



# **BLACKOUT-VORSORGE, NETZWIEDERAUFBAU, FREQUENZPLAN**

**Dipl.-Ing. Milorad Markovic**  
Grid Security  
**Wien, 5.11.2012**

# Blackout-Vorsorge, Netzwiederaufbau, Frequenzplan

Definition Großstörung, Blackout

Teil 1 Entstehung von Blackouts

Teil 2 Vorbeugende Maßnahmen

Teil 3 Gegenmaßnahmen

Teil 4 Netzwiederaufbau

# Definition einer Großstörung

Definition lt. TOR Teil A:

- Eine **Großstörung** liegt vor bei **Spannungslosigkeit** („**Blackout**“)
  - im gesamten *Übertragungsnetz* eines *Netzbetreibers* oder...
  - in mehreren *Netzen* benachbarter *Netzbetreiber* oder
  - in Netzteilen eines oder mehrerer benachbarter *Übertragungsnetze* oder
  - in *Verteilernetzen*.
- In einem **Großstörungskonzept** werden notwendige Maßnahmen beschrieben, um die Ausweitung von Störungen zu vermeiden und ihre Auswirkungen zu begrenzen.
- **Netzwiederaufbaukonzept**

# Blackout



04.11.2006





## HISTORICAL POWER OUTAGES

**Nov. 9, 1965:** The Great Blackout shakes Americans' faith in the power system. A faulty substation relay darkens New York City and thousands of square miles of the U.S. northeast for about 14 hours. Power is out for 25 million people. It inspires the popular film, "Where Were You When the Lights Went Out?"

**March 1989:** A solar geomagnetic storm knocks out power to 6 million people in the Canadian province of Quebec and parts of the U.S. for nine hours.

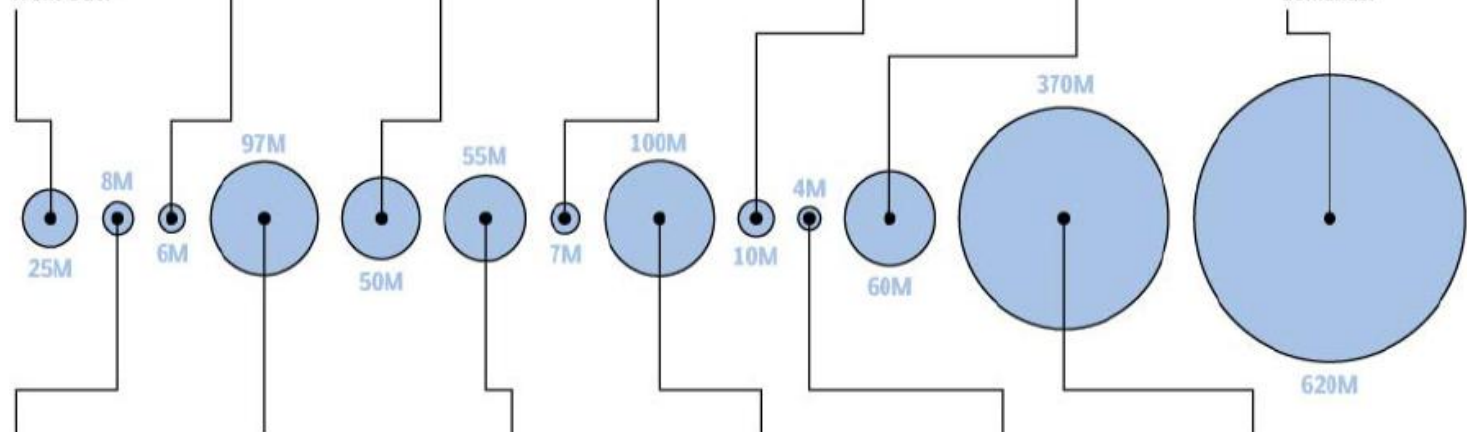
**Aug. 14, 2003:** The worst U.S. blackout. Power line problems in the Midwest trigger a cascade of breakdowns that cut power to 50 million people in eight states and Canada, some for more than a day.

**July 12, 2004:** Heavy use of air conditioners and other factors are blamed for blackouts affecting at least 7 million people in Greece just a month before the summer Olympic Games.

**November 2006:** A German power company switches off a high voltage line over a river to let a cruise ship pass. It triggers outages for 10 million people in Germany, France, Italy and Spain.

**Nov. 10, 2009:** Storms near the Itaipu hydroelectric dam on the Paraguay-Brazil border are tentatively blamed for outages that cut power to as many as 60 million people in Brazil for two to three hours. The entire nation of Paraguay, population 7 million, is also briefly blacked out.

**July 31, 2012:** Three power grids across half of India fail in what authorities call overdrawing of the system, leaving a record 620 million people without power for several hours and raising serious concerns about whether the country's outdated infrastructure can meet soaring demands.



**July 13, 1977:** A lightning bolt knocks out electricity to about 8 million people in New York City. Power isn't fully restored until 25 hours later after widespread looting.

**March 11, 1999:** Lightning hits a power substation in Brazil's Sao Paulo state, leaving 97 million people without power for as long as five hours. An official says it is linked to transmission lines from the Itaipu dam.

**Sept. 28, 2003:** A short in a power line in Switzerland leads to blackouts affecting 95% of Italy. Some 55 million people are without power for as long as 18 hours.

**Aug. 18, 2005:** An imbalanced power grid kicks power plants offline in Indonesia leaving almost 100 million people in the dark, many for more than five hours.

**January 2008:** Winter storms cause a nearly two-week blackout to about 4 million people around the central Chinese city of Chenzhou. Eleven technicians reportedly die trying to restore power.

**July 30, 2012:** India's northern electricity grid fails for much of the day, leaving 370 million people without power.

Die Anzahl der von einem Blackout betroffenen Menschen steigt mit den Jahren. Bei dem Blackout in Indien waren fast 10% der Weltbevölkerung ohne Strom.

# Großstörungen

## Teil 1 Entstehung

Teil 2 Vorbeugende Maßnahmen

Teil 3 Gegenmaßnahmen

Teil 4 Netzwiederaufbau

New York USA Lightning Storm  
June 2010



# Entstehung von Großstörungen

- Naturkatastrophen
- Auch „harmlose“ Störungen (z.B. Ausfall einer Leitung) können zu großen Auswirkungen führen, wenn **kritische Betriebsbedingungen** herrschen, wie etwa
  - (n-1)-Sicherheit nicht eingehalten
  - große Entfernungen zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsschwerpunkten
  - hohe Belastung schwacher Leitungsquerschnitte
  - gleichzeitiger Ausfall von Erzeugungseinheiten
  - erhöhter Blindleistungsbezug von Verteilnetzen durch automatische Spannungsregelung
- Drei Mechanismen können dann zum Blackout führen:
  - ❖ Kaskadenausfall durch Überlast
  - ❖ Spannungskollaps
  - ❖ Stabilitätsverlust



# Kaskadenauslösungen

- Bei Ausfall eines hoch belasteten Netzelements verlagert sich der Lastfluss auf parallele Zweige im Netz; werden diese so hoch belastet, dass sie durch ihre Schutzrichtungen abgeschaltet werden (oder dass sie von Hand abgeschaltet werden müssen, um ihre Zerstörung zu verhindern) so **läuft die Kaskade weiter** zum nächsten Zweig!
- Dabei sinkt auch die Netzspannung weiter ab, es kommt dadurch zu Ausfällen von Generatoren und bei sehr tiefen Spannungen zu Leitungsauslösungen durch Distanzschutz.
- Das Netz zerfällt in spannungslose Teile und eventuell „lebensfähige Inseln“, sofern geeignete Kraftwerke in Betrieb bleiben.



# Spannungskollaps

- Bei **sinkender Netzspannung wegen Leistungsmangel** (Wirk- und/oder Blindleistung) versuchen, die automatischen Spannungsregler der Transformatoren die Nennspannung für die Verbraucher zu halten; dabei wird immer mehr Blindleistung aus dem Übertragungsnetz bezogen, wodurch dort die Spannung weiter absinkt!
- Die Blindleistungserzeugung von Kondensatoren und schwach belasteten Hochspannungsleitungen geht mit dem Quadrat der Spannung zurück! Generatoren erreichen die Grenzen des Betriebsdiagramms und können die Spannung nicht weiter stützen.
- Es kommt zur Abschaltung von Generatoren und Leitungen durch ihre Schutzeinrichtungen und zum Netzzusammenbruch.

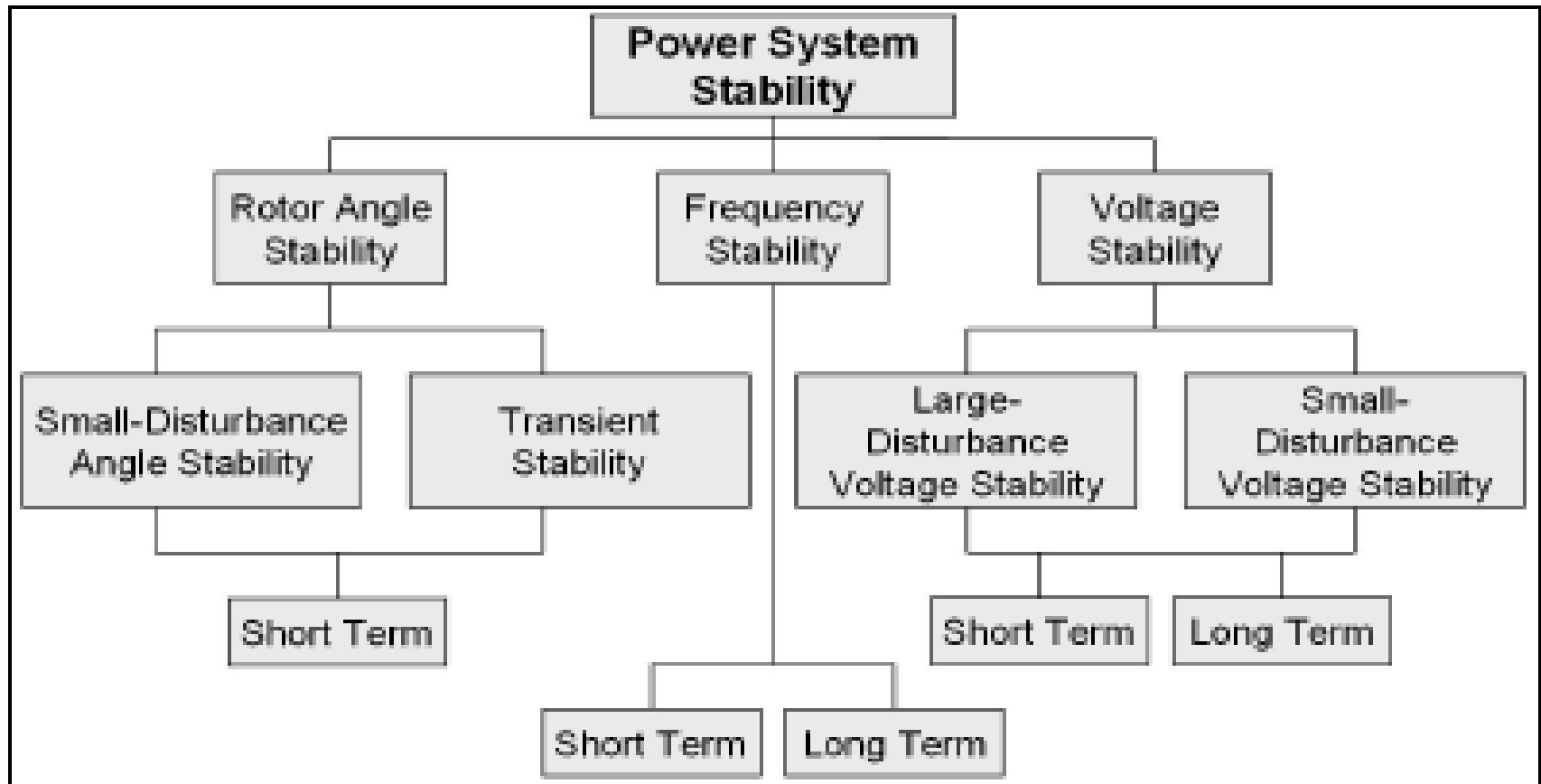


FIGURE 1: CLASSIFICATION OF POWER SYSTEM STABILITY

Quelle: ENTSO-E RG CE OH 2<sup>nd</sup> release – Policy 5 Appendix

# Großstörungen

Teil 1 Entstehung

Teil 2 Vorbeugende Maßnahmen

**China Floods  
June 2010**

Teil 3 Gegenmaßnahmen

Teil 4 Netzwiederaufbau



# Vorsorgemaßnahmen

- Längerfristig
  - Netzplanung: Leitungsbau, Kraftwerksbau, Verbrauchsoptimierung
- Mittelfristig
  - Trasseninstandhaltung, Seiluntersuchungen
  - Anlagenredundanzen und Anlageninstandhaltung
  - Phasenschieber, Blindleistungskompensation
  - Krisenmanagement, Objekt- und Brandschutzkonzept, IT-Security
  - Netzwiederaufbaukonzepte, Versuche, Schulung, Training, Übung
  - Verbandsarbeit (Versorgungssicherheit) national und international
- Kurzfristig
  - **Engpassmanagement**
  - RG CE Datenaustausch Electronic Highway, Kraftwerksdaten, Telekonferenzen, Kapazitätsallokationen
  - Netzmonitoring (WAMS)
- Gegenmaßnahmen (automatisch)
  - **Frequenz- und Spannungsabhängige Maßnahmen (TOR Teil E)**
  - Netzschutzkonzept

# Lastflüsse im Übertragungsnetz

- Seit der Liberalisierung werden die Lastflüsse vorwiegend durch die **Marktteilnehmer** (Erzeuger, Händler, Verbraucher) bestimmt! Der Übertragungsnetzbetreiber darf in die Marktmechanismen nur eingreifen, wenn die Versorgungssicherheit gefährdet wird.
- Aus Sicherheitsgründen angeordnete Abweichungen (sog. **Engpassmanagement**) müssen den Erzeugern abgegolten und über den Netztarif finanziert werden.
- Auch die **Spannungshaltung** im Netz wird durch den freien Markt erschwert: bei niedrigen Börsenpreisen werden alle Kraftwerke abgestellt (bis auf die reine Laufwasserkraft), d.h. diese Generatoren stehen dann auch als Blindleistungserzeuger oder -verbraucher nicht zur Verfügung! Der Netzbetreiber kann den Blindleistungshaushalt nur mehr mit Drosseln und Kondensatoren beeinflussen bzw. mittels Transformatorregelung zwischen den Spannungsebenen verschieben.



## (n-1)-Prinzip

- Das **(n-1)-Prinzip**: Der Ausfall eines beliebigen Netzelementes oder der größten Erzeugungseinheit darf zu keinen Folgeauslösungen (Kaskadeneffekt) führen!
- Je nach Betriebserfahrung (Störungsstatistik) sind bei entsprechend hoher Eintrittswahrscheinlichkeit auch **Mehrfachausfälle**, wie z.B. Ausfälle von Sammelschienen oder von Doppelleitungen zu berücksichtigen!
- (n-1) in der Betriebsplanung: Fahrpläne, Austauschprogramme, Abschaltkoordinierung, Day Ahead Congestion Forecast (DACF), TSO Security Cooperation (TSC), Telekonferenzen
- (n-1) im Real Time-Betrieb: Gegenmaßnahmen bei (n-1)-Verletzungen:  
=> Engpassmanagement

# Engpassmanagement (EPM)

- Zur Aufrechterhaltung der (n-1)-Sicherheit muss in den Netzbetrieb bzw. in den Markt eingegriffen werden;  
soweit möglich, wählt man die kostengünstigste Variante!

## Netztechnische Maßnahmen:

- Sonderschaltzustände, z.B. Betrieb mit getrennten Sammelschienen
- Regelung von Phasenschiebertransformatoren oder Schrägregelung bei Netzkuppeltransformatoren

## Marktbezogenen Maßnahmen:

- kostenpflichtige Änderung des Kraftwerkseinsatzes
- kostenpflichtiges Einsatzverbot für Speicherpumpen
- Reduktion der Austauschprogramme mit dem Ausland

# Großstörungen

Teil 1 Entstehung

Oklahoma USA Ice Storm  
January 2010

Teil 2 Vorbeugende Maßnahmen

Teil 3 Gegenmaßnahmen

Teil 4 Netzwiederaufbau



# Gegenmaßnahmen

Zur Vermeidung eines großräumigen Blackouts bzw. zur Verhinderung einer Störungsausweitung auf andere Netze werden Notmaßnahmen ergriffen (siehe dazu TOR Teil E).

- **Frequenzabhängige Maßnahmen**

- bei Unterfrequenz ( $f < 49,8\text{Hz}$ )
- bei Überfrequenz ( $f > 50,2\text{Hz}$ )

Frequenzabweichungen von mehr als 200mHz können mit großer Wahrscheinlichkeit erst dann auftreten, wenn das kontinentaleuropäische Synchrongebiet (ENTSO-E RG CE-Netz) bereits in Teilnetze zerfallen ist!

- **Spannungsabhängige Maßnahmen**

- bei Unterspannung
- bei Überspannung

# Maßnahmen bei Unterfrequenz

- **bei  $f < 49,8\text{Hz}$**

Aktivierung der Primärregelreserven (Leistungserhöhung)

Abstellen von Speicherpumpen

Anfahren von Generatoren

- **bei  $f \leq 49,0\text{Hz}$  bis  $f = 48,0\text{Hz}$**

Frequenzabhängige Lastanpassung in Verteilnetzen; stufenweiser Lastabwurf, der bei  $48,0\text{Hz}$  mindestens 50% der Netzhöchstlast erreicht (in Österreich derzeit 60%)

- **bei  $f \leq 47,5\text{Hz}$**

Generatoren dürfen sich vom Netz trennen

- **bei  $f \leq 45,0\text{Hz}$**

Die letzten noch in Betrieb befindlichen Generatoren werden abgeschaltet (50Hz

$\pm 10\%$  nur kurzzeitig zulässig)



# Maßnahmen bei Überfrequenz

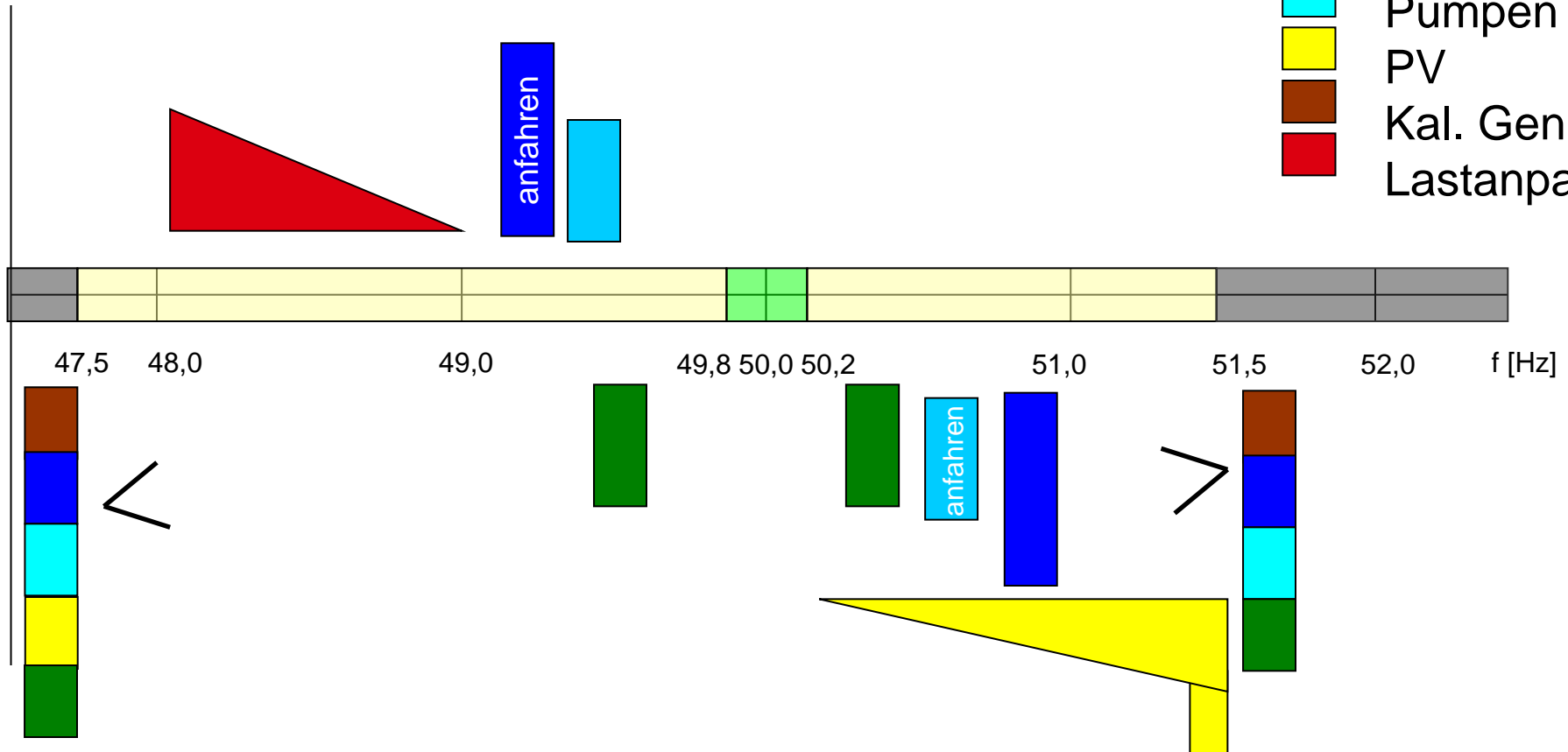
- **bei  $f > 50,2\text{Hz}$**   
Aktivierung der Primärregelreserven (Leistungsreduktion)  
Abstellen von Generatoren  
Anfahren von Speicherpumpen  
Der automatische Wiederanlauf ausgefallener (dezentraler) Erzeuger ist möglichst zu verhindern!
- **bei  $f \geq 51,5\text{Hz}$**   
Generatoren dürfen sich vom Netz trennen
- **bei  $f \geq 55,0\text{Hz}$**   
Die letzten noch in Betrieb befindlichen Generatoren werden abgeschaltet ( $50\text{Hz} \pm 10\%$  nur kurzzeitig zulässig)

# Frequenzplan

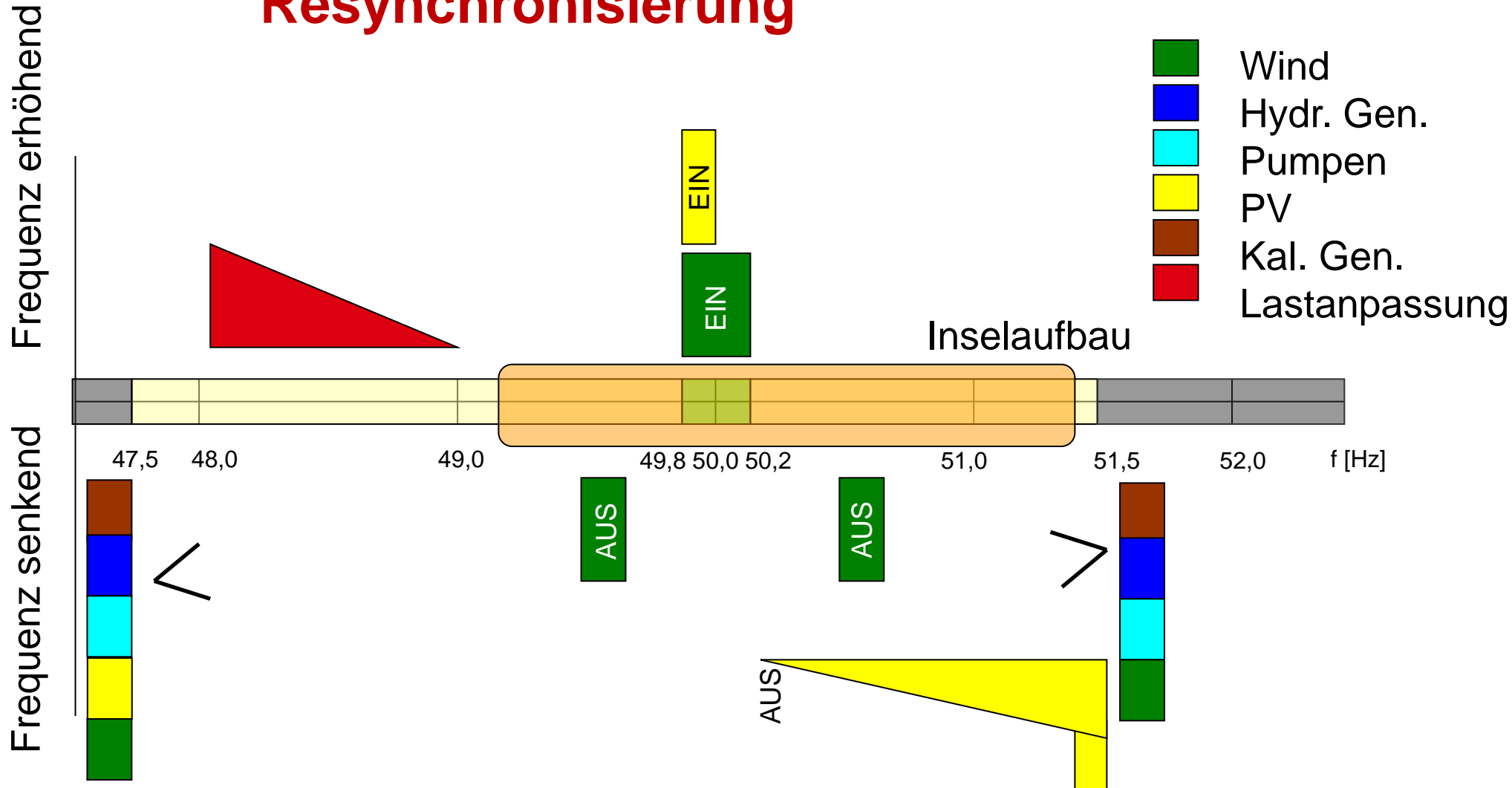
Frequenz erhöhend

Frequenz senkend

- Wind
- Hydr. Gen.
- Pumpen
- PV
- Kal. Gen.
- Lastanpassung



# Netzwiederaufbau – automatische Resynchronisierung



# Maßnahmen bei Unterspannung [1]

Die angeführten Grenzwerte sind nicht auf die Nennspannung, sondern auf die **örtlich übliche Betriebsspannung U** zu beziehen!

- **bei  $U_1 < 95\% U$** 
  - Zuschaltung von Kondensatorbatterien und/oder leerlaufenden Leitungen
  - Abschalten von Kompensationsdrosseln
  - Anfahren von Generatoren, eventuell auch nur zur Blindleistungserzeugung (sog. Phasenschieberbetrieb)
  - Umschaltung der Generator-Spannungsregler von  $\cos \varphi$  – Regelung auf Spannungsregelung

# Maßnahmen bei Unterspannung [2]

- **bei  $U_2 < 90\% U$** 
  - vorbeugende Blockierung von Trafo-Stufenreglern (z.B. von Hand durch einen Sammelbefehl im Netzleitsystem oder durch „intelligente“ Spannungsregler)  
*und/oder*
  - automatische spannungsabhängige Blockade der Trafo-Stufenregler

Durch diese Maßnahme werden die Verbraucher mit abgesenkter Spannung versorgt, der Wirk- und Blindleistungsverbrauch der angeschlossenen Netze sinkt und das Übertragungsnetz wird entlastet.

Bei Mittelspannungsnetzen, welche auch zu Starklastzeiten kapazitive Blindleistung beziehen (z.B. Netze mit überwiegenden Kabelanteilen), ist diese Methode nicht anzuwenden.



## Maßnahmen bei Unterspannung [3]

- **bei  $U_3 < 85\% U$** 
  - Spannungsabhängige Lastanpassung im Mittelspannungsnetz, z.B. durch verzögerte Unterspannungsauslösung von Transformatoren 110(220)kV/Mittelspannung oder von ausgewählten Kundenabzweigen. Das Messkriterium ist von der Oberspannungsseite abzunehmen!

Bei Mittelspannungsnetzen, welche auch zu Starklastzeiten kapazitive Blindleistung beziehen (z.B. Netze mit überwiegenden Kabelanteilen), ist diese Methode nicht anzuwenden.

Durch diese Maßnahme werden jene Netzteile abgeschaltet, in denen die Spannungsverhältnisse am kritischsten sind.

# Maßnahmen bei Überspannung

- **spätestens bei  $U_4$  = höchstzulässige Betriebsspannung**
  - Abschalten von Kondensatorbatterien und/oder leerlaufenden Leitungen
  - Zuschalten von Kompensationsdrosseln
  - Blockieren der  $\cos \varphi$  - Regler von Generatoren
  - Zuschalten von Pumpen bzw. Übergang von Generatorbetrieb auf Pumpbetrieb

Der automatische Wiederanlauf ausgefallener (dezentraler) Erzeuger ist möglichst zu verhindern!

# Gegenmaßnahmen helfen

L 127 MW  
 P 297 MW  
 G 650 MW  
 Σ 1074 MW

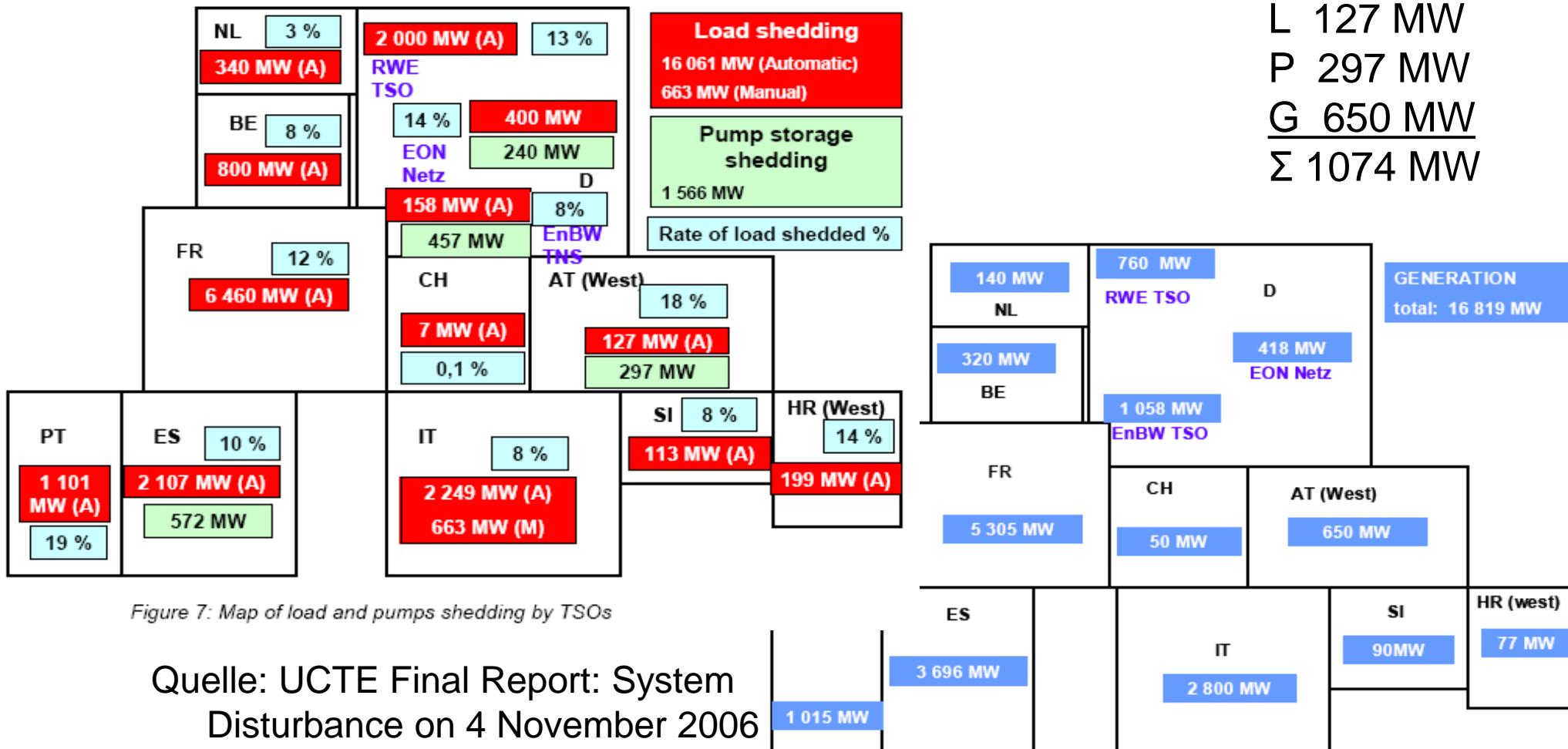


Figure 7: Map of load and pumps shedding by TSOs

Quelle: UCTE Final Report: System Disturbance on 4 November 2006

Figure 9: Generation units started by TSOs

# Großstörungen

## Russian Forests Fires August 2010

Teil 1 Entstehung

Teil 2 Vorbeugende Maßnahmen

Teil 3 Gegenmaßnahmen

Teil 4 Netzwiederaufbau



# Ausrufung der Großstörung

Der Regelzonenführer (RZF) alarmiert die betroffenen Netzpartner und informiert diese über...

- das Ausmaß des Blackouts,
- die gewählte Strategie für den Wiederaufbau,
- die voraussichtliche Dauer bis zur Wiederversorgung.

Mehrere in- und ausländische Netzpartner erhalten gesammelte Informationen über sogenannte „Awareness Systeme“.

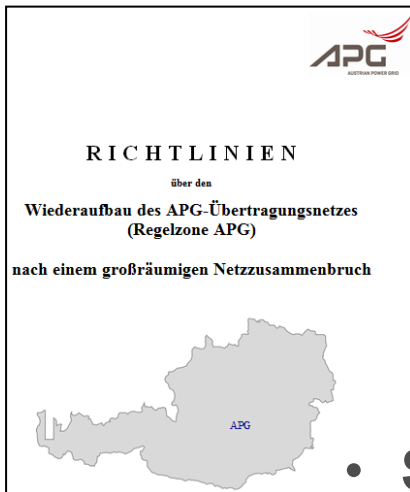
Mit Ausrufung der Großstörung übernimmt der RZF die Verfügungsgewalt über den Kraftwerkseinsatz; alle Fahrpläne treten außer Kraft. Entstehende Tarif- und Kostenprobleme werden später verhandelt.

# Netzwiederaufbau nach Blackout

Es sind zwei unterschiedliche Strategien möglich:

- **Weiterschalten der Spannung** („Top down“)

- ein „gesundes“ Nachbarnetz kann Spannung auf einer Kuppelleitung zur Verfügung stellen
- Leistungsgrenzen für die Kuppelleitung sind zu vereinbaren
- eigenes Netz schrittweise bespannen; Kraftwerke und Verbraucher zuschalten



- **Schwarzstart und Inselbetrieb** („Bottom up“)

- schwarzstartfähige Kraftwerke sind vertraglich vereinbart
- Lastzuschaltungen dürfen nur in kleinen Blöcken erfolgen
- Erweiterung der Insel mit Kraftwerken und Netzlasten

# Weiterschalten der Spannung

- Herstellung des „Ausgangsschaltzustands“ laut Konzept
- Absprache mit dem Operator des „gesunden“ Netzes bezüglich eventueller Leistungsbeschränkungen
- Bespannen vorbereiteter Leitungszüge (eventuell auch mit im Stich angeschlossenen Transformatoren)
- Schließen von Ringnetzen
- Zuschaltung definierter Lastblöcke (z.B. < 50MW), alternierend mit der Inbetriebnahme weiterer Kraftwerke

Problem: Spannungshaltung bei Zuschaltung längerer  
380-kV-Leitungen => Gefahr von Überspannungen!

Abhilfe: Einsatz von Kompensationsdrosseln und/oder größeren Generatoren zur  
Spannungsstabilisierung



# Schwarzstart und Inselaufbau

- Weitere Auftrennung der Verteilnetze in noch kleinere Lastblöcke (z.B. < 20MW)
- Anfahren eines schwarzstart- und inselaufbaufähigen Generators, welcher vorerst auch für die Frequenzregelung verantwortlich ist
- Zuschaltung einer kleinen Netzlast
- Weiterschalten der Spannung zu anderen Kraftwerken und Lastblöcken

Problem: Bei zu großen Sprüngen bei Netzlasten oder Einspeiseleistungen kann das Inselnetz durch Unter- bzw. Überfrequenzauslösungen wieder zusammenbrechen!

Abhilfe: laufende Beobachtung der Frequenz, bei sinkender Tendenz Lastaufnahme sofort stoppen

# Synchronisieren von Inselnetzen

- Vor dem Kuppeln ist festzulegen:
  - mit welchem Leistungsschalter wird synchronisiert?
  - wer regelt Spannungs- und Frequenzdifferenz um die Synchronisierbedingungen zu erfüllen?
  - wer führt das Gesamtnetz nach dem Kuppeln?
- Größere Inselnetze dürfen nur bei sehr geringem Schlupf synchronisiert werden (z.B.  $< 150\text{mHz}$ , das bedeutet einen Zeigerumlauf in ca. 7s), sonst kann es sofort zur Schutzauslösung der Kuppelleitung kommen
- Gelingt die Synchronisierung auch nach mehreren Versuchen nicht, so ist das kleinere Inselnetz spannungslos zu schalten und von der größeren Insel her neu aufzubauen

# Ende der Großstörung

- Der Zeitpunkt ist definiert durch:
  - Übertragungsnetz weitgehend wiederhergestellt
  - Endkunden zu fast 100% wieder versorgt
- Der RZF, der die Großstörung ausgerufen hat, informiert die Marktteilnehmer über deren Ende
- Wiederaufnahme der Geschäfte mit ev. provisorischen Fahrplänen (Problem: sprunghafte Lastflussänderung)
- Erst viel später erfolgt das Clearing der außerplanmäßig gelieferten Energiemengen

# Schulung, Training, Tests

- **Notfallmaßnahmen und Netzwiederaufbaukonzepte** werden periodisch mit den System Operatoren und mit den Netzpartnern auf Aktualität überprüft
- **System Operatoren und Schaltberechtigte** werden regelmäßig mittels Tests an einem Netzsimulator geschult; dabei wird sowohl die Anwendung von Gegenmaßnahmen, wie auch der eigentliche Netzwiederaufbau trainiert
- Die **vertraglich vereinbarten Eigenschaften der Kraftwerke** werden periodisch scharf überprüft:
  - Schwarzstartfähigkeit
  - Inselbetriebsfähigkeit
  - Inselaufbau

**Danke für Ihre Aufmerksamkeit. 😊**

Dipl.-Ing. Milorad Markovic  
Austrian Power Grid AG

Wagramer Straße 19, 1220 Wien

Tel. +43 0 50320 56360

Mail. [milorad.markovic@apg.at](mailto:milorad.markovic@apg.at)