



LUNDS
UNIVERSITET

LTH

LUNDS TEKNISKA
HÖGSKOLA



Elöverföring i elnätet och produktionsanläggningarnas roll

OLOF SAMUELSSON, LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Tillförlitlig elöverföring förutsätter

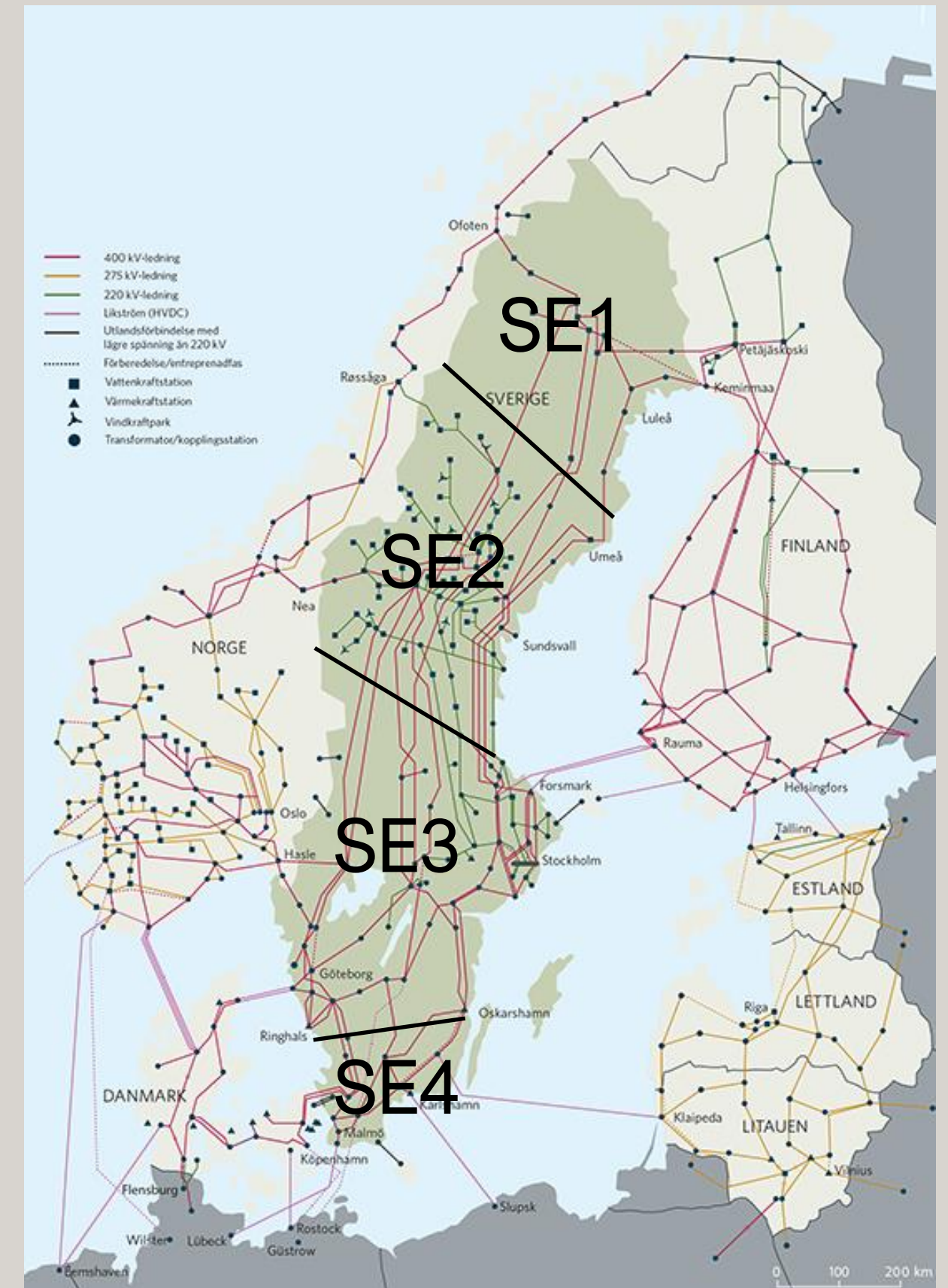
- Ledningskapacitet
 - Störningstålig leverans av aktiv effekt
 - Flexibel aktiv effekt för effektbalansen
 - Snabb reglering av aktiv effekt för frekvenshållning
 - Tröghetsmoment (inertia): Buffert innan frekvensregleringen reagerar
 - Reglerbar reaktiv effekt för spänningshållning **Fokus för presentationen**
 - Felströmmar så säkringar/skyddssystem (reläskydd) kan koppla bort fel
 - Möjlighet för återstart (dödnätsstart/blackstart) och ödrift
- Synkrogeneratorer i kraftverk

Innehåll

- Aktuella händelser
- Reaktiv effekt i elöverföringen
- Friledningar och kablar
- Spänningsstabilitet
- Systemtjänster

Elområden och elpris

- Flaskhalsar i transmissionsnätet definierar elområdena SE1-SE4
- Så länge kapaciteten räcker kan alla köpa till lägsta pris → samma elpris överallt
- När kapaciteten slår i taket måste ytterligare el köpas lokalt → högre pris och "prisdelning"



Elhändelser i media

TIDNINGEN EL, värme & kyla
ENERGI

start / artiklar / unika stödåtgärder stöttade elsystemet i södra sverige

Unika stödåtgärder stöttade elsystemet i södra Sverige

SPÄNNING Under sommaren tvingades Svenska kraftnät att köpa in extra stödtjänster för att klara stabiliteten i elnätet i södra Sverige. Åtgärden är unik och visar på den snabba förändringen av kraftsystemet, enligt SvK.

Senast uppdaterat: 2020-09-15 07:52

Ämnesområden: [Skatter & styrmedel](#), [Kärnkraft](#), [Elnät](#)

Dela artikel

[f](#) [t](#) [in](#)

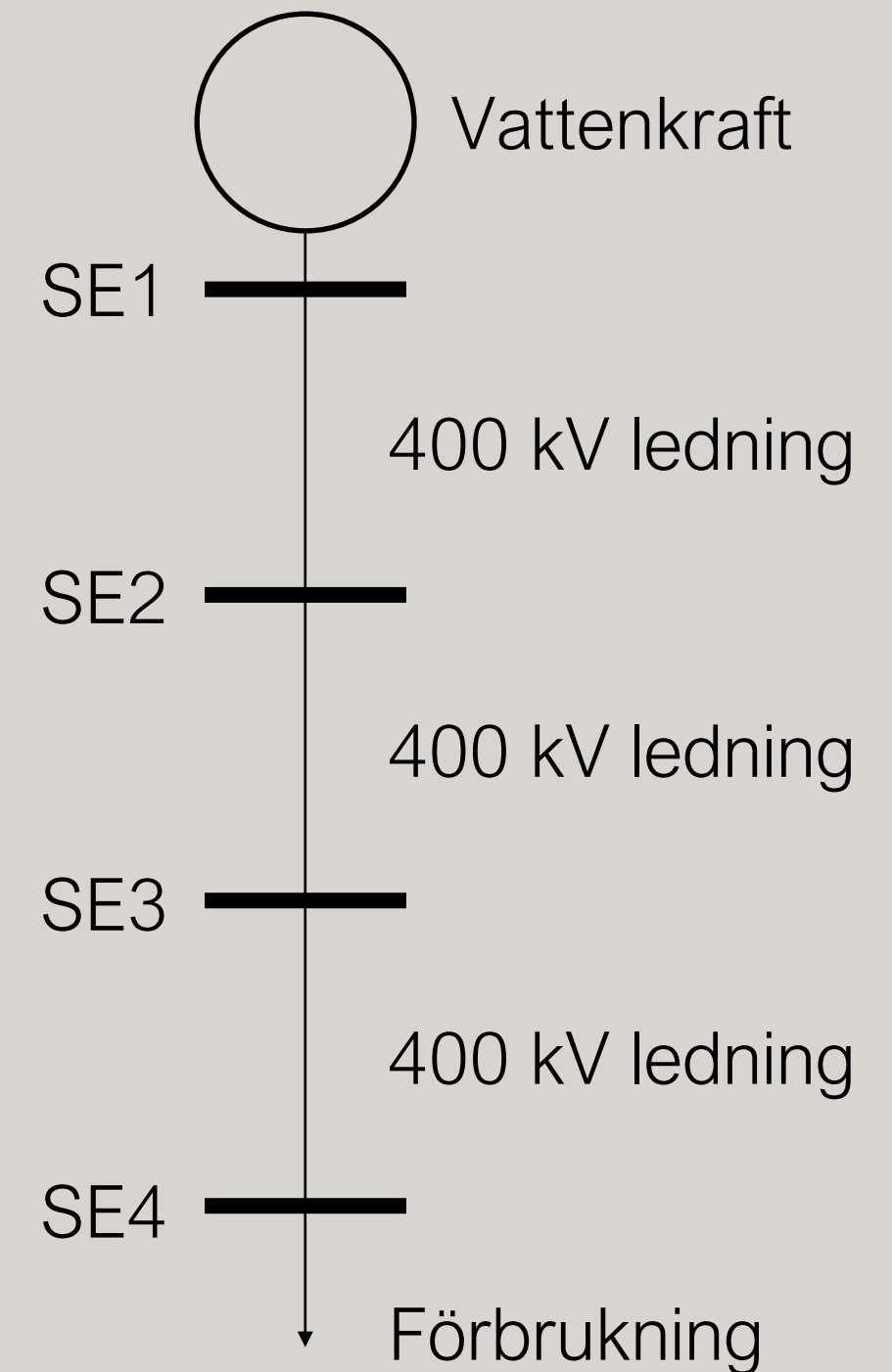
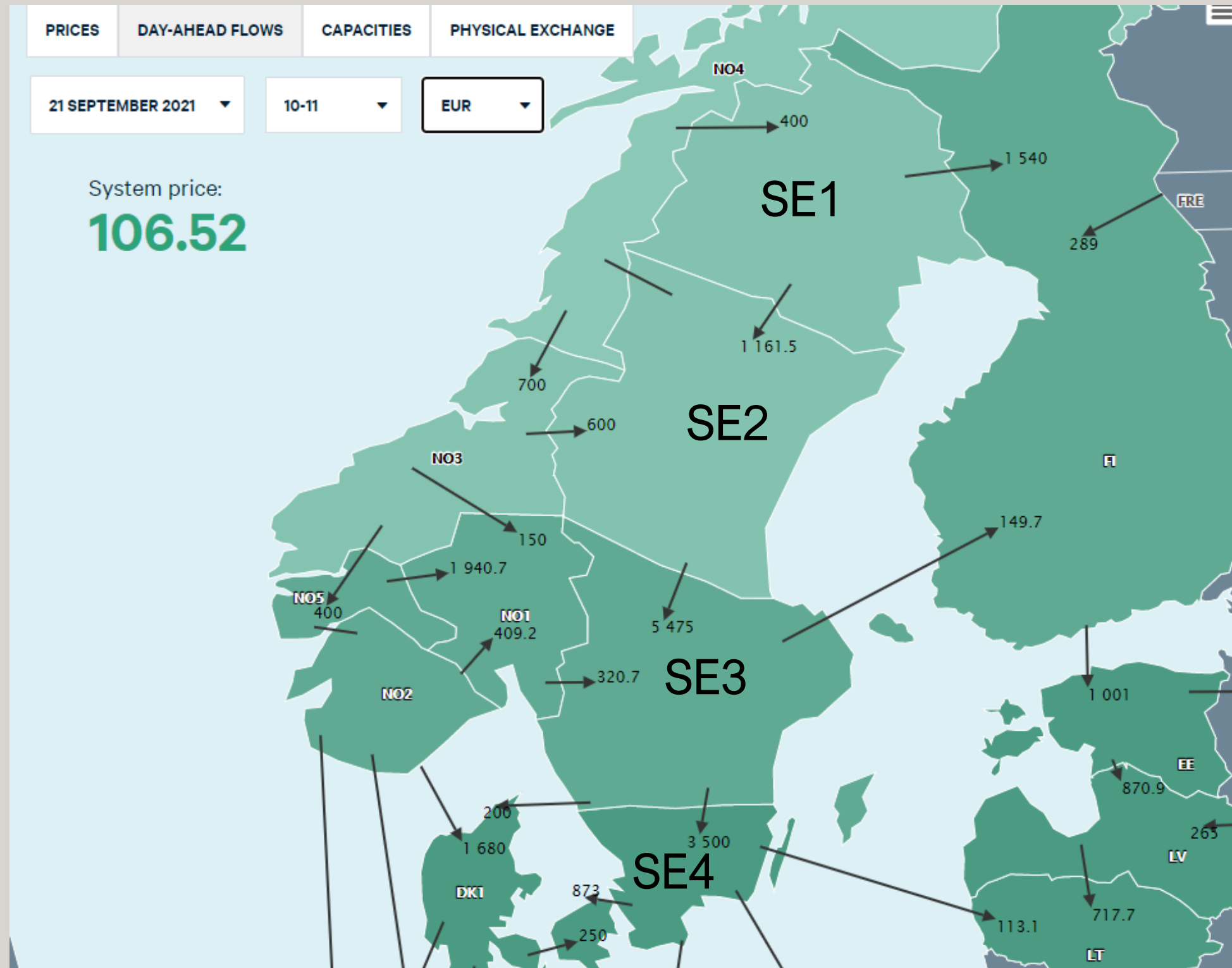


- 10 feb 2020 6,7 GW vindkraft → 4,2 GW export (=max) → negativt elpris i hela Sverige
- 25 juni 2020 Bara 0,2 GW vindkraft och lite kärnkraft → 5,3 GW import (=max) till SE3-4 → Karlshamnsverket startas → SE3-4: 2,1 SEK/kWh och SE1-2: 13 öre/kWh
- Juni 2020 Svenska kraftnät (Svk) betalar 300 MSEK för att Ringhals 1 ska avbryta revision och förbli infasat under sommaren då överföringskapaciteten till södra Sverige begränsats för att klara stabiliteten i elnätet

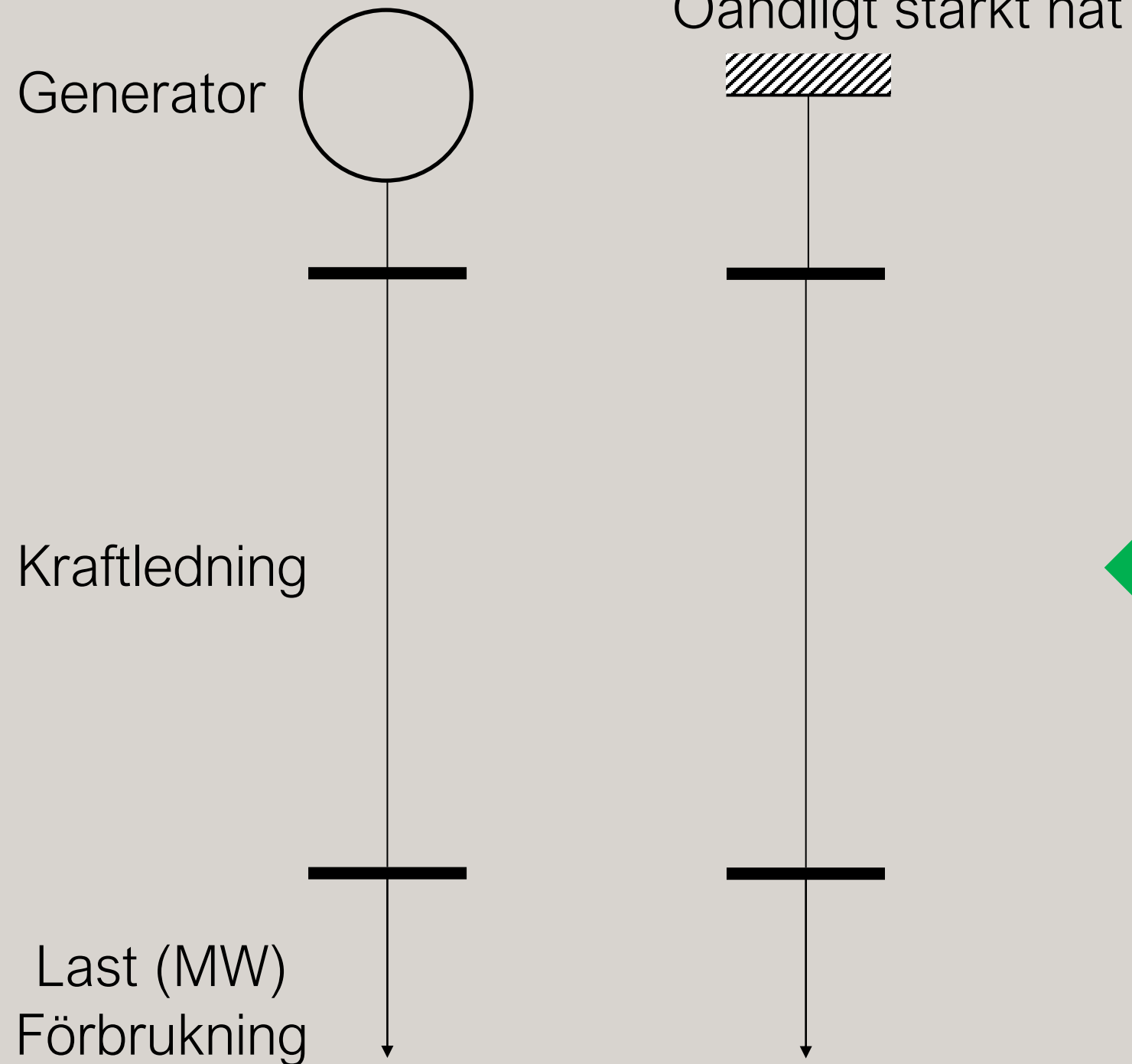
Hur hamnade vi här?

- Sedan Barsebäcksverket stängts saknar SE4 nästan planerbar produktion
- SE4 kraftigt beroende av import från SE3
- Med stängningarna i Ringhals utvecklas SE3 i samma riktning
- Ledningsarbeten sommartid minskar överföringskapaciteten ytterligare
- Enligt Svenska Kraftnät (Svk) skulle Ringhals 1 vara infasat under sommaren 2020 för att säkra spänningsstabiliteten
- Förstå ström räcker en bit men inte hela vägen – spänning är viktigt!

En förenklad modell av Sverige

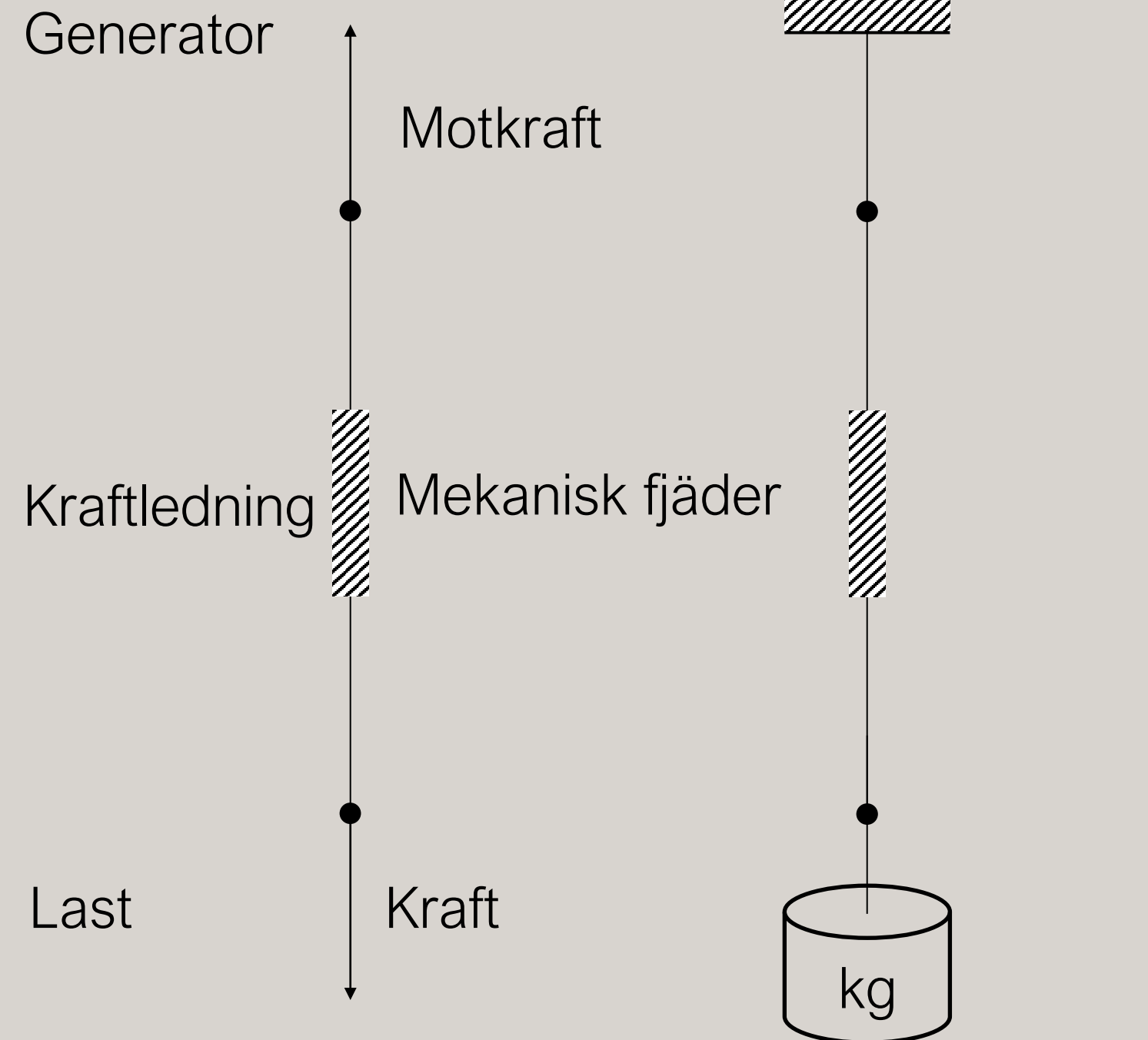


Kraftsystem



Lasteffekten balanseras av generatorns effekt
Mer last → mer ström i ledningen

Tänk mekaniskt



Lasteffekten balanseras av generatorns effekt
Mer last → mer kraft → längre fjäder

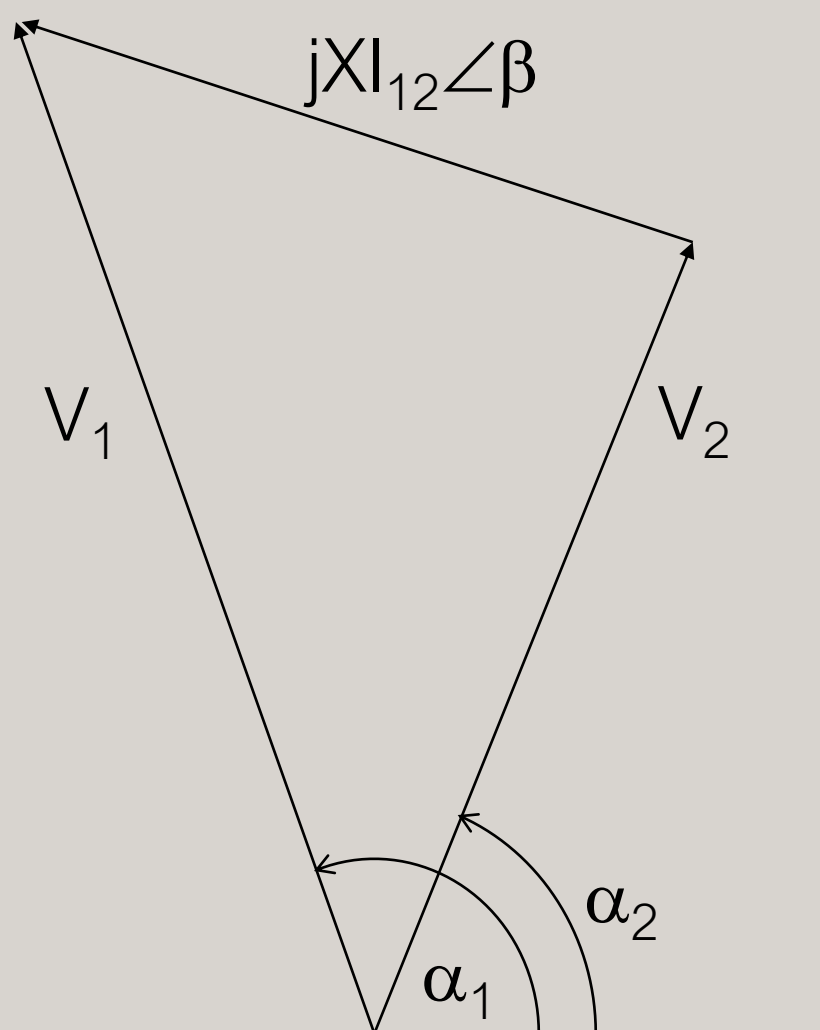


Elkraftingenjörens bild

Spänningar är pilar $V \angle \alpha$ i ett plan:

- Längden är storleken V i kV
- Riktningen är fasvinkeln α

Mer last $\rightarrow$ mer ström



Tänk mekaniskt

Tolka komplexa spänningar som hävarmar
Låt hävarmarna spänna ut fjädern

Ström motsvarar fortfarande kraft,
men nu i två dimensioner!

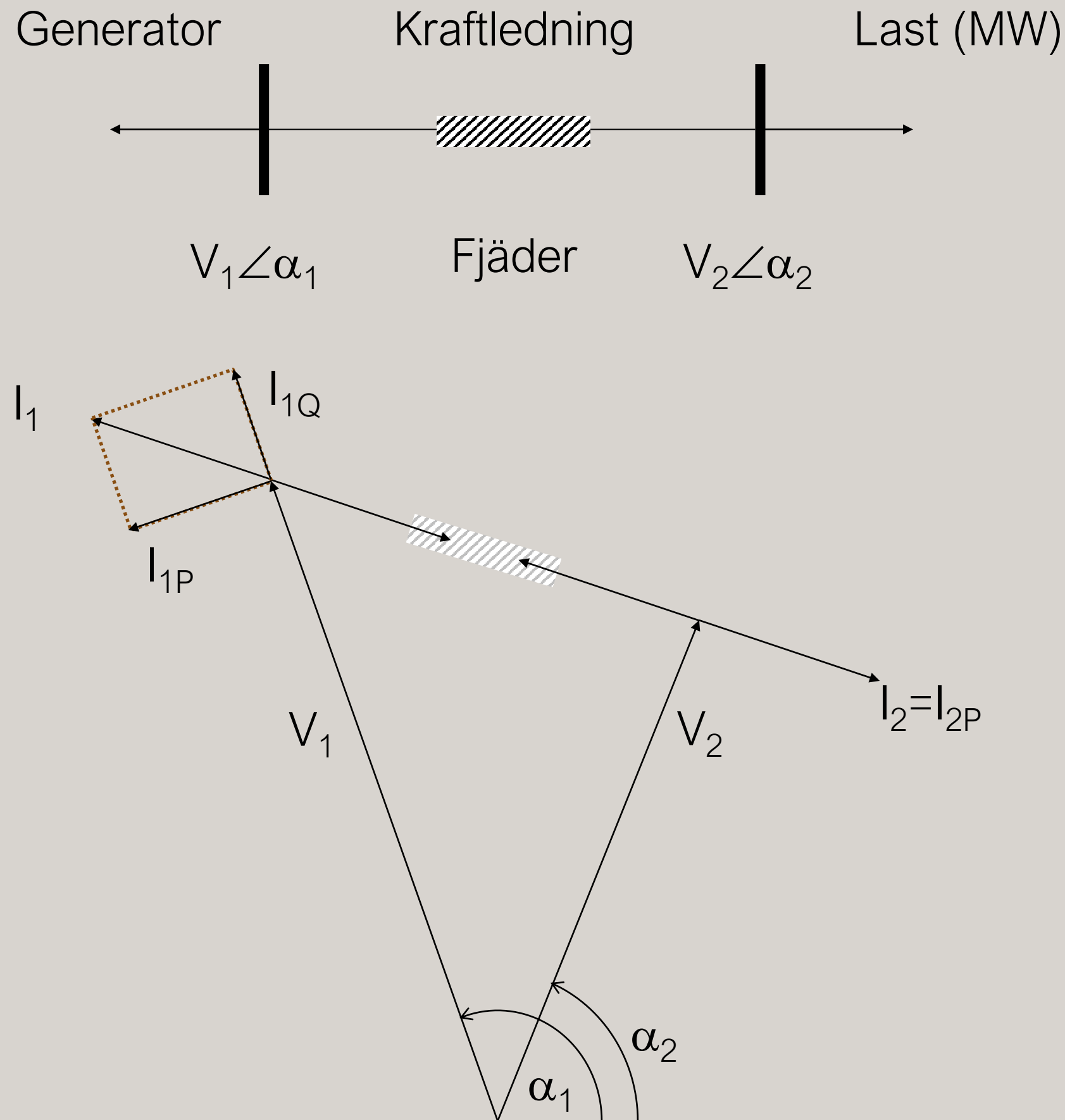
Tangentiell kraft motsvarar aktiv ström:
Vridmoment $T_1 = I_{1P} V_1$ och $T_2 = I_{2P} V_2$
motsvarar alltså aktiv effekt P

Radiell kraft motsvarar reaktiv ström:
 $I_{1Q} V_1$ (och $I_{2Q} V_2$ men $I_{2Q} = 0$)
motsvarar reaktiv effekt Q

P och Q beror av spänning och ström – bra!

Kraftledningen drar reaktiv effekt som här
kommer från generatorn.

Spänningen vid lasten är för låg...

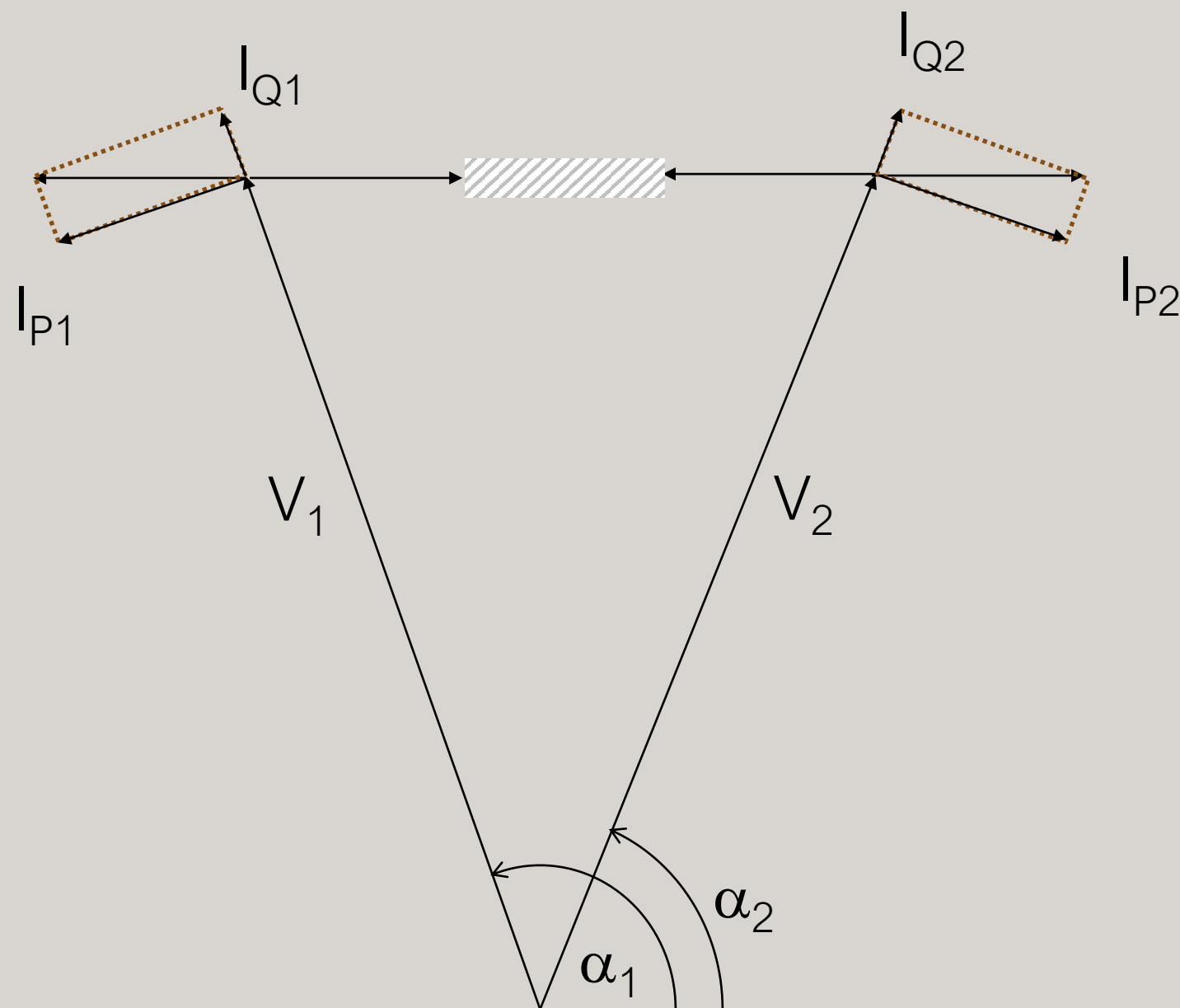


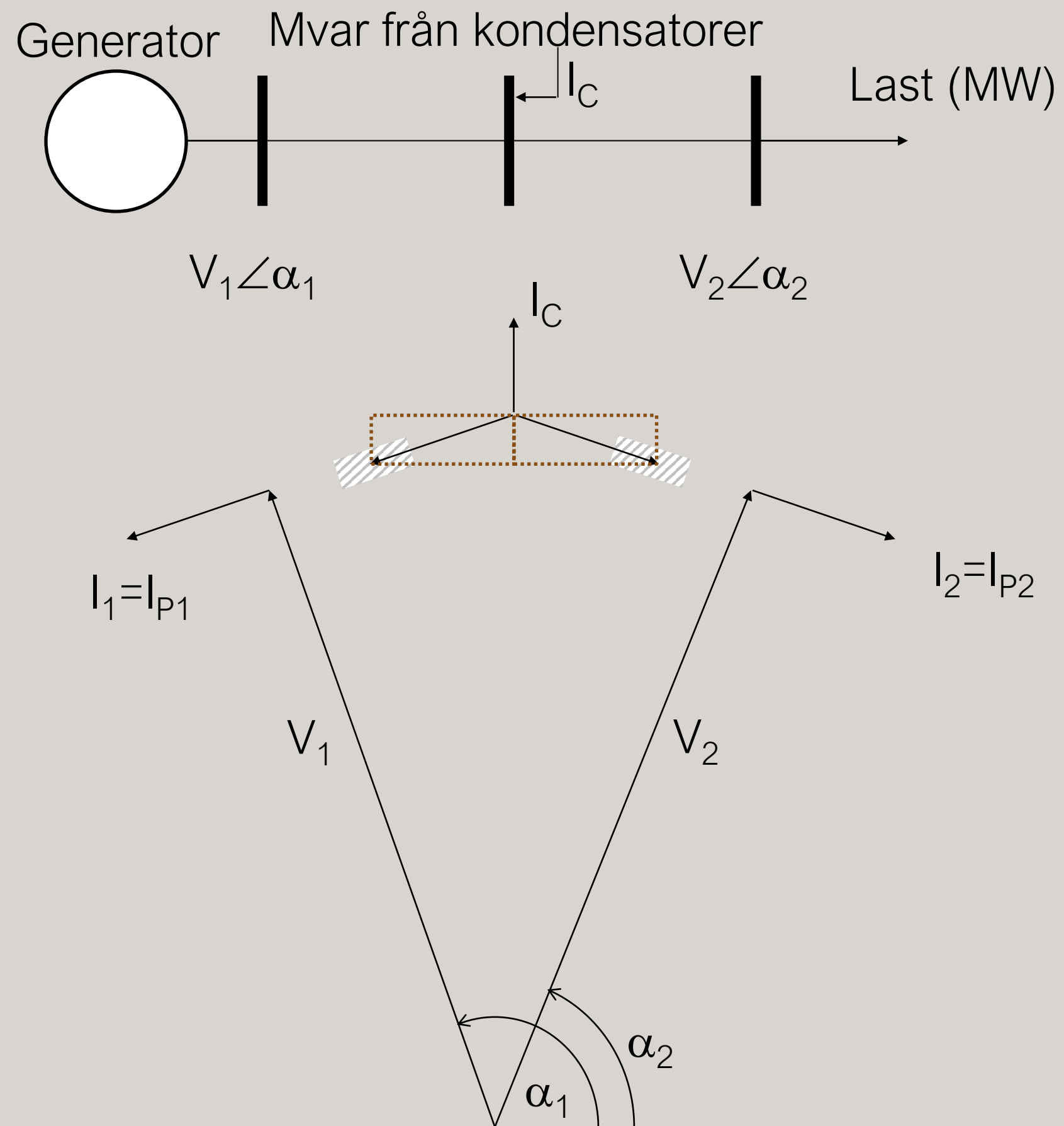


Anslut kondensatorer

Kondensatorer tillför reaktiv effekt
Spänningen höjs

Kraftledningen drar nu lika mycket reaktiv från vänster och höger sida och spänningarna vid lasten är bra





Flytta kondensatorerna

Mata in all reaktiv effekt mitt på ledningen

Motsvarar en radiell kraft mitt på fjädern

Generatoren lämnar nu bara aktiv effekt

Spänningen vid lasten är bra

Reaktiv effekt – variabel i steg



Kopplas ofta manuellt
från kontrollrum

Shuntreaktor	Shunkondensator
Dra reaktiv effekt	-
-	Lämna reaktiv effekt

Reaktiv effekt – kontinuerligt variabel



Ringhals

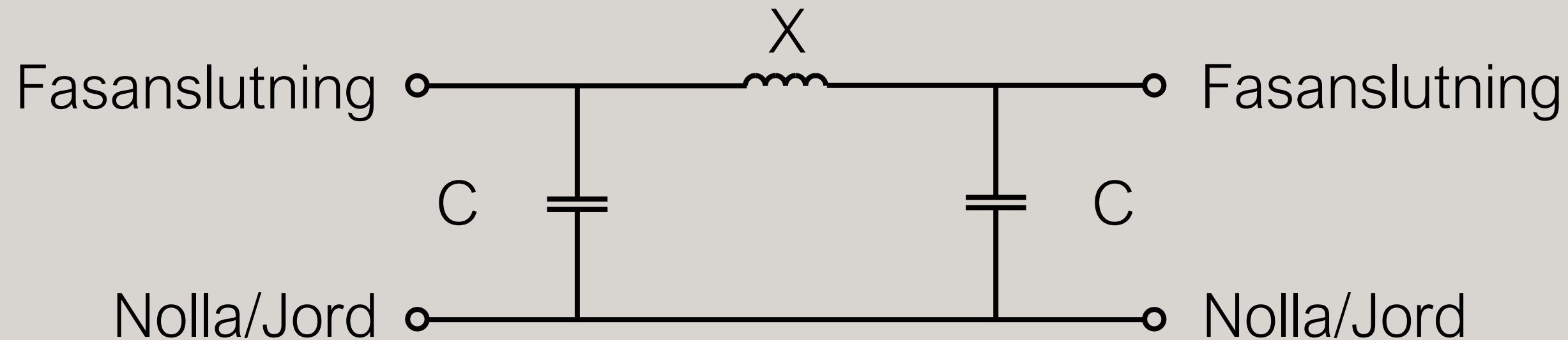


Sydvästlänken

Styrs typiskt av
spänningsregulator
(AVR)

Synkronkompensator	Synkrongenerator	VSC-HVDC	SVC/STATCOM
Dra reaktiv effekt	Dra reaktiv effekt	Dra reaktiv effekt	Dra reaktiv effekt
Lämna reaktiv effekt	Lämna reaktiv effekt	Lämna reaktiv effekt	Lämna reaktiv effekt
Ingen aktiv effekt			Ingen aktiv effekt

Beräkningsmodell för (förlustfri) friledning

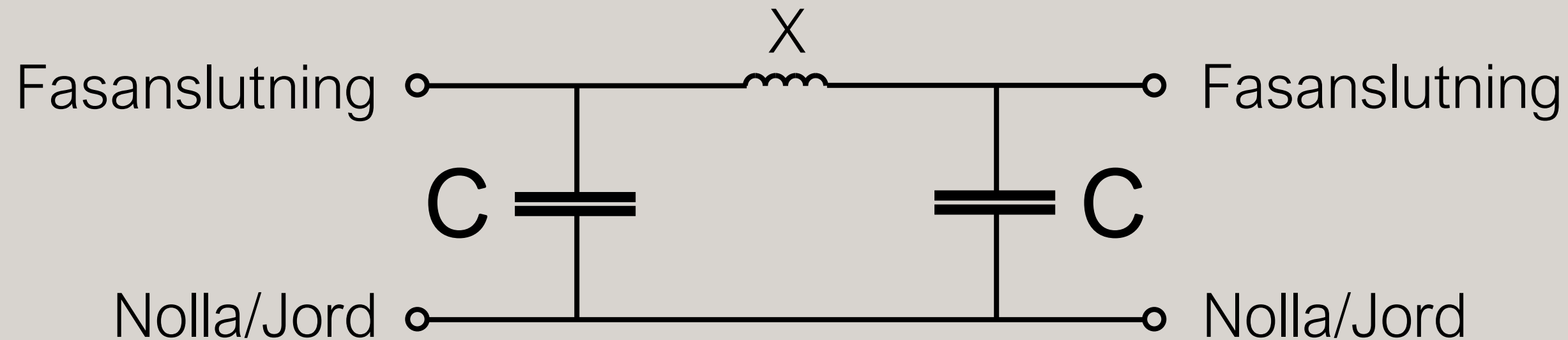


- X drar reaktiv effekt beroende på ström
- C lämnar reaktiv effekt oberoende av ström
- Låg belastning
Ingen ström $\rightarrow$ C dominerar $\rightarrow$ höga spänningar
- Hög belastning
Hög ström $\rightarrow$ X dominerar $\rightarrow$ låga spänningar

Shuntreaktorer
Kraftverk

Shunkondensatorer
Kraftverk

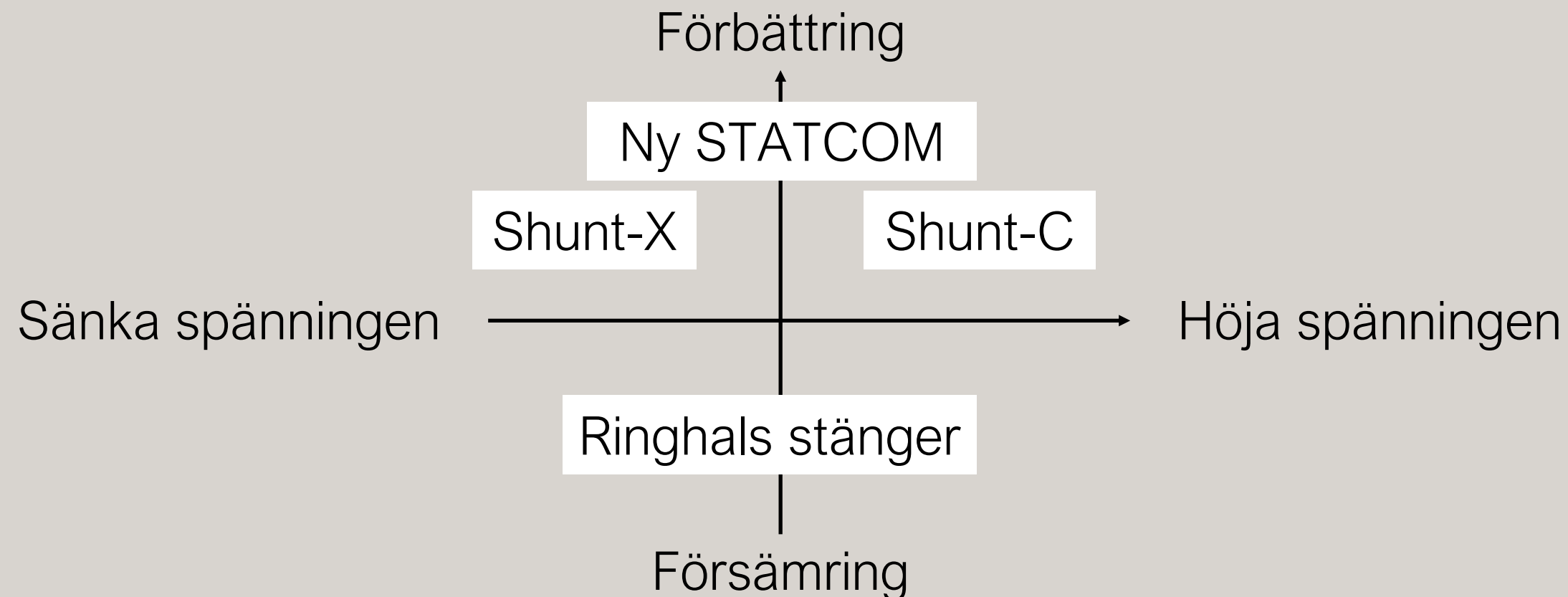
Beräkningsmodell för (förlustfri) jordkabel



- Typiskt 20 gånger större C/km än friledning
- Vid vädersäkring av distributionsnät byts friledning mot kabel
- Export av reaktiv effekt från distributionsnät stor utmaning för Svk

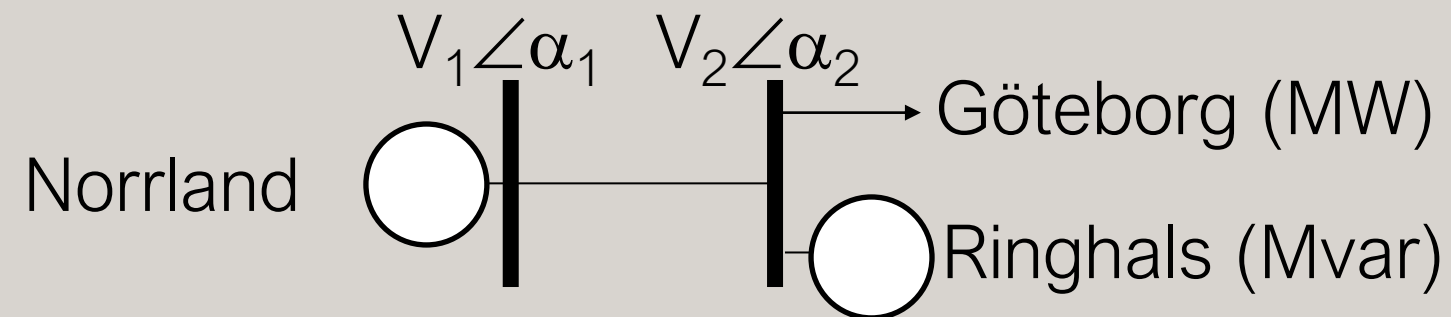
Förändringar reaktiv effekt

- Ringhals 1 och 2 stänger
- Svk bygger STATCOM i Stenkullen
- Svk installerar shuntkondensatorer i Strömma, Borgvik, Skogssäters
- E.ON installerar 6 x 50 Mvar shuntreaktorer

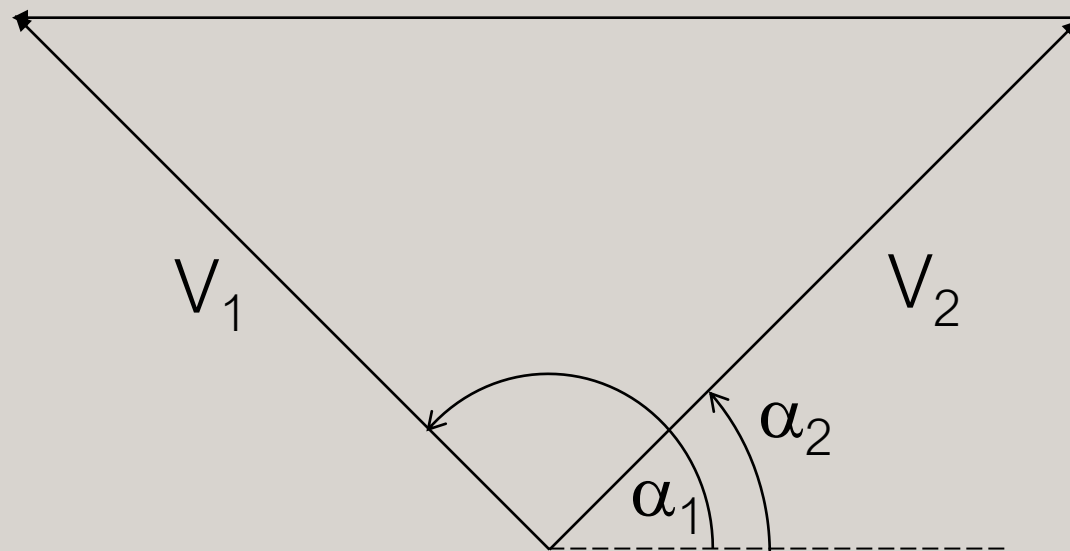


Maxöverföring beror av ”spänningsstöd”

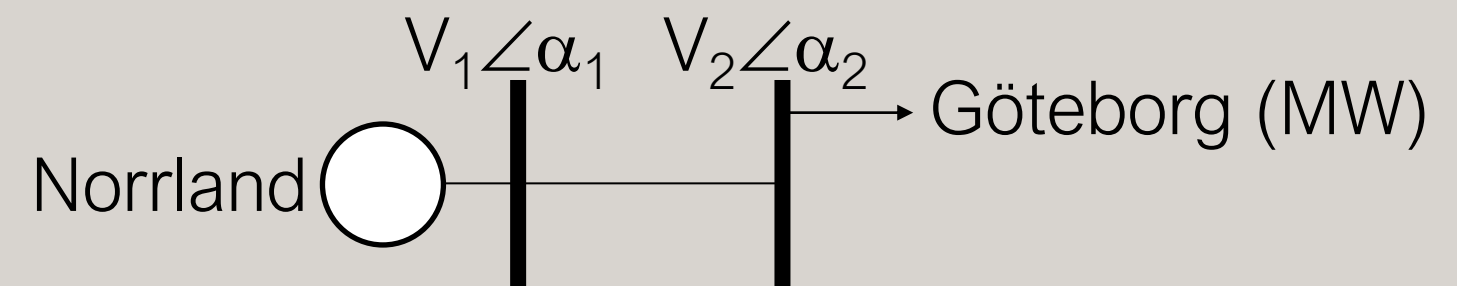
- Norrland-Göteborg med Ringhals



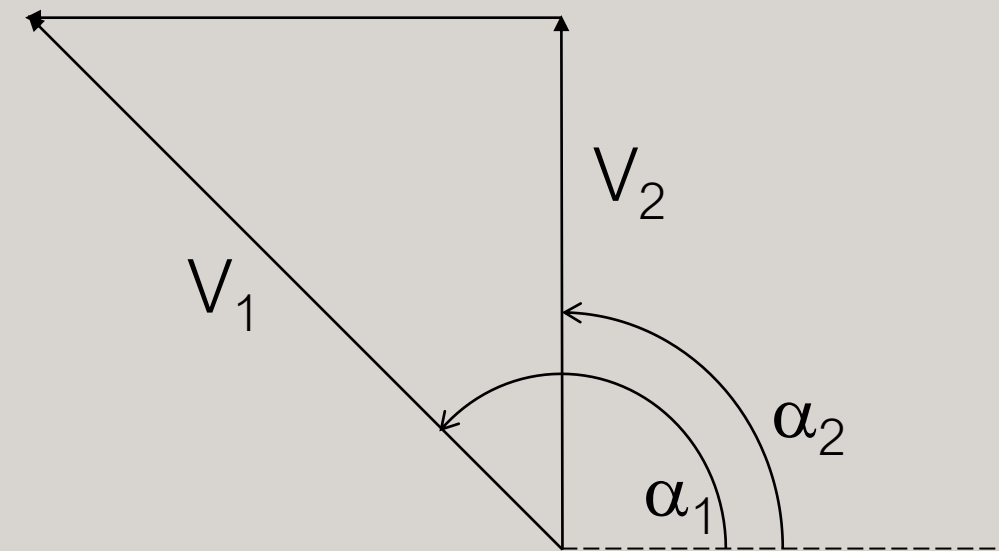
- Teoretisk gräns $P_{max} = \frac{V_1 V_2}{X}$



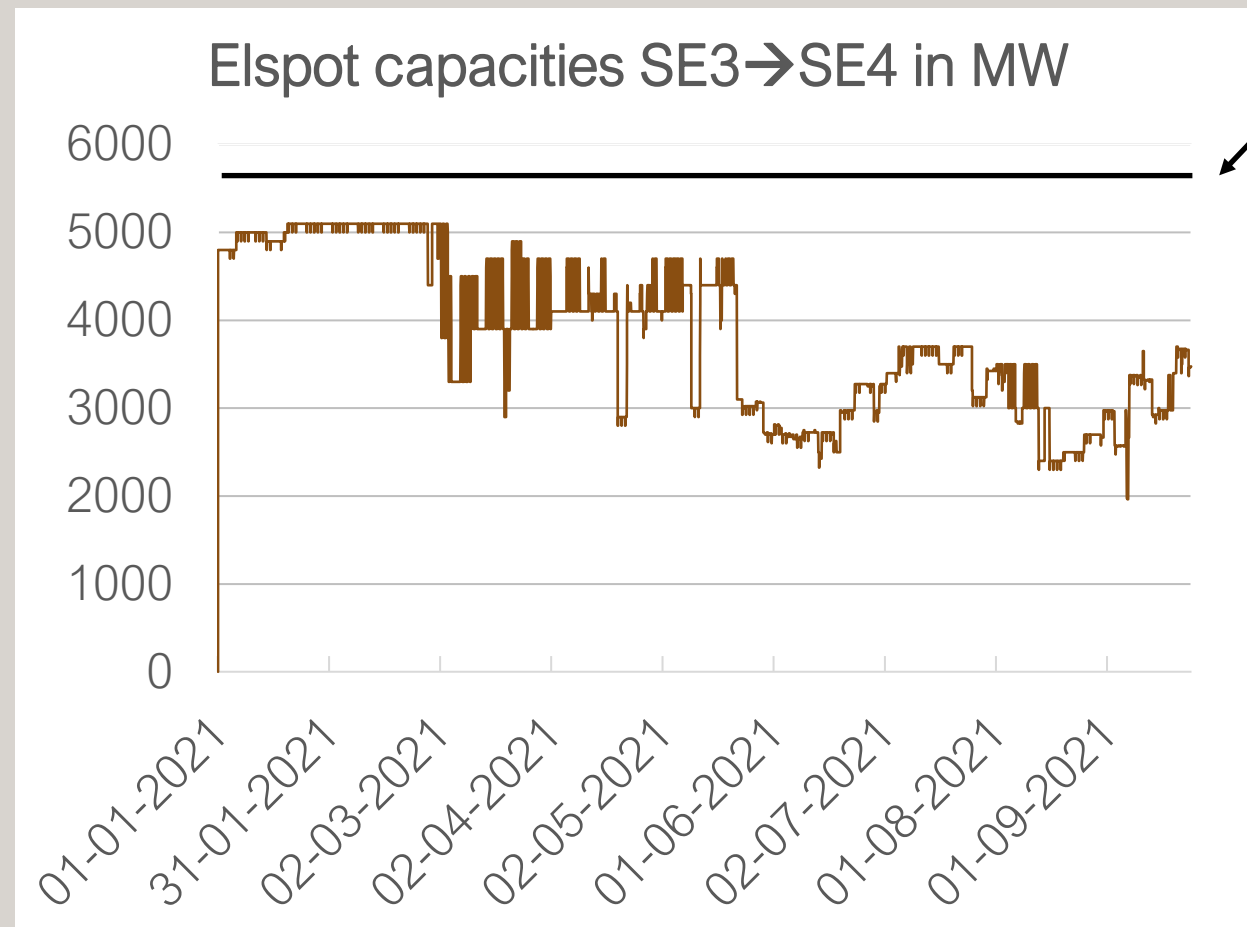
- Norrland-Göteborg utan Ringhals



- Teoretisk gräns (spänningsstabilitet) $P_{max} = \frac{V_1 V_2}{2X}$



Överföringskapacitet SE3→SE4



- Byggda 400 kV-ledningar kan överföra 5500 MW, men tillgänglig kapacitet oftast lägre:
- En fråga om ström – antal kraftledningar i drift
Många ur drift vid underhållsarbete på sommaren
Svenska Kraftnät vill bygga fler
Sydvästlänken välkommet tillskott
- En fråga om spänning – tillgång på variabel reaktiv effekt
Kärnkraftverk ur drift vid revision på sommaren
Stängning av kärnkraftverk stor försämring
Sydvästlänken välkommet tillskott
- Sydvästlänkens 2 x 600 MW tillför SE3→SE4 bara 800 MW
Otilräckligt spänningsstöd i Skåne?

Tillförlitlig elöverföring kräver...

- Ledningskapacitet

Krav

- Störningstålig leverans av aktiv effekt

Systemtjänst

- Flexibel aktiv effekt för effektbalansen

Systemtjänst

- Snabb reglering av aktiv effekt för frekvenshållning

Systemtjänst

- Tröghetsmoment (inertia): Buffert innan frekvensregleringen reagerar

Systemtjänst

- Reglerbar reaktiv effekt för spänningshållning

Systemtjänst

- Felströmmar så säkringar/skyddssystem (reläskydd) kan koppla bort fel

Systemtjänst

- Möjlighet för återstart (dödnätsstart/blackstart) och ödrift

Systemtjänster allt viktigare

- Synkrongenerator
Reglerbar aktiv/reaktiv effekt, tröghetsmoment, felström, blackstart
- Vindkraft och solel – bidrar inte idag men skulle kunna

Vindkraft och solel tränger undan synkrongeneratorer – vad göra?

- TSO-investeringar: STATCOM, synkronkompensatorer, VSC-HVDC
- Betala för eller kräva systemtjänster
- Förbrukning (knappast reaktiv effekt) och batterier

Infasade synkrongeneratorer värdefull resurs

- Reglerbar reaktiv effekt, tröghetsmoment, felström, blackstart

Slutsatser

- Tillförlitlig elöverföring förutsätter ledningskapacitet + systemtjänster
- Systemtjänster: frekvensreglering, spänningsreglering, inertia, felström, blackstart
- Elöverföring i transmissionsnätet kan förstås med mekanisk fjäderanalogi
- I transmissionsnätet regleras spänningen med reaktiv effekt
 - Vid höglast behöver reaktiv effekt tillföras
 - Vid låglast behöver reaktiv effekt absorberas
- Reaktiva resurser: shuntar, generatorer, HVDC, SVC, STATCOM
- Spänningsstabilitet begränsar överföringsförmåga – spänningsstöd krävs

Läs mer

- Svenska Kraftnäts driftråd rapporterar kvartalsvis om pågående arbeten och utmaningar <https://www.svk.se/om-oss/sa-styrs-vi/rad/driftradet/>
- "Effective voltage control and operational coordination of regional reactive power resources", Report 2020:692, Energiforsk project Grid interference on nuclear power plant operations. Rapporten



LUNDS
UNIVERSITET

LTH

**LUNDS TEKNISKA
HÖGSKOLA**