



WHEN TRUST MATTERS

Internationale black-out ervaringen

Meer duurzame energiebronnen en minder inertie

Mischa Vermeer, Wim Kuijpers

06 May 2026



Agenda

1. Introductie
2. Casus 1: Black-out door digitale belasting
3. Casus 2: Invloed van grote PV-parken
4. Black-outs in eiland netten
5. Afsluiting

Introductie

Veranderingen in het energielandschap maakt het netwerk kwetsbaar

A VERANDERING IN ELEKTRICITEITSOPWEKKING

Sterke fluctuatie opwekking

- Zon en wind beschikbaarheidsafhankelijk
- Sterke wisselingen in actief en reactief vermogen

Afname inertie in het net

- Meer vermogenselektronica gestuurde energieopwekking
- Beperkte bijdrage in kortsluitstroom
- Ontworpen als net volgend, niet als net vormend

Veel kleine regelaars van meer leveranciers

- Minder controle op juiste instellingen
- Communicatie-vertragingen hebben invloed op netgedrag
- Grote RES-plants bestaan ook uit vele kleine regelaars

B VERANDERING IN TYPE BELASTING

Grote (digitale) belastingen sterk spanningsgevoelig

- Voorbeelden: Data centers, Crypto miners
- Processors kunnen bij verstoringen plotseling stoppen, zoals: Internet verstoringen, hacken, spanningsdips
- Grote electrolizers voor waterstof productie

Groot belastingsverlies leidt tot instabiliteit

- Verlies van grote belasting leidt tot onbalans en overbelasting
- Kan een kettingreactie veroorzaken met uiteindelijk een black-out

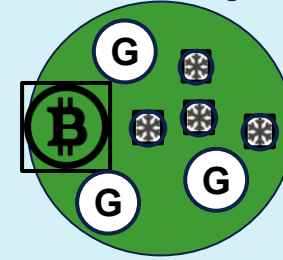
Fault ride through is niet verplicht voor belasting

- Verantwoordelijkheid voor de klant zelf (geredeneerd via eigen belang)
- Nu hooguit geadviseerd vanuit netcodes
- Na verstoring is terugkomst van belasting cruciaal voor het net

Casus 1: Impact van digitale belasting

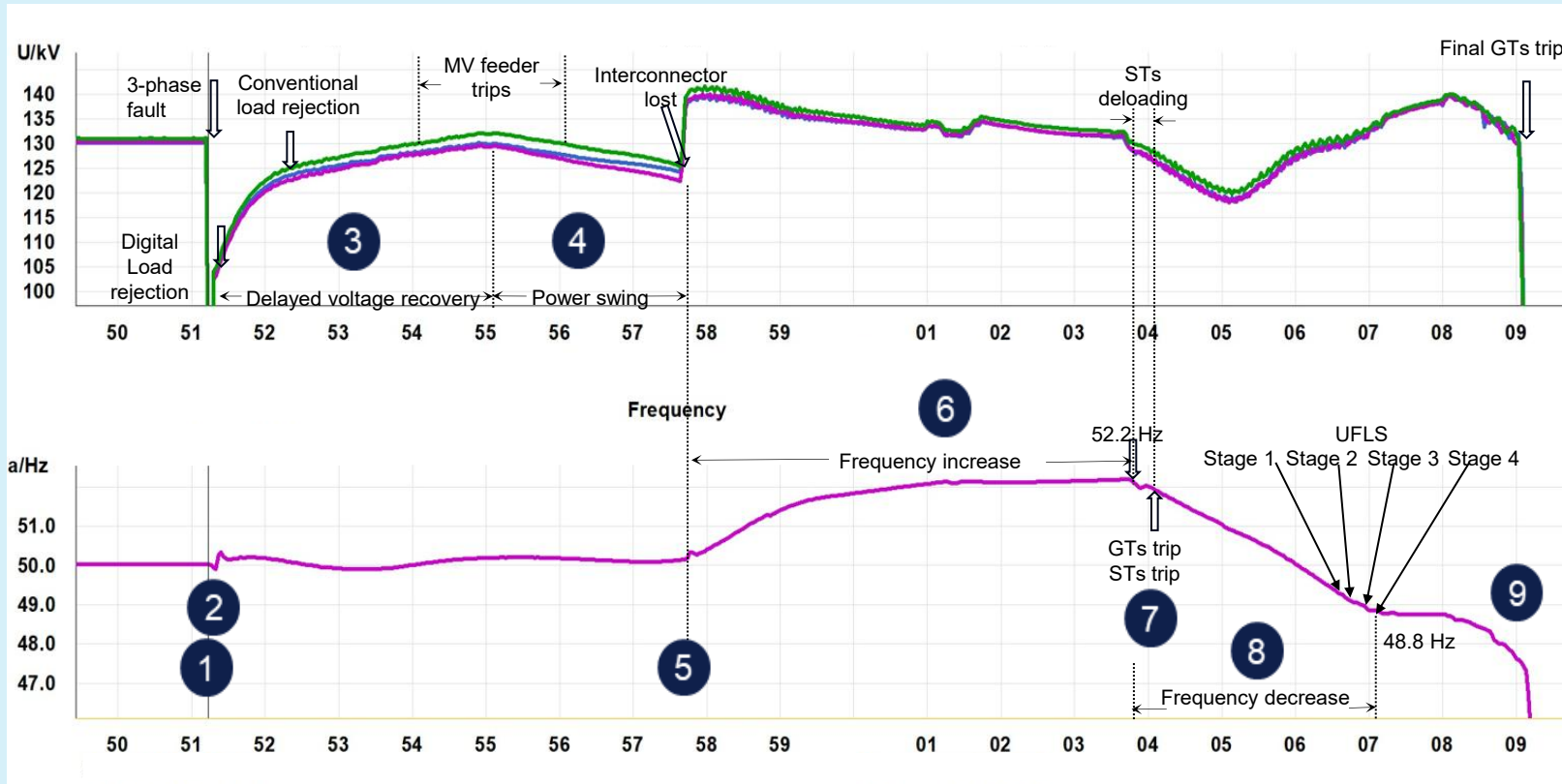
Incident beschrijving

Klein net, weinig inertie



Interconnector

Groot net met
veel inertie



Effecten

1. Drie fase kortsluiting in GIS (100% dip for 60 ms)
2. 95% Digitale belasting verlagings binnen 27 ms
3. Vertraagd spanningsherstel, veroorzaakt door overstroom in airconditioning units
4. Vermogensschommeling tussen systemen in via interconnector
5. Interconnector trip in Zone 1
6. Frequentie toename door opwek overschot (52.2 Hz)
7. GT en ST trip op overfrequentie
8. Sterke frequentie daling door tekort aan opwek
Onderfrequentie relais schakelen MS-verbindingen uit in 4 stadia
9. Laatste generatoren vallen uit bij 48.8 Hz

Grond oorzaken en effecten

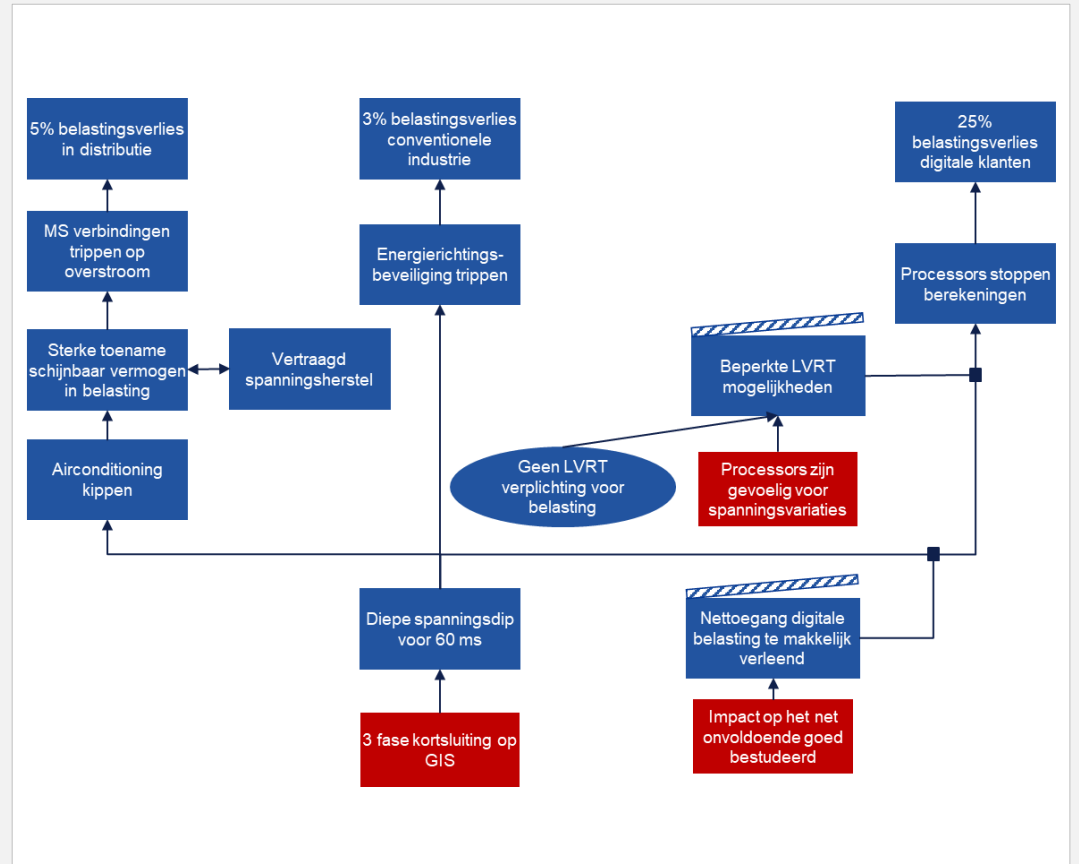
Drie-fasen kortsluiting leidt tot volledige black-out

GROND OORZAAK KORTSLUITING (Niet onderzocht door DNV)

- A** Kortsluiting in GIS-installatie op HS station
- B** Spanningsdip op station 60 ms 0 kV

BELASTINGSVERLIES IN HET NET

- 1** Digitale belasting: Processors resetten en stoppen na dip
- 2** Onterecht conventionele belasting trip op energierichting
- 3** Distributienetten trippen als gevolg van AC motor kippen



Grond oorzaken en effecten

Drie-fasen kortsluiting leidt tot volledige black-out

GROND OORZAAK KORTSLUITING (Niet onderzocht door DNV)

- A** Kortsluiting in GIS-installatie op HS station
- B** Spanningsdip op station 60 ms 0 kV

INTERCONNECTOR TRIPT Distantierelais zone 1

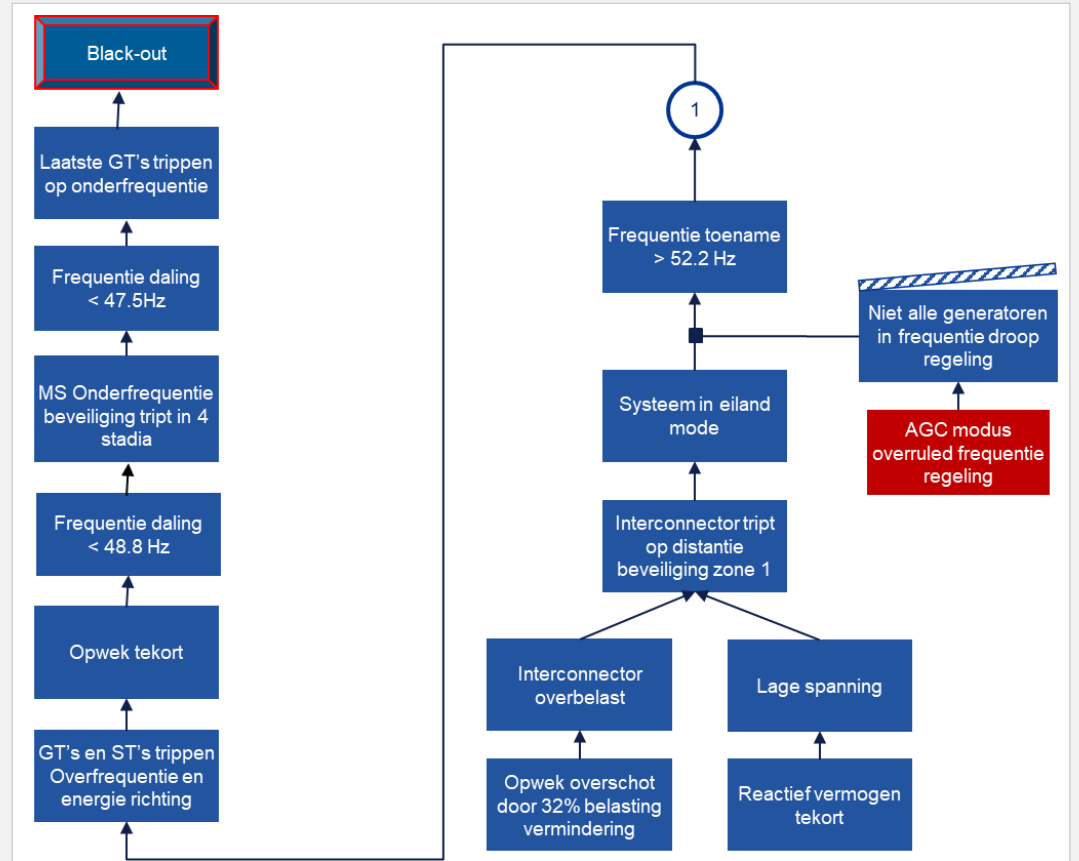
- a** Opwerk overschot: Inertie response buiten het net is vele malen groter
- b** Reactief vermogen tekort: Spanning erg lag
- c** Power swing blok niet geactiveerd in zone 1

BELASTINGSVERLIES IN HET NET

- 1** Digitale belasting: Processors resetten en stoppen na dip
- 2** Onterecht conventionele belasting trip op energierichting
- 3** Distributienetten trippen als gevolg van AC motor kippen

GENERATOR REACTIES NIET ADEQUAAT

- i** Droop control overruled door AGC, effectief op constant power output
- ii** Generatoren trippen op overfrequentie / reverse power
- iii** Frequentie daling te snel: Onderfrequentiebeveiliging onvoldoende



Invloed van grote zonneparken op het net

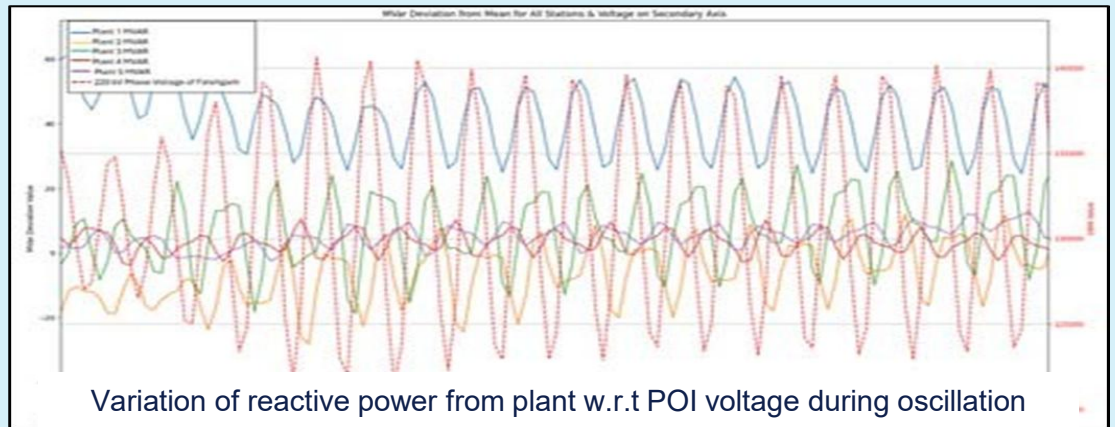
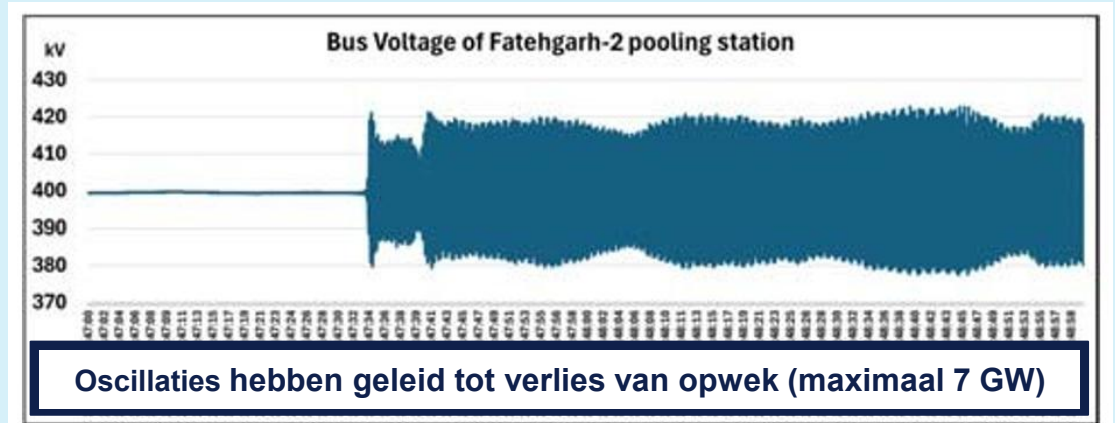
Lage kortsluitverhouding kan leiden tot spanningsinstabiliteit

Zwakke netten: Spanning gevoelig voor blindvermogen

- PV plants worden steeds groter, > 2.5 GW
- Van net volgend -> net vormend
- Inertie daalt
- Netspanning sterk afhankelijk van power plant controllers (PPC)
- Onderling reactief vermogensuitwisseling veroorzaakt sterke spanningsoscillaties

Tijdsvertraging in communicatie kan effect versterken

- PPC bepaalt wat de plant moet doen op basis van metingen (P, Q, f, V)
- Tijdsvertragingen in het system komen van
 - PQ-meter (snelle meters: 10-20 ms, trage meters: 250 – 1000 ms)
 - PPC (10 – 20 ms)
 - Communicatie tussen PPC en inverters (Polling: 200 – 1000 ms)
 - Modbus protocollen zijn relatief traag t.o.v. IEC 61850
- Tijdsvertraging resulteert in tegenwerking, negatieve demping V-oscillatie



Bron: Impact of Power Plant Controller on Voltage Oscillations in RE complex: Insights from Hardware-in-the-Loop Simulation, A Kumar et al., May 19th 2025, Research Square

Invloed van grote zonneparken op het net

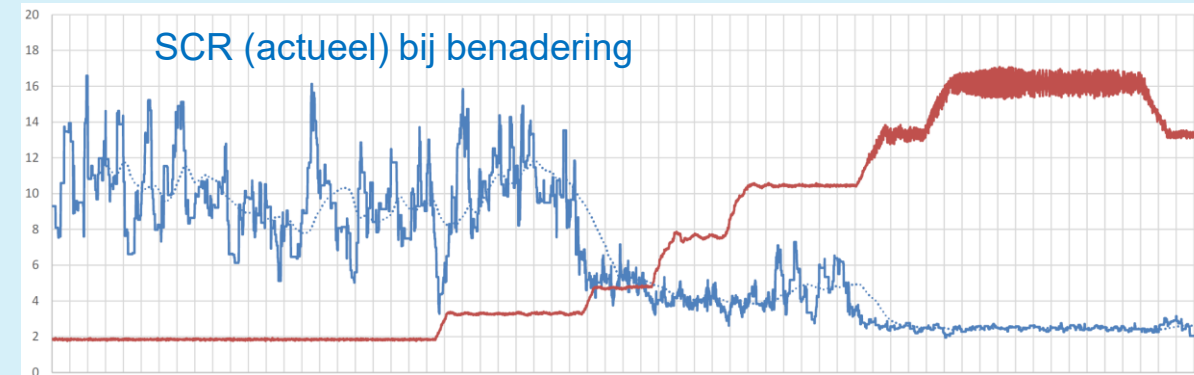
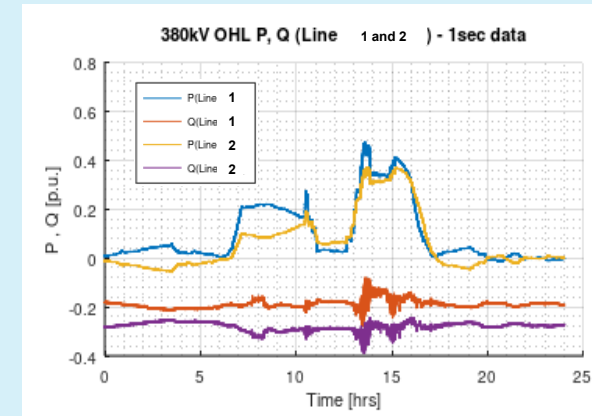
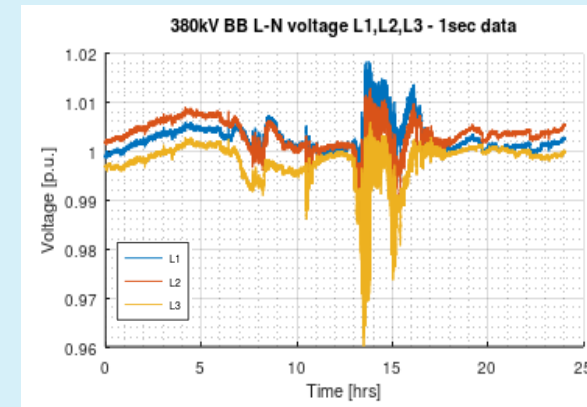
Lopend onderzoek DNV

Relatief zwak net: Spanning gevoelig voor blindvermogen

- Zwakke koppeling met het net,
 - Weinig verbindingen
 - Lange lijnen
- Kortsluitvermogensratio laag bij hoger vermogen opwekking
- Mogelijke interactie met STACOMS en SVC's

Observaties

- Verschillen tussen POI (Points of Interconnection)
 - Niveau van VAR
 - Richting VAR
 - Tijdvertraging tussen PQ-meter, PPC en lokale controllers
- Modellen zijn vaak black box modellen, details kunnen bepalend zijn
- Verschillen in fabrikant kan impact hebben



Active vermogen (Rood) vs kortsluitvermogensratio (Blauw)

Black-outs eiland-systemen

Ervaringen met netstoringen Caraïbisch gebied



Kenmerken eilandsystemen

- ✓ Netwerken zijn klein in omvang, zowel geografisch als in vermogen (<150 MW)
- ✓ Geen koppeling met netten op buureilanden
- ✓ Conventionele opwekking met dieselgeneratoren
- ✓ Gevoelig voor enkelvoudige storingen in opwekking of in het distributienet
- ✓ Hoog potentieel duurzame bronnen (wind, zon)
- ✓ Wens om volledig groen te gaan, zoveel mogelijk wind en zon in combinatie met batterijen



Combinatie duurzaam en dieselgeneratoren

INERTIE EN KORTSLUITVERMOGEN

Dieselgeneratoren

- Kleine inertie vergeleken met gas- en stoomturbines
- Tot 5 maal kleiner dan gas/stoomturbines

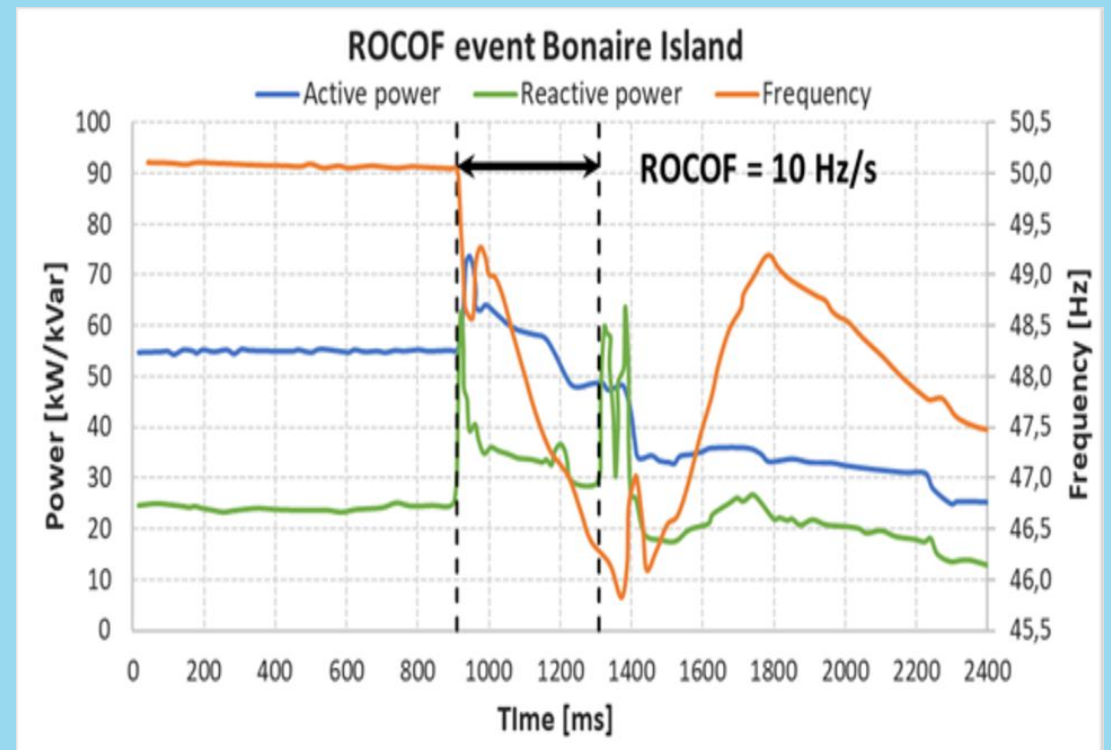
Gevolgen meer windenergie

- Minder dieselgeneratoren in bedrijf
- Windturbines geen natuurlijke inertie
- Systeeminertie nog verder omlaag

Gevolgen voor systeem

- Verstoringen vermogensbalans, snelle frequentieveranderingen
- Rate of Change of Frequency (ROCOF) $\gg 2$ Hz/sec
- Risico op trippen opwekkers, belastingafschakeling, blackout
- Lager kortsluitvermogen, risico niet werkende netbeveiligingen
- Lager kortsluitvermogen, invloed op gedrag wind- en zonneparken

VOORBEELD SNELLE/GROTE VERANDERING NETFREQUENTIE



Verstoringen vermogensbalans

A KORTSLUITINGEN, UITVAL, REGELINGEN

Kortsluitingen

- Kortsluitstroom in distributienet vraagt veel werkzaam vermogen
- In combinatie met netbelasting hoog totaal vermogen

Uitval opwekking of belasting

- Uitval dieselgenerator/windturbine evt. na kortsluiting
- Uitval transformator, evt. na kortsluiting
- Afschakeling netbelasting door onderfrequentie

Regelingen

- Regeling netfrequentie, verdeling werkzaam vermogen
- Regeling netspanning, verdeling blindvermogen
- Verdeling werkzaam vermogen: trip overbelasting of terugwatt
- Verdeling blindvermogen: trip onderbekrachtiging



Voorbeeld 1: 2-fasekortsluiting

KORTSLUITING, DIP WINDPARK, TRIP DIESELGENERATOREN

Kortsluiting

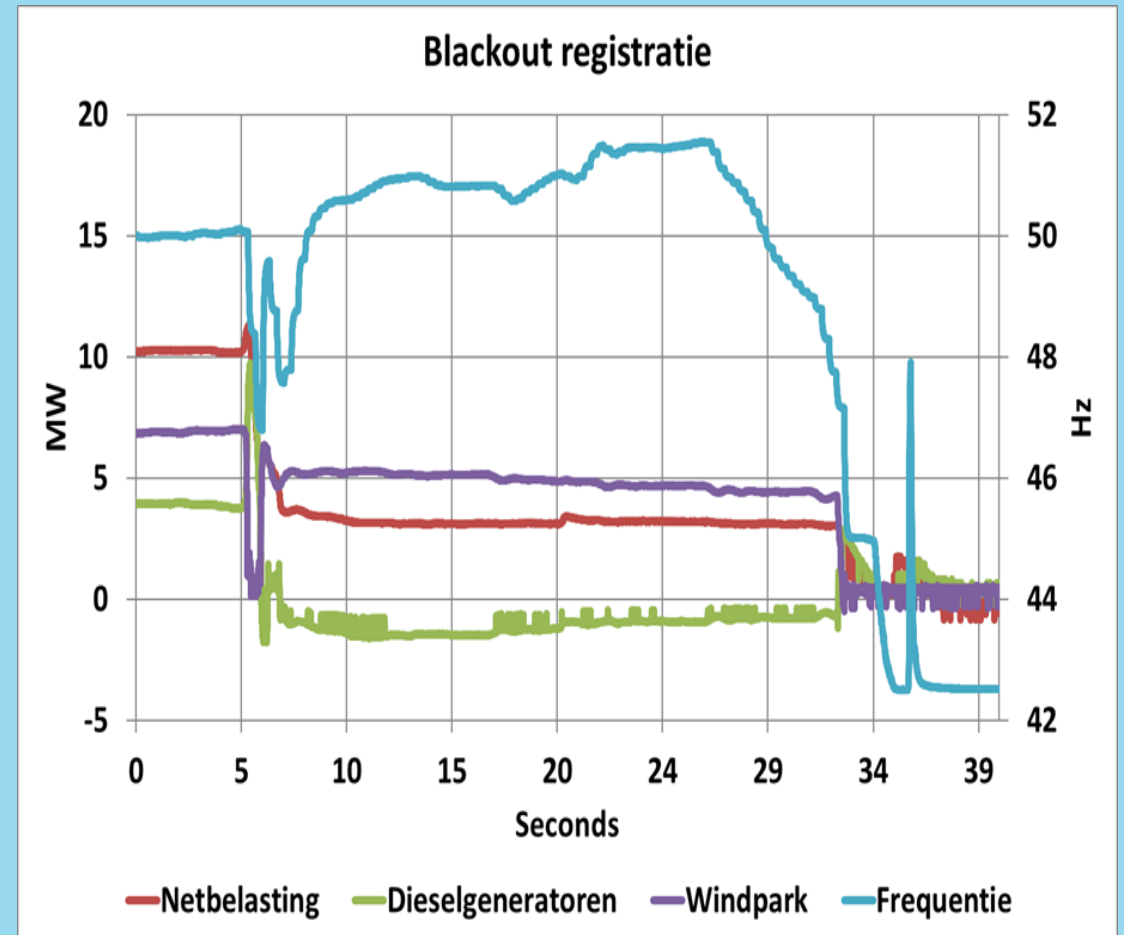
- 2- fase kortsluiting distributienet, duur 0.12 seconden
- Netbelasting van 10 naar 11 MW
- Windpark vermogen van 7 naar 0 MW
- Frequentie dip naar 46.5 Hz
- Dieselgeneratoren van 4 naar 11 MW

Na afschakeling kortsluiting

- Automatische belastingafschakeling, van 11 naar 4 MW
- Windpark van 0 naar 5 MW
- Dieselgeneratoren van 11 naar -1 MW. Terugwatt

Regeling frequentie en werkzaam vermogen

- Frequentie onregelmatig, loopt op naar 51.5 Hz
- Na 20 seconden daling frequentie, trip windturbine?
- Na 28 seconden frequentie onder 48 Hz: trip windpark
- Frequentie daalt verder, trip dieselgeneratoren en blackout



Voorbeeld 2: blindvermogensregeling

Windfluctuatie, omschakeling regeling, trip dieselgeneratoren

Windfluctuatie

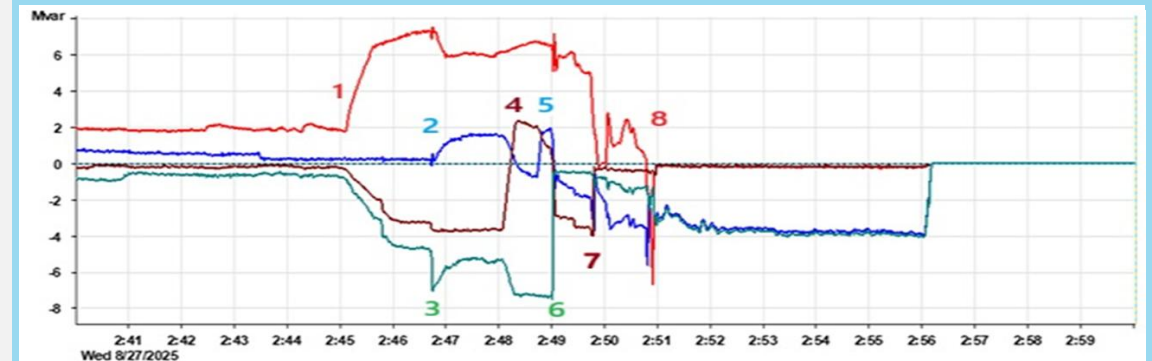
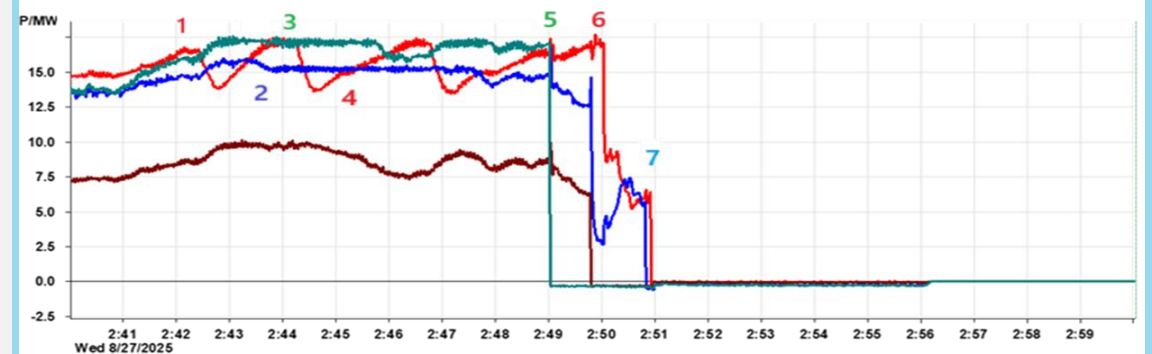
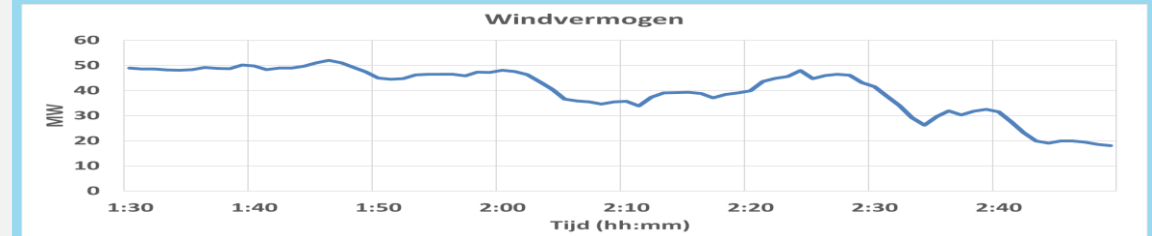
- Aandeel wind in totaal vermogen 40%
- Reductie windvermogen van 45 naar 20 MW in 12 minuten
- Dieselgeneratoren in frequentieregeling naar vol vermogen
- 1 dieselgenerator fluctuatie vermogen
- Omschakeling van frequentie- naar constant werkzaam vermogen

Na omschakeling van frequentie- naar constant vermogen

- Automatische omschakeling naar $\cos \phi$ regeling
- Verkeerd setpoint $\cos \phi$ regeling: blindvermogen van 2 naar 7 Mvar
- Compensatie andere dieselgeneratoren: opname blindvermogen

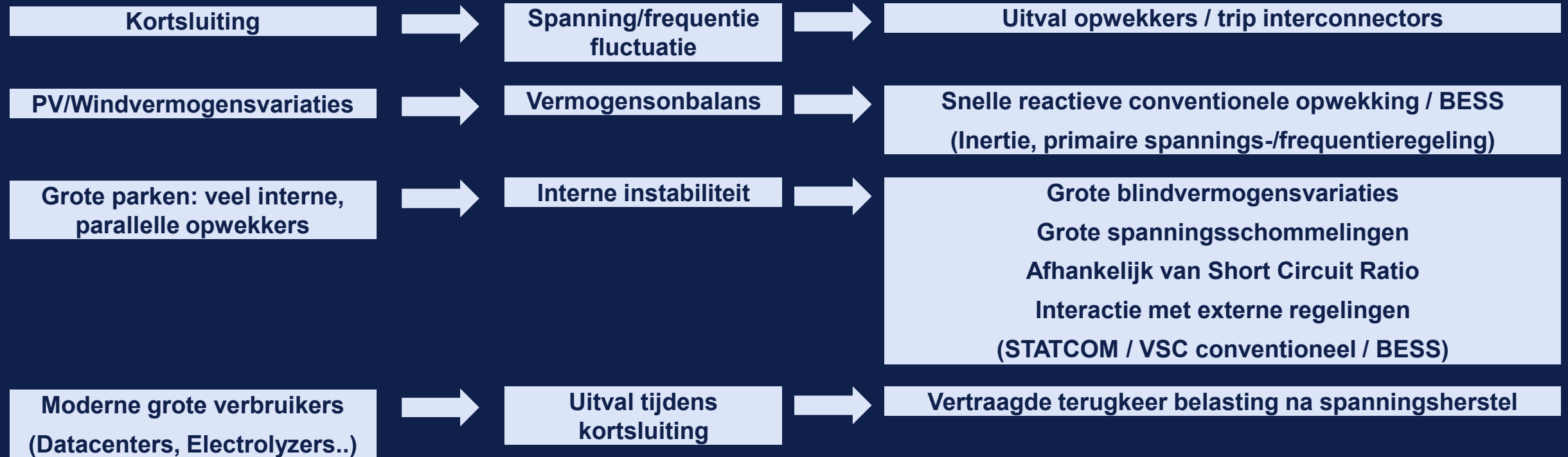
Reacties spannings- en blindvermogensregelingen

- Dieselgeneratoren andere centrales nemen ook blindvermogen op
- Daar transformatoren spanningsregeling, verlaging generatorspanning
- Minder blindvermogensopname, compensatie door anderen
- Dieselgeneratoren trippen op onderbekrachtiging
- Frequentie daalt, automatische belastingafschakeling
- Frequentie < 47 Hz, trip windparken en resterende dieselgeneratoren



Wat leren we ervan

Black-outs ontstaan meestal door een cascade-effect:



- ✓ Niet alleen duurzame opwekking, maar ook moderne belastingen dragen bij aan instabiliteit
- ✓ Onderzoek naar dynamisch gedrag (dynamische modelsimulaties) op systeemniveau is cruciaal
- ✓ Stel ook eisen aan Fault-Ride-Through gedrag van belastingen in aanvulling op eisen voor opwekkers
- ✓ Analyseer het gedrag van opwekkers en belasting bij verstoringen in het net

Hartelijk dank voor uw belangstelling

Mischa Vermeer

Email: mischa.vermeer@dnv.com

Tel: +31 6 4671 3654

Wim Kuijpers

Email: wim.kuijpers@dnv.com

Tel: +31 6 1506 3590

www.dnv.com

