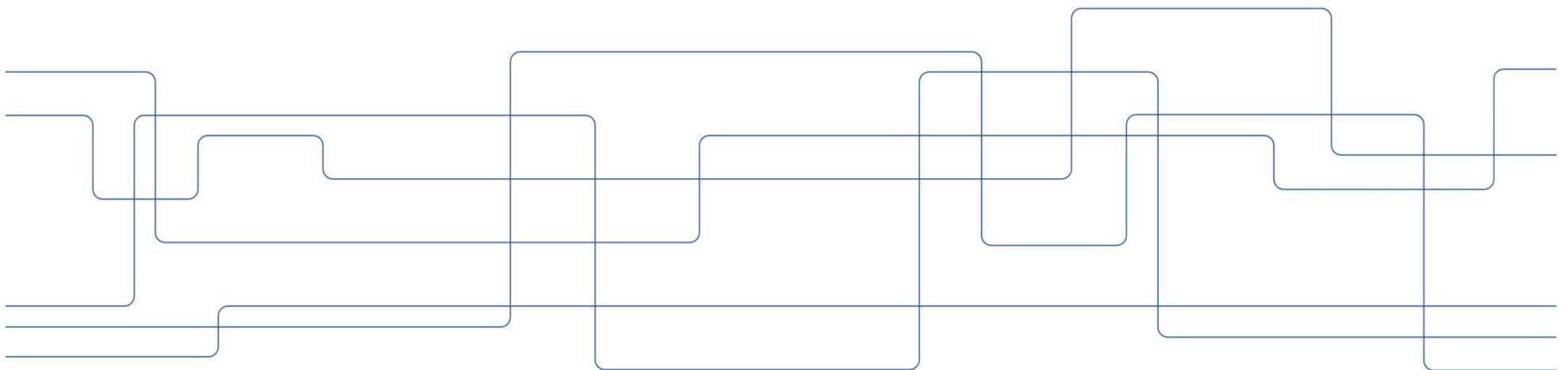




# Elsystemet – forskning och utveckling

Lars Nordström, [larsno@kth.se](mailto:larsno@kth.se)

Elkraftteknik





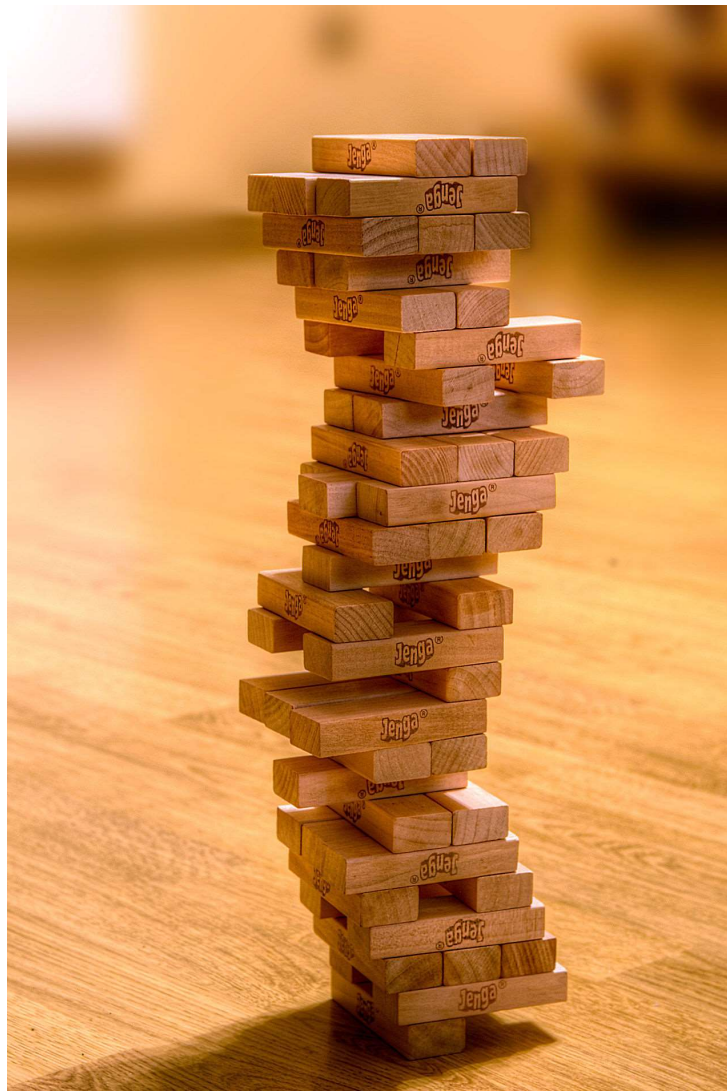
# Dagens predikotext

Något om stabilitet - idag

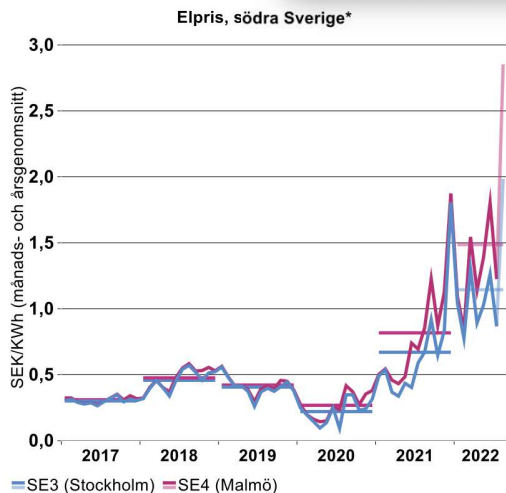
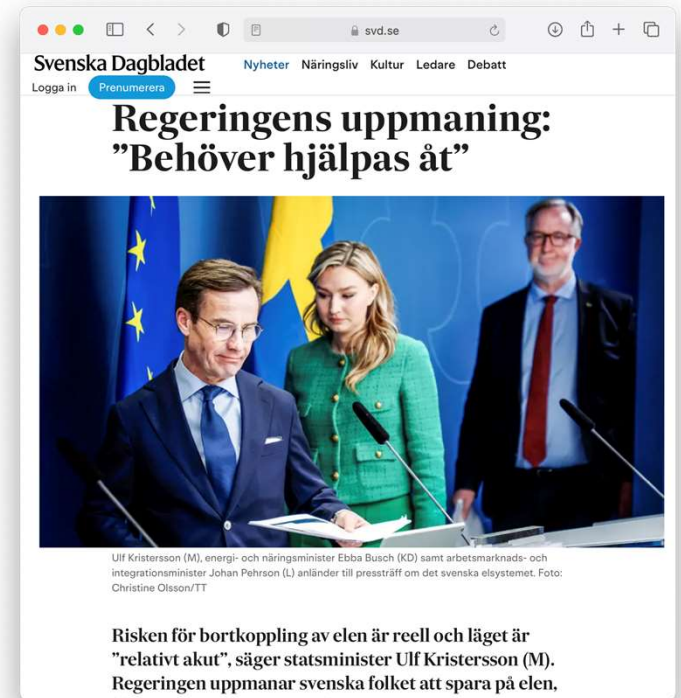
Något om stabilitet - framöver

Några exempel på forskning på KTH

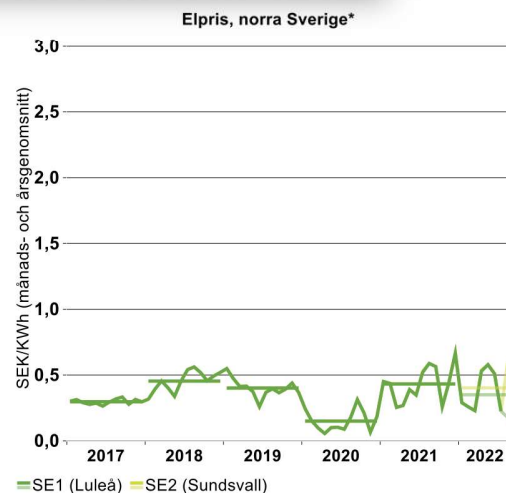
# Stabilitet - magkänslan



# Stabilitet – i praktiken



Källa: Nordpool



Källa: Nordpool

\* Månadsprognosen = genomsnittet till och med 25:e augusti för hela månaden, årsprognosen = genomsnittet hittills under 2022 ink. månadsprognosen för hela augusti



# Stabilitet – i teorin

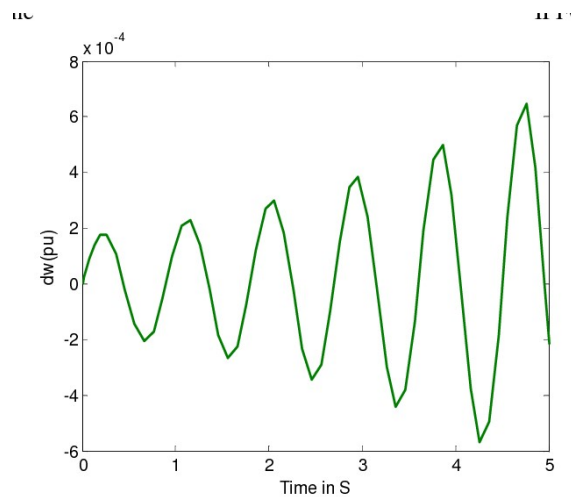
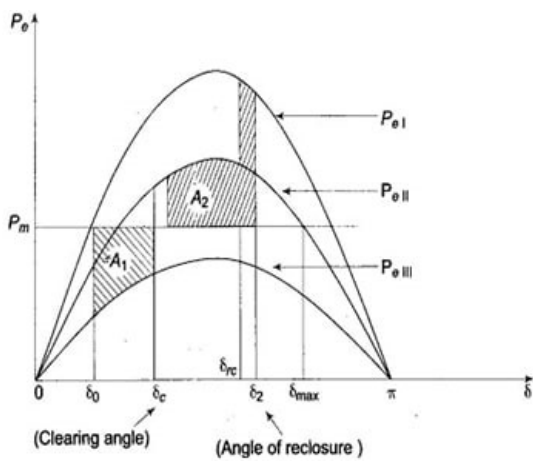
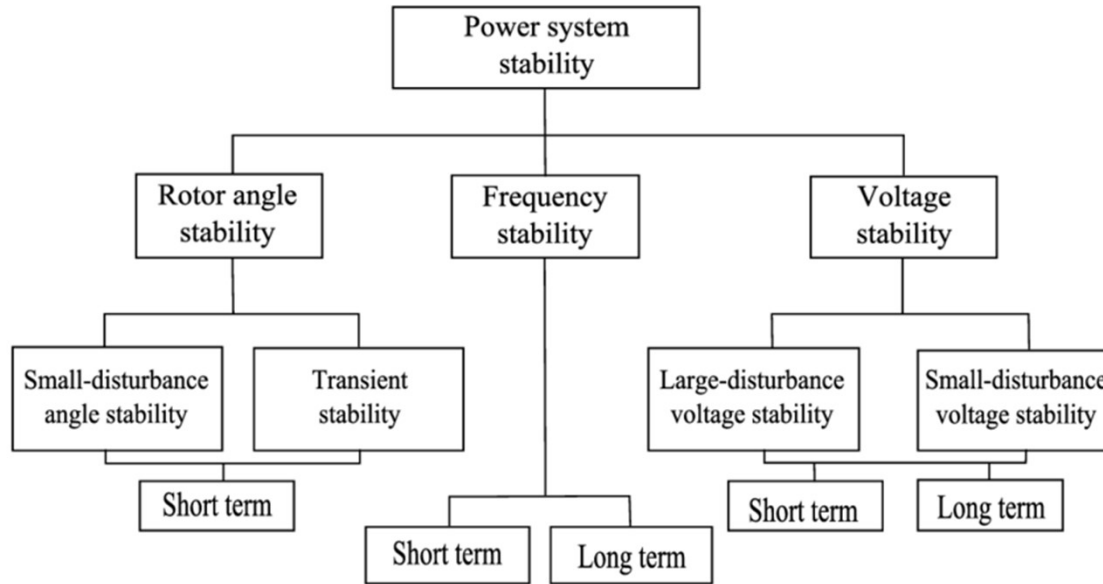
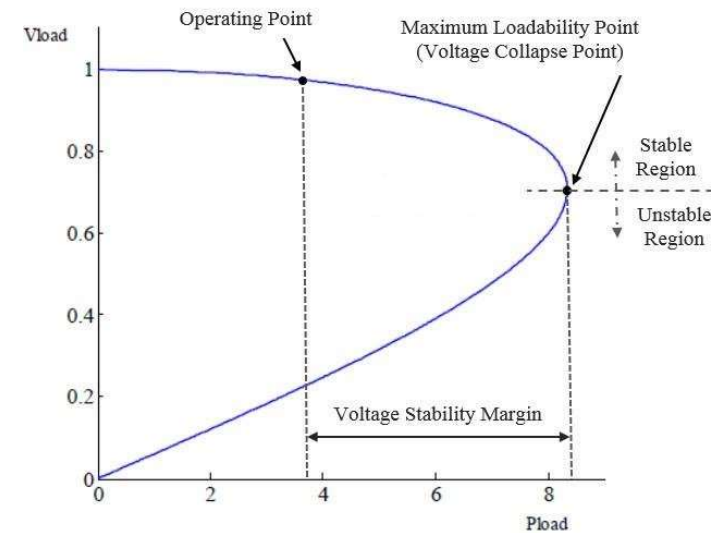


Fig. 4 Low frequency oscillations of power system without any damping controller



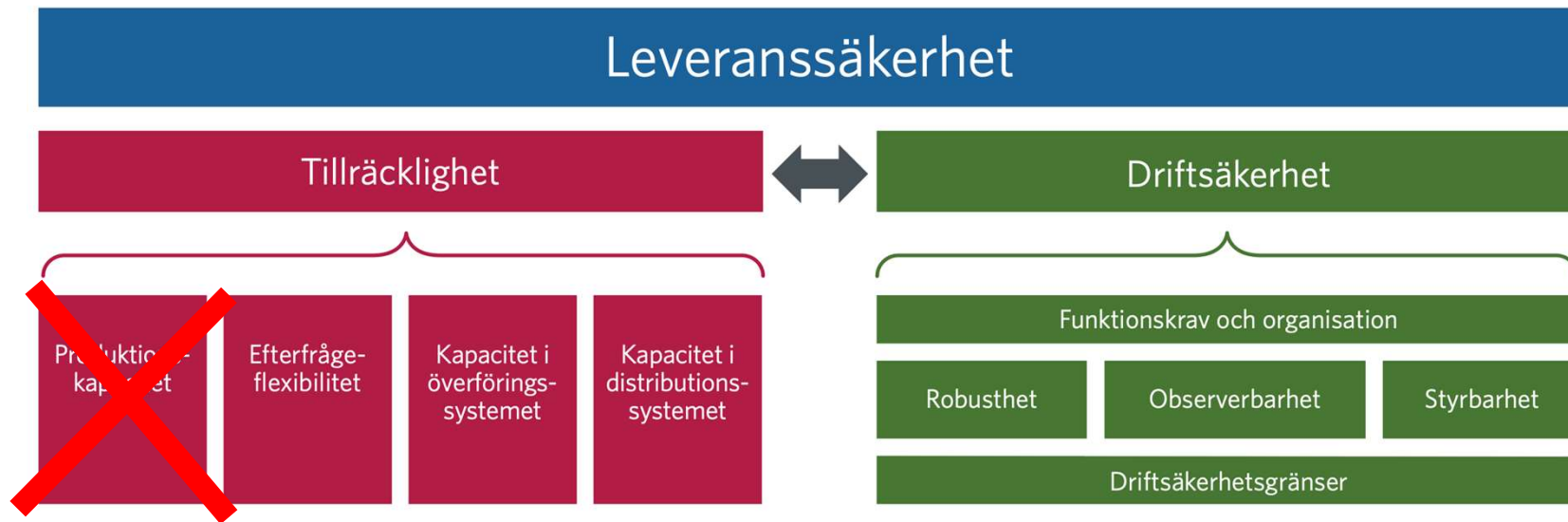
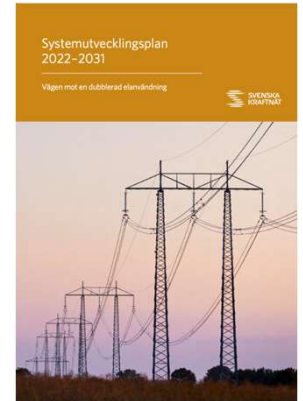


**Eller:**

**Är ett stabilt kraftsystem en teknisk eller samhällsekonomisk fråga?**



# Teori & praktik hänger ihop

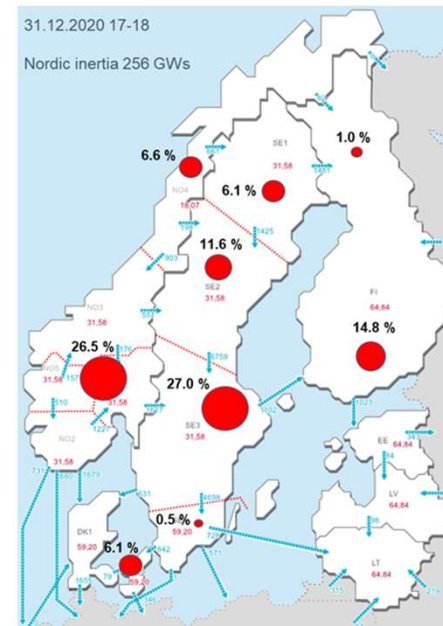
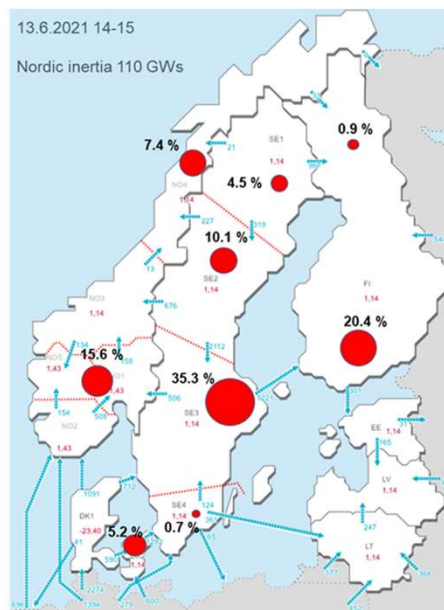


# Praktiska utmaningar inom stabilitet



- **Frekvensstabilitet**

- Frekvenskvaliteten har förbättrats på senare tid tack vare införande av stödtjänster specifikt FFR.
- Max FFR i Norden ligger på cirka 300MW utifrån ett accepterat  $f_{min}$  på 49,0 vid lägsta rotationsenergi.
- Behovet av stödtjänster kan förväntas öka med ökning av förnyelsebar produktion





# Praktiska utmaningar inom stabilitet



- **Spänningsstabilitet**

- Utmaningar inom spänningsstabilitet har ökat p.g.a. minskad möjlighet till spänningsreglering från kärnkraft i söder, delvis kompenserat med STATCOM – statisk synkronkompensering.



- Införande av marknader för reaktiv effektkompensering
- Översyn av anslutning avtal för att förtydliga krav på leverna av reaktiv effekt, inklusive leverans från distributionsnät

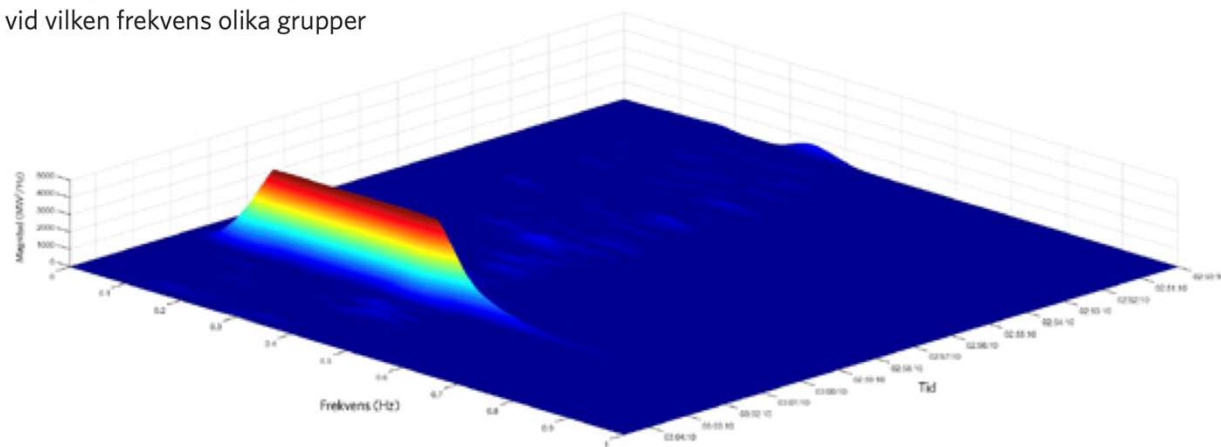
# Praktiska utmaningar inom stabilitet



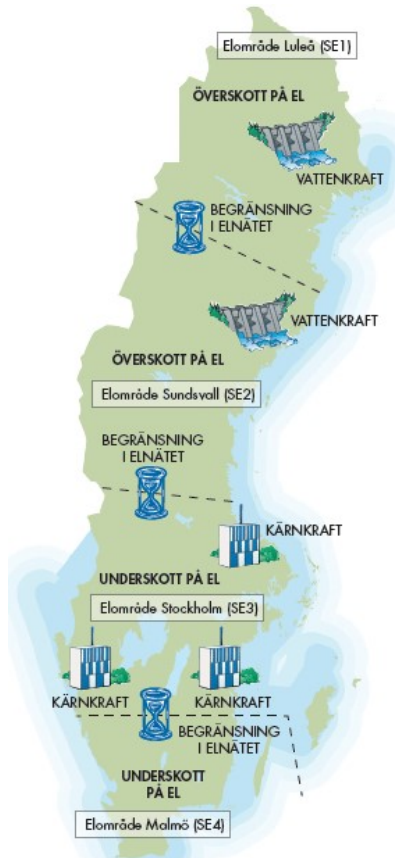
- ***Rotorvinkelstabilitet***

- Pendlingar kan uppstå mellan synkronmaskiner, särskilt vid långa överföringar mellan och inom landet, eller mellan synkronmaskiner och seriekompenserade ledningar.
- Power System Stabilisers (PSS) installeras och justeras vid generatorer och införs även för Vindkraftanläggningar

Figur 17 visar ett spektrogram där tid, frekvens och amplitud visas. Spektrogrammet visar vid vilken frekvens olika grupper



# En direkt konsekvens av detta



Från	Till SE1	Till SE2	Till SE3	Till SE4	Till SE
SE1		3 300			–
SE2	3 300		7 300		–
SE3		7 300		6 200	–
SE4			2 800		–
FI	1 100		1 200		2 300
NO4	700	250			950
NO3		600			600
NO1			2 145		2 145
DK1			715		715
DK2				1 700	1 700
DE				615	615
LT				700	700
PL				600	600
<b>Summa</b>	<b>5 100</b>	<b>11 450</b>	<b>14 160</b>	<b>9 815</b>	<b>10 325</b>

Tabell 20. Maximal handelskapacitet (MW) mellan Sveriges elområden och importkapacitet till Sverige från angränsande elområden vintern 2022/2023. Källa: Svenska kraftnät/ENTSO-E.



Som en följd av kraven på driftsäkerhet, kopplat till tillräckligheten får vi överföringsbegränsningar i kraftsystemet

Source: Konsumenternas Elmarknadsbyrå



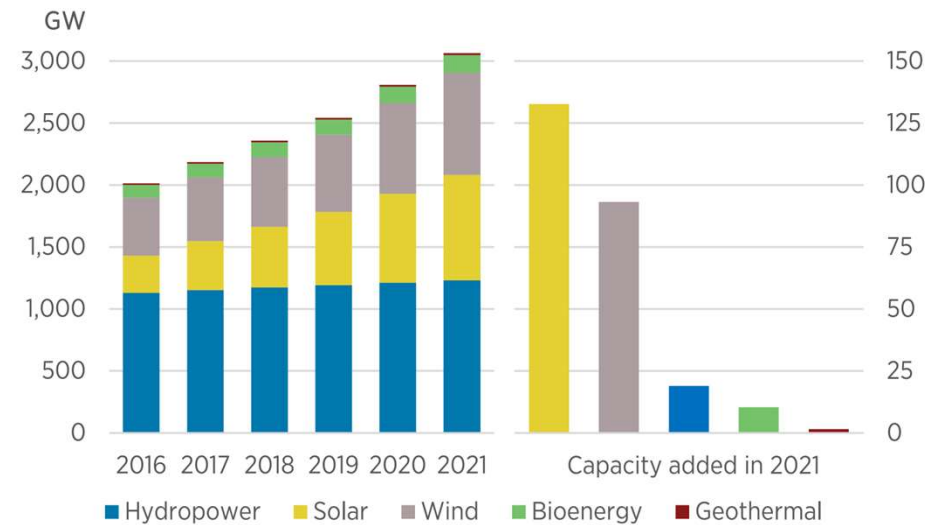
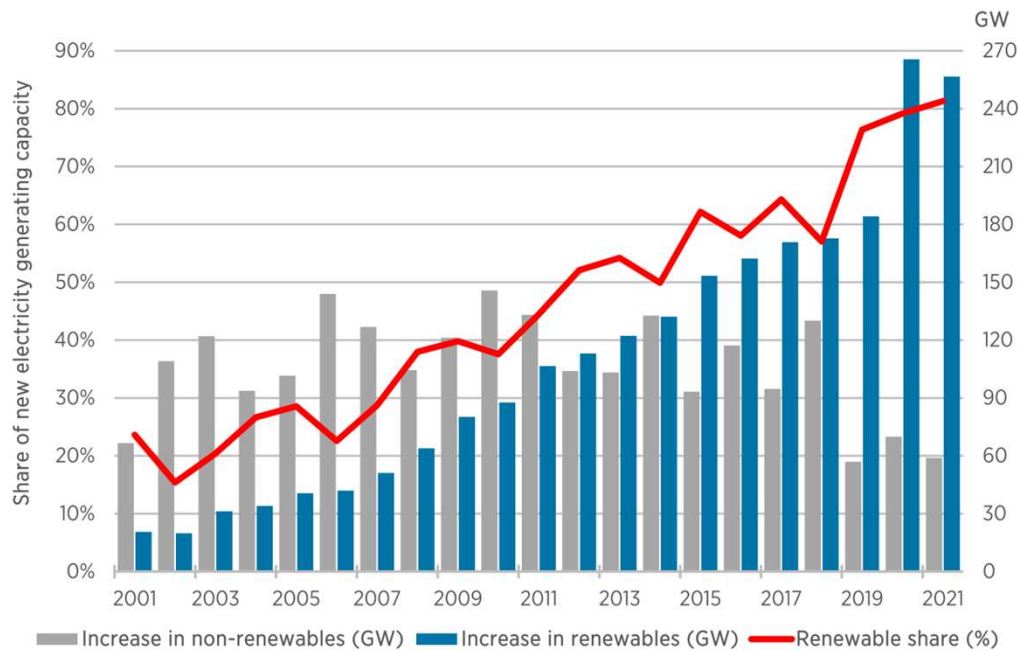
# Dagens predikotext

Något om stabilitet - idag

**Något om stabilitet - framöver**

Några exempel på forskning på KTH

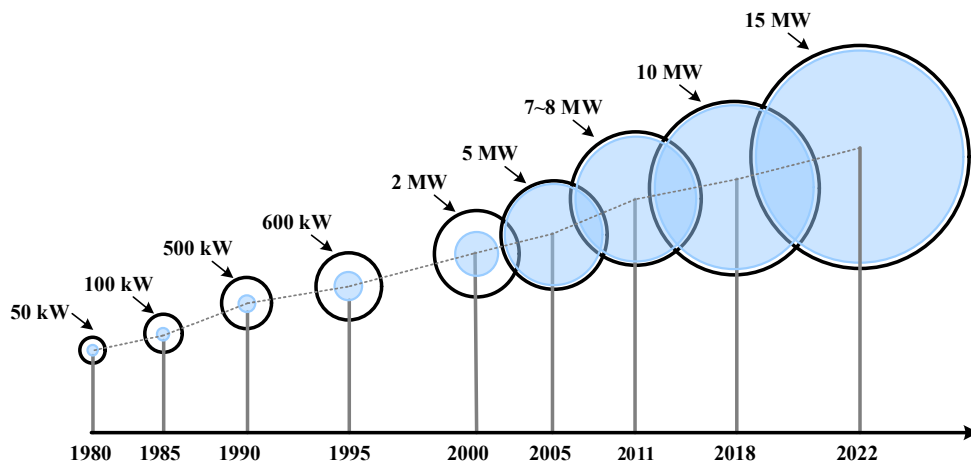
# Omvandlingen av energisystemet går allt fortare



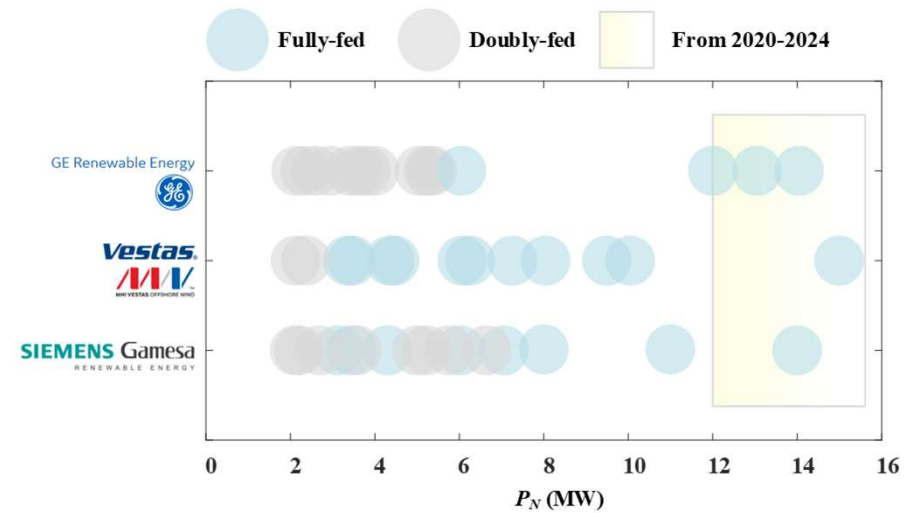
**Solar and wind account for 88% of all net renewable additions in 2021**

[1] <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>

# Vindkraftverken blir allt större



Ever-increasing power capacity of wind turbines



12 MW (GE), 14 MW (SG), 15 MW (Vestas) → 20 MW  
(?)

[2] X. Wang, "Next-generation grid emulation systems for DERs," IEEE International Technology Roadmap of Power Electronics for Distributed Energy Resources (ITRD)



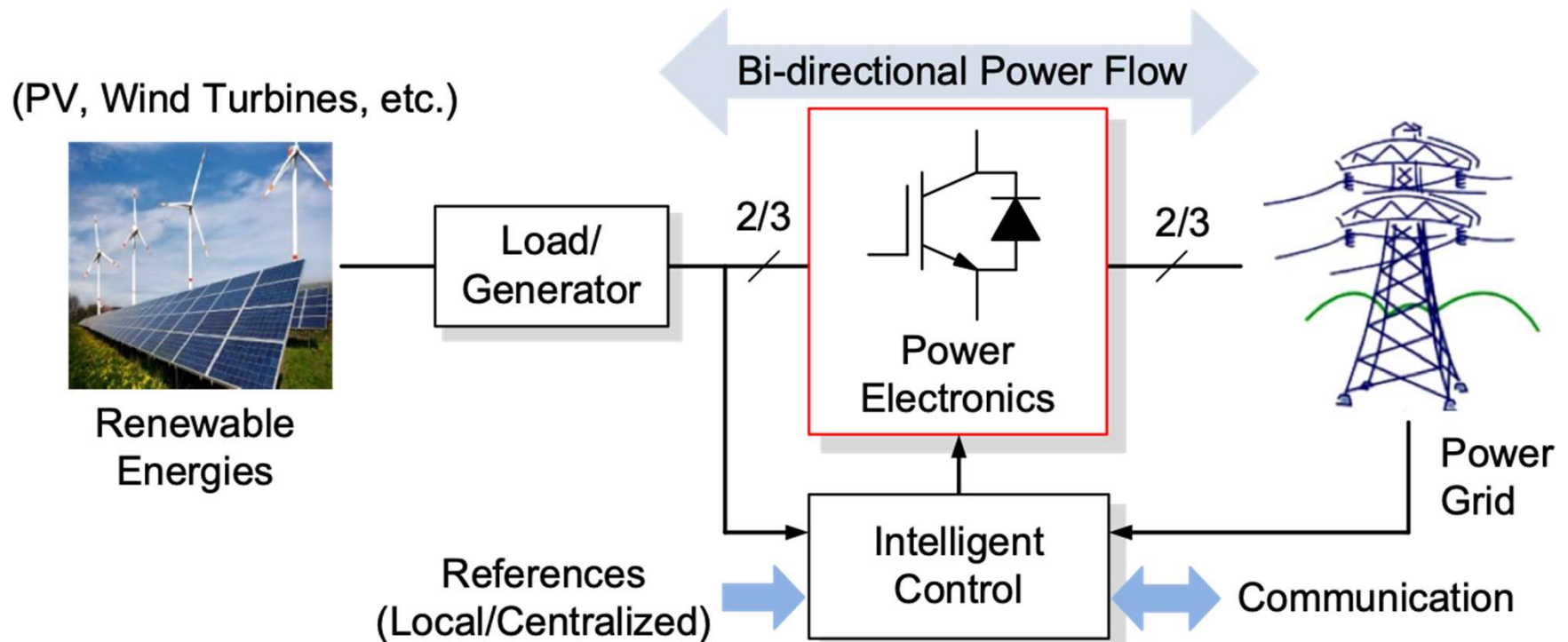
# Den roterande massan blir allt lägre



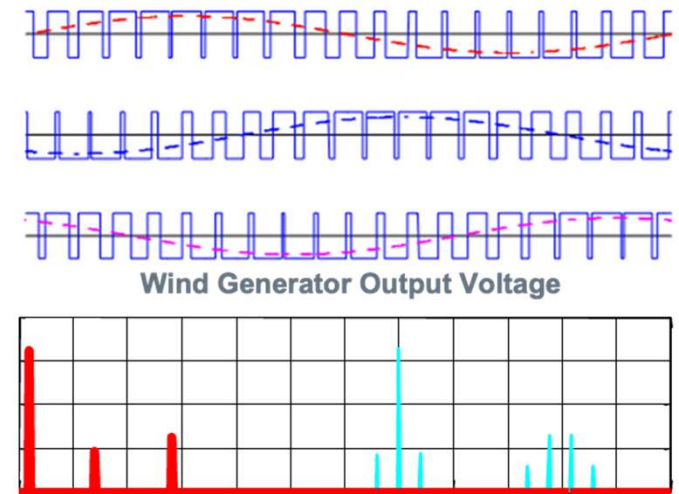
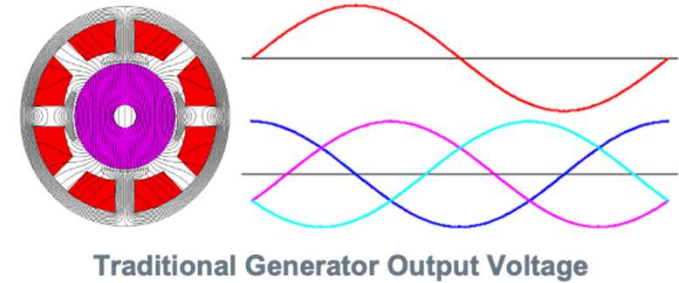
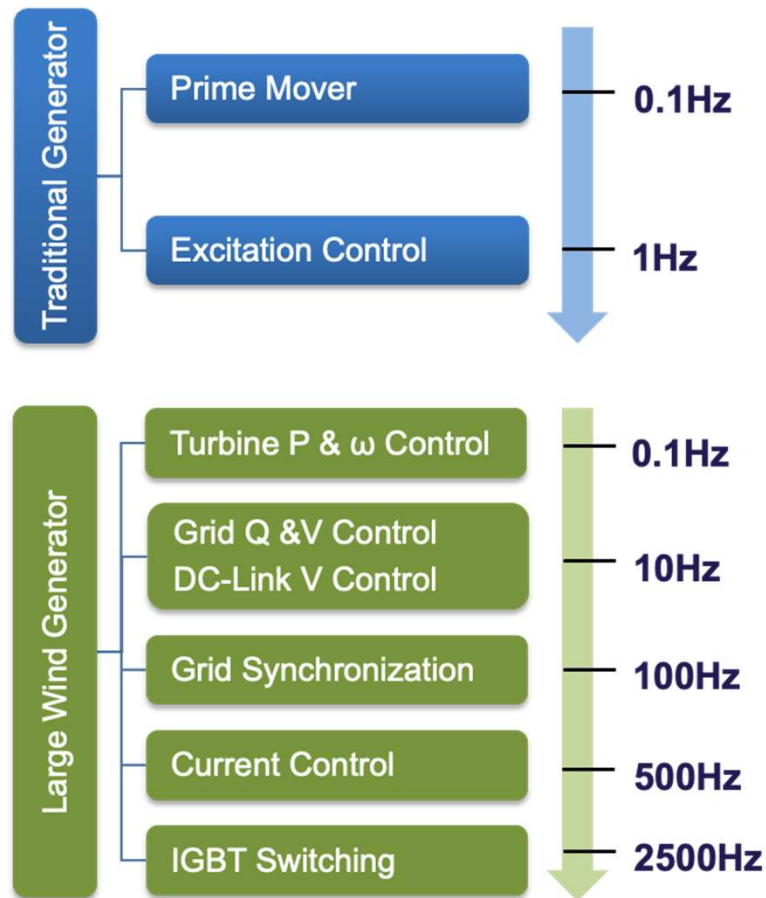
Källa: Uniper

# Kraftelektronik – en nödvändig del i omställningen

Kontrollerbar och effektiv kraftomvandling

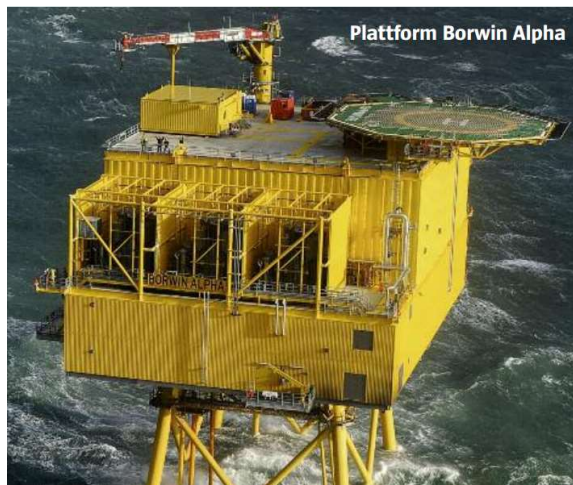


# Dynamiken i kraftsystemet ändras

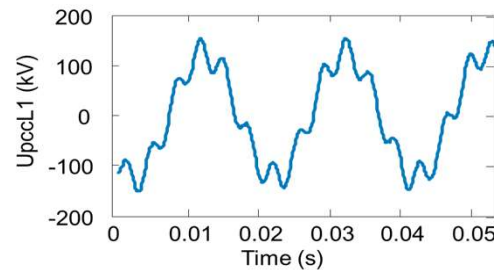


# Utmaningar med integrationen

## Instabilitet i kraftelektronik-an slutna energikällor



VSC-HVDC + Offshore Wind  
 Two-Level VSC filter resonance  
 Type-3 (DFIG) wind turbine



Rätselhafter Defekt legt größten Windpark lahm



- Första HVDC anslutna offshore vindkraftparken
- **Instabilitet (harmonisk resonans)** ledde till att skydden kopplade från vindkraftparken [3]
- **3 års förseningar och ökade kostnader med €3 miljarder** [4]

[3] M. Larsson, "Harmonic resonance and control interoperability analysis of HVDC connected wind farms," IEEE eT&D, Aalborg, 2017.

[4] [https://en.wikipedia.org/wiki/BARD\\_Offshore\\_1](https://en.wikipedia.org/wiki/BARD_Offshore_1)

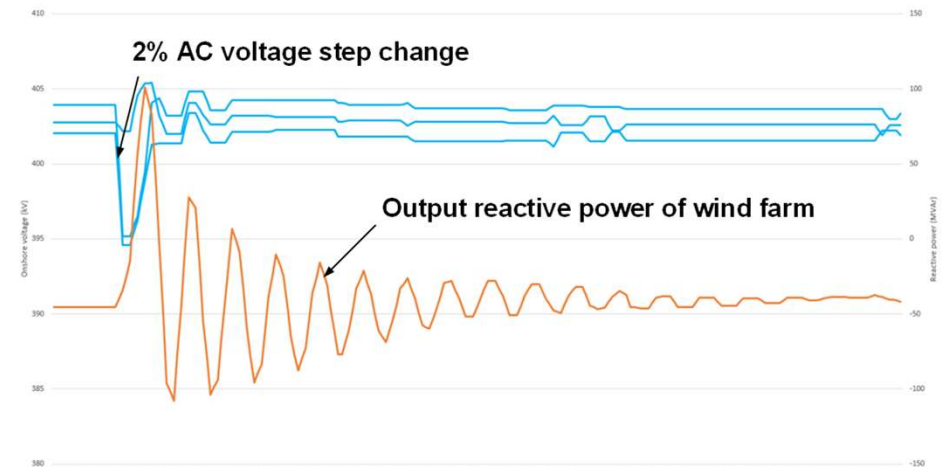


# Utmaningar med integrationen

## Instabilitet i kraftelektronik-an slutna energikällor



- In 2019, a tripped wind farm leads to blackout in London.
- **1.1 million electricity customers** lost power, incl. critical facilities, e.g. hospital, railways and airport.
- Wind farm owner pays **£4.5 millions** for the disruption of offshore wind farm.



- **Stable operation** under small voltage disturbance<sup>[5]</sup>
- Damped response of reactive power of wind farm

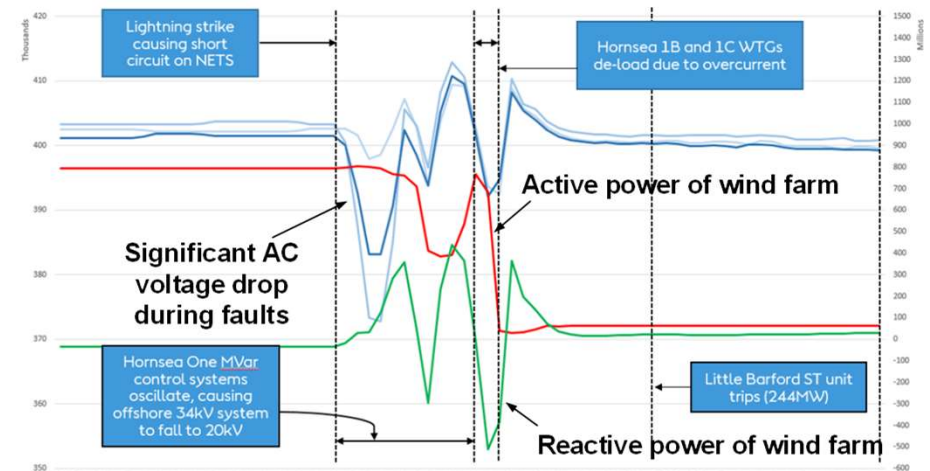
[5] National Grid, "Appendices to the Technical Report on the events of 9 August 2019." UK, Sep. 2019.

# Utmaningar med integrationen

## Instabilitet i kraftelektronik-anslutna energikällor



- In 2019, a tripped wind farm leads to blackout in London.
- **1.1 million electricity customers** lost power, incl. critical facilities, e.g. hospital, railways and airport.
- Wind farm owner pays **£4.5 millions** for the disruption of offshore wind farm.



- **Loss of Synchronization** under large disturbance<sup>[5]</sup>
- Significant active power drop from wind farm

[5] National Grid, "Appendices to the Technical Report on the events of 9 August 2019." UK, Sep. 2019.







# Dagens predikotext

Något om stabilitet - idag

Något om stabilitet - framöver

**Några exempel på forskning på KTH**

# NEWEPS – Nordic Early Warning Early Protection System - I

- Pendlingar i kraftsystemet kan uppstå p.g.a. felkonfigurerad eller trasig utrustning.
- Att snabbt hitta källan för sådana pendlingar är svårt men viktigt.
- Utveckling av metoder för identifiering och lokalisering av pendlingskällor

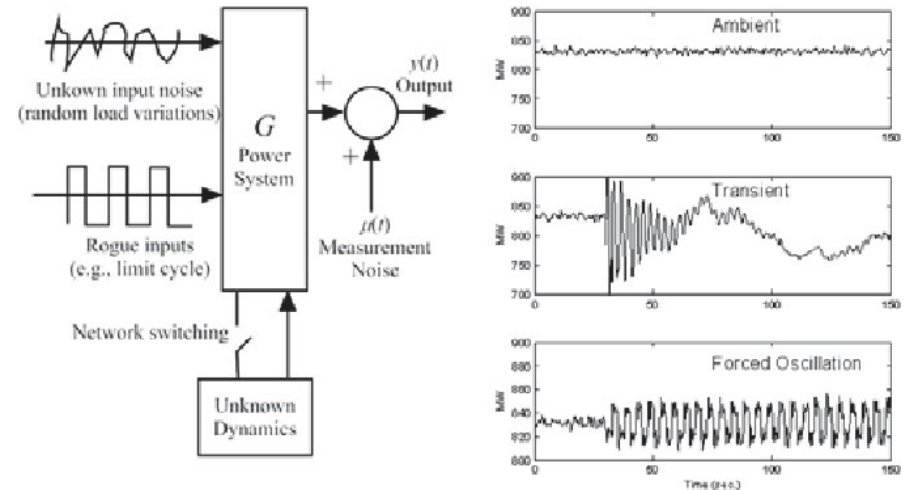


Fig. 1: Power system response types.

*"Distinguishing features of natural and forced oscillations", Ruichao Xie, D. Trudnowski, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*



David Bergman

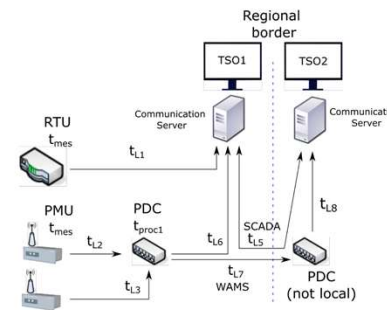


Mehrdad Ghandhari



# NEWEPS – Nordic Early Warning Early Protection System - II

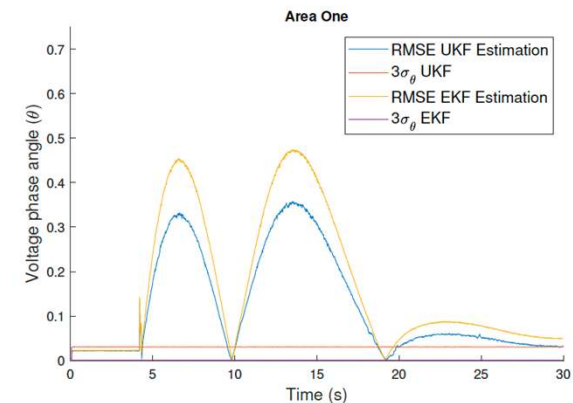
- Snabb lägesuppdatering från icke observerbara delar av kraftsystemet
- Utveckling av metoder för estimering av spänning (magnitud och vinkel) i angränsande nät



Anton terVehn



Lars Nordström



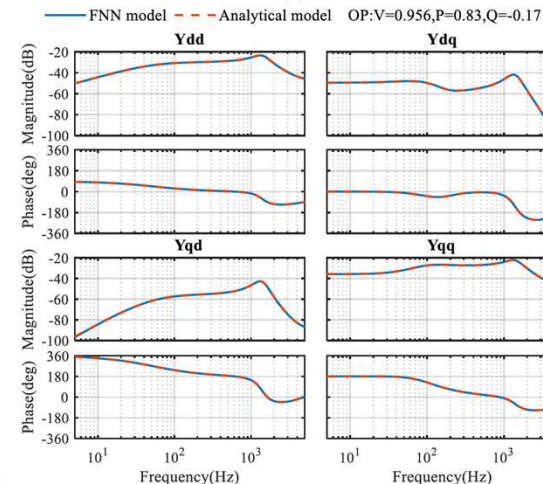
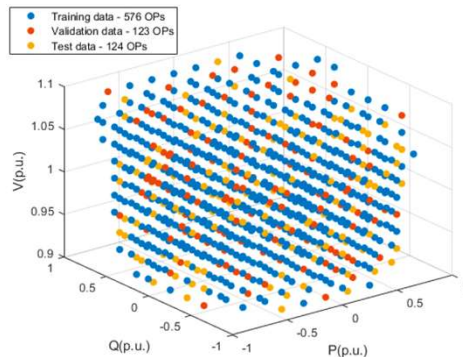
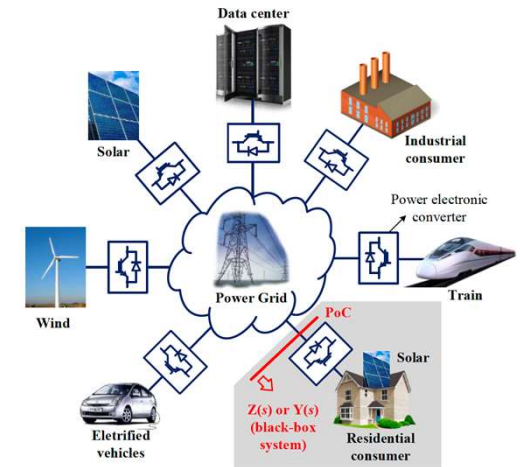
”Dynamic state estimation considering integrated data sharing architectures in multi-area systems”, A terVehn, L. Nordström, Submitted to IEEE PES General Meeting 2023

# C3DTI – Maskininlärningsbaserad modellering av nätimpedans

Omvandlare har varierande beteende (modellerat som impedans) beroende på driftläge och frekvens.

Eftersom beteendet är beroende av regleralgoritmerna i omvandlaren (som är okända) måste man mäta impedansen vid alla frekvenser för ett stort antal driftlägen.

Genom att istället träna ett artificiellt nätverk att känna igen impedanser i olika frekvenser och driftlägen kan man skapa modeller utan mätning



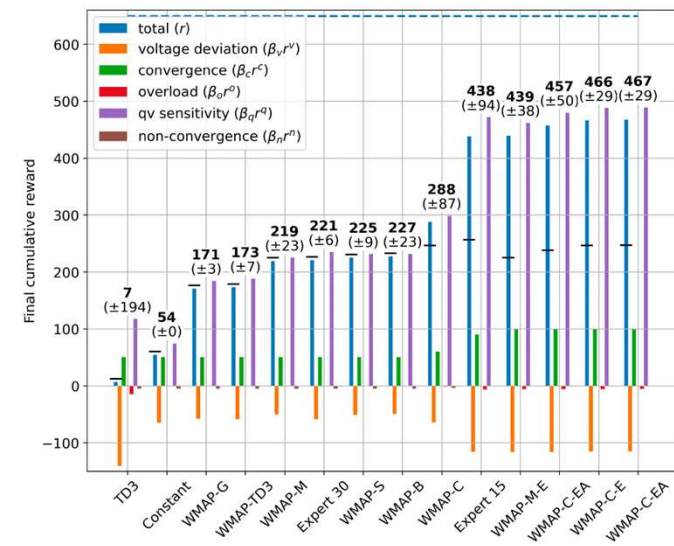
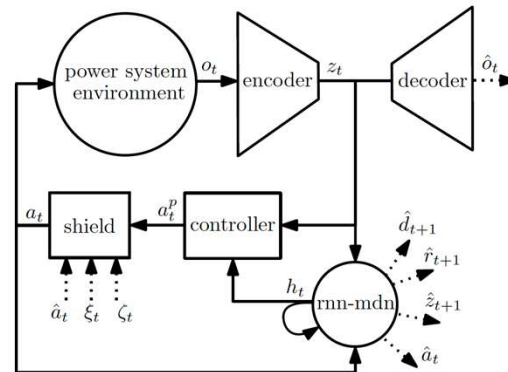
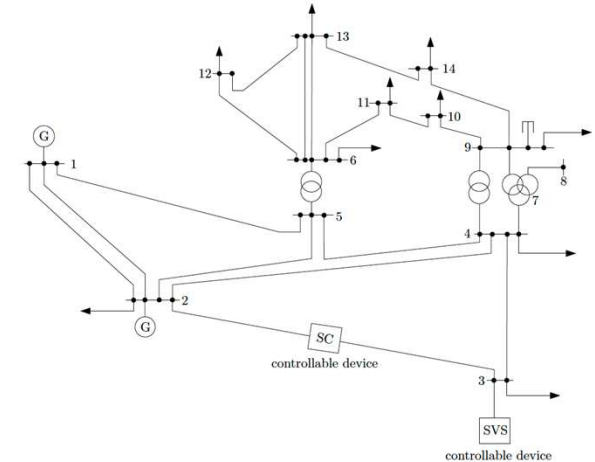
Neural Network Design for Impedance Modeling of Power Electronic Syst  
 Nordström, X Wang, P Mittal, HV Poor, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning System

M Chen, L



# Optimal och robust styrning av FACTS med hjälp av förstärkande inlärning (Reinforcement learning)

- I ett nät med flera FACTS (exvis SVC, TCSC) kan inställning av optimala börvärden vara beräkningsintensivt.
- Modellfel (bristande SCADA data) kan ge felaktiga inställningar
- Ett alternativt sätt att är att använda maskininlärning för att utveckla kontrollstrategier

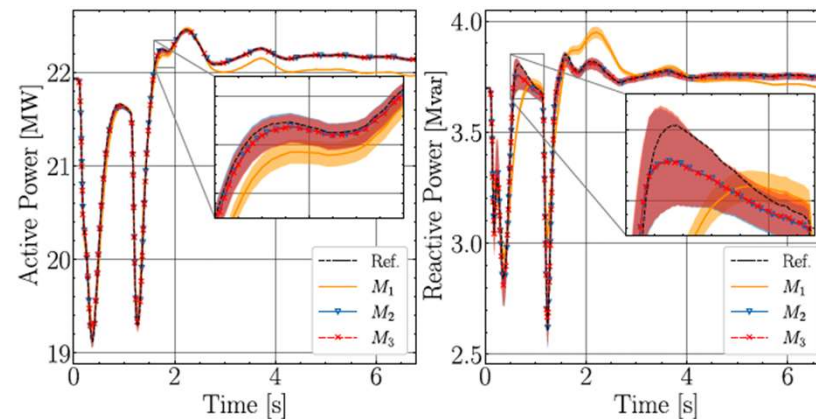
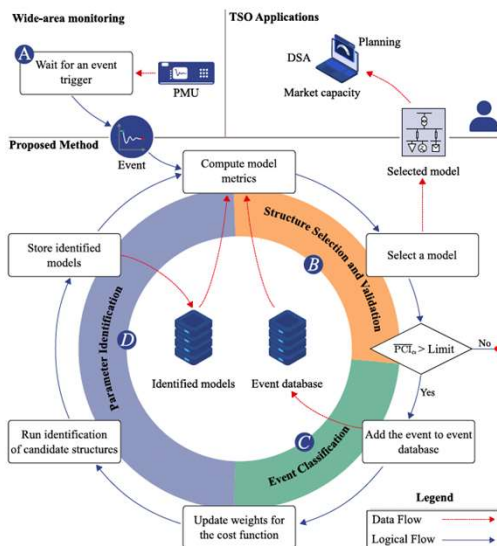
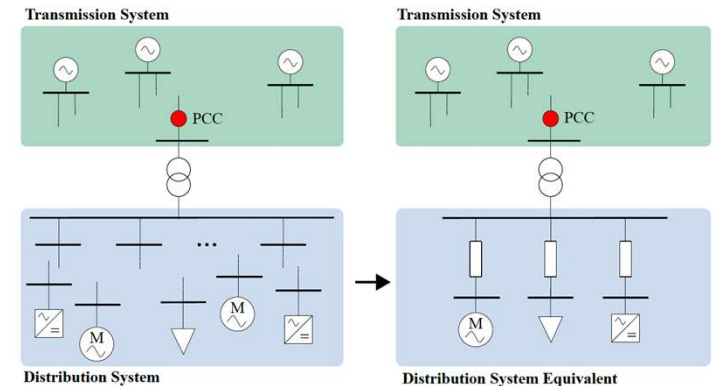


”A World Model Based Reinforcement Learning Architecture for Autonomous Power System Control”, M Tarle, M Björkman, M Larsson, L Nordström, G Ingeström, 2021 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing ...



# SPARC – Synchrophasor based Automatic Real-time control

- Modellering av distributionsnät kräver mycket data och kan ofta innehålla fel.
- Automatiserad modellering och/eller verifiering av modeller genom mätningar vid anslutningspunkten och användande av systemidentifieringsmetoder.



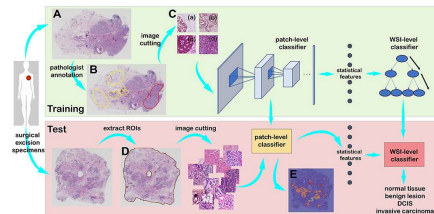
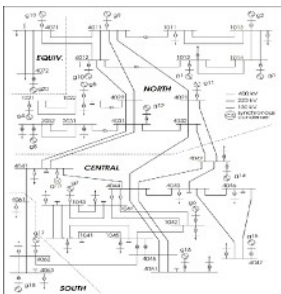
”Model Structure Selection and Validation for Dynamic Equivalencing of Distribution Networks”, T. Rabuzin, R. Eriksson, L. Nordström, IEEE Transactions on Smart Grid 13 (2), 1347-1356

# Grid level system awareness

*State labeling using heat maps and translational learning for early warning*



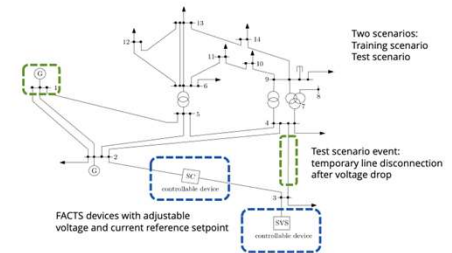
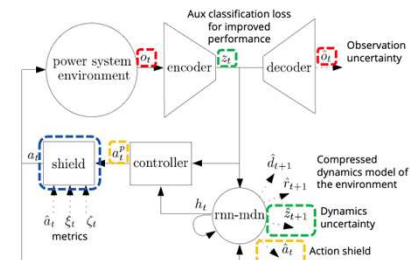
Arvid Rolander



*Safe-RL for optimal control of coordinated FACTS devices*



Magnus Tarle





# Frågor och kommentarer