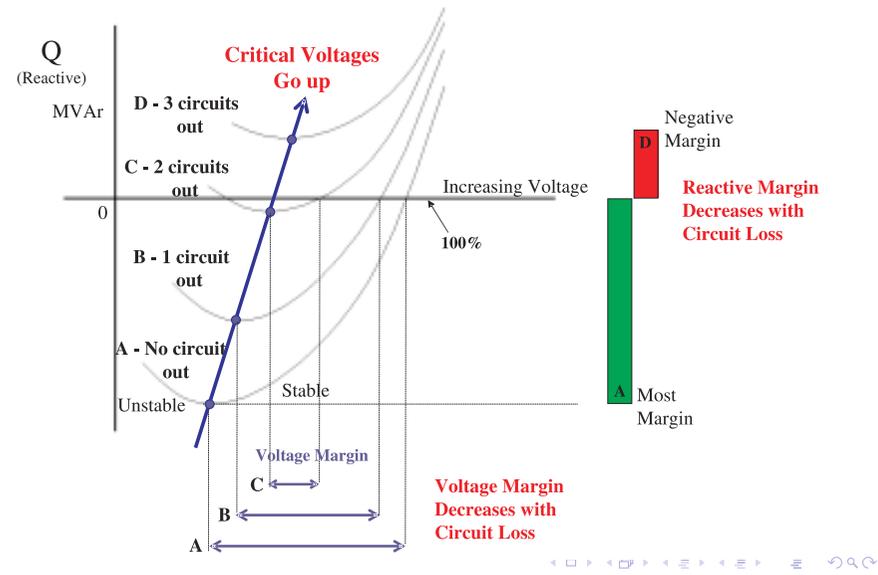


## Effektflöden i viktiga ledningar under fas 3



## Spänningar i viktiga ledningar under fas 3

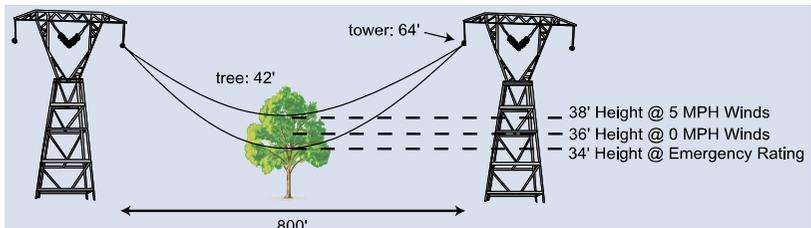




- 7 st. 138-kV ledningar trippar på 20 minuter
- Simuleringar visar att med begränsade, lokala, avkopplingar av laster så hade nivåerna stabiliserats i nätet

## Varför så mycket trädkontakt?

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



## Outline

- 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

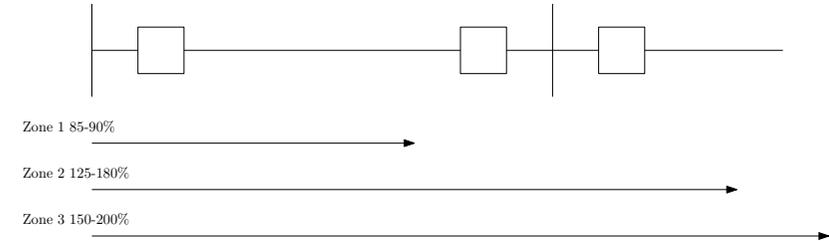
- Fel/tripping ger strömspikar som detekteras av reläer som också trippar
- Överlast
- Load-shedding



## Zone 1/2/3-reläer

Impedansreläer övervakar upplevd impedans hos ledningen

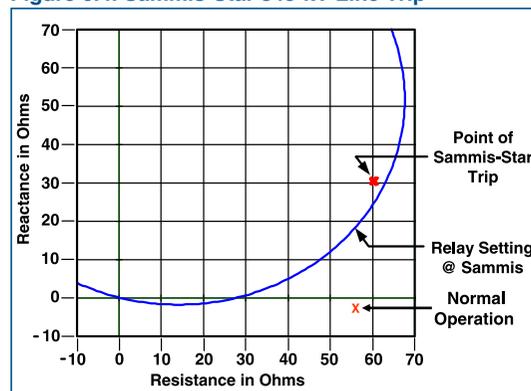
$$Z = \frac{V}{I}$$



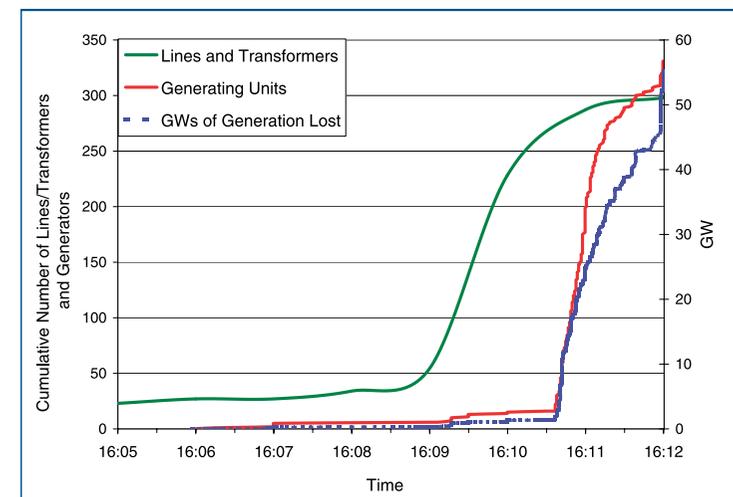
## Sammis-Star

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

Figure 6.4. Sammis-Star 345-kV Line Trip

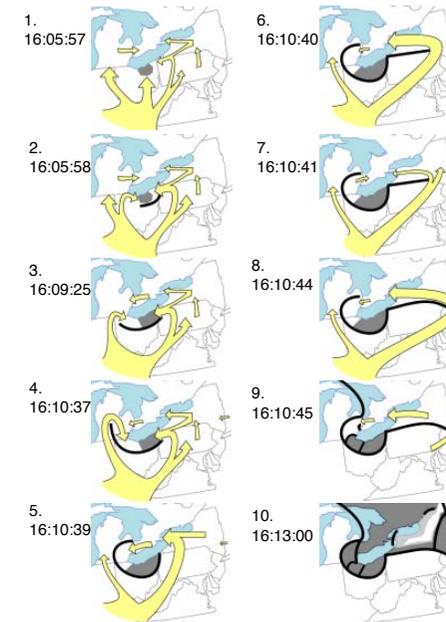


## Sammis-Star (16:05:57) slutliga orsaken

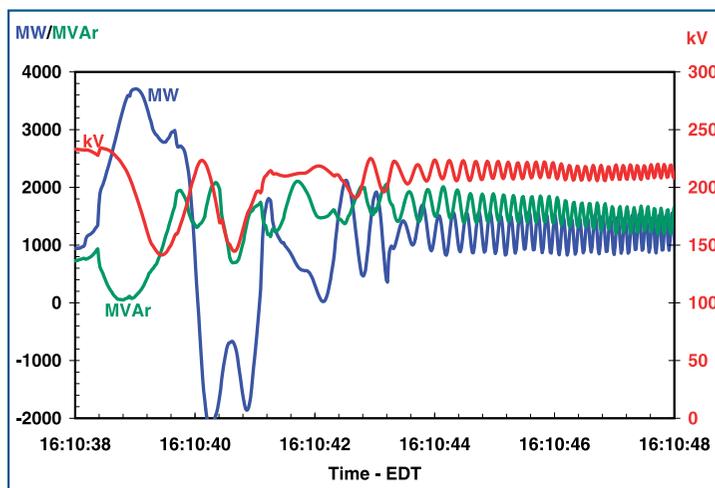


## Eskaleringen efter Sammis-Star väldigt snabb

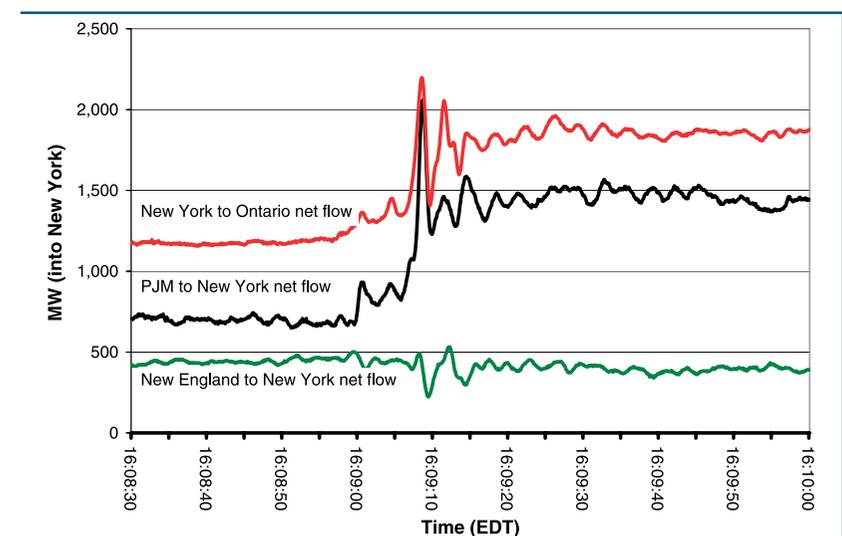
- 16:05-16:10.36 - Höga laster och typer av reläer ger spridning
  - 16:10.36-16:10.44 - Norra Ohio helt avskuret och sprider sig till Michigan västerut, Pennsylvania, och New York avskurna
  - 16:10.43-16:10:45 - New Jersey och Ontario avskurna
- Hade automatisk lastavkoppling funnits visat simulering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



## 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



## Staten New York

- 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



## Outline

- 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