

An abstract geometric pattern of thin, light teal lines forming a complex, interconnected network of triangles and polygons, resembling a wireframe or a stylized map, located on the left side of the slide.

ORIENTERING OM HVDC

KCEL uddannelsesdag 2023-03-08

Jens Peter Kjærgaard

HVDC FORBINDELSER I DANMARK



Navn	Type	Konfiguration	Bipol	Retur	DC-sp. kV	MW
Konti-Skan 1+2	LCC	2 x ASM	Ja	Elektrode	285	380+360
Skagerrak 1+2	LCC	2 x ASM	Ja	Elektrode	250	250+250
Skagerrak 3+4	LCC, VSC	2 x ASM	Ja	Elektrode	350, 500	500+700
COBRACable	VSC	SM			+/-320	700
Storebælt	LCC	ASM		Metallisk retur	400	600
Kontek	LCC	ASM		Elektrode	400	600
Kriegers Flak	VSC	BtB			150	400
Viking Link	VSC	Ridgid BP	Ja	Omk. for MP drift	+/-515	700+700

LCC: Line Commutated Converter

VSC: Voltage Source Converter

ASM: Asymmetrical monopole

SM: Symmetrical monopole

BP: Bipole

BtB: Back-to-Back converter

HVDC TEKNOLOGIER

- Line Commutated Converter – LCC
 - Kaldes også konventionel eller klassisk HVDC
 - Har været anvendt siden 1954:
 - 1954 – ca. 1970: Kviksølventiler
 - Efter 1970: Tyristorer
- Voltage Source Converter – VSC
 - Har været anvendt siden 1997
 - Baseret på transistorer (IGBT)
 - Hver leverandør har givet denne ”nye” teknologi forskellige navne:
 - Hitachi: HVDC Light
 - Siemens: HVDC Plus
 - GE: HVDC MaxSine

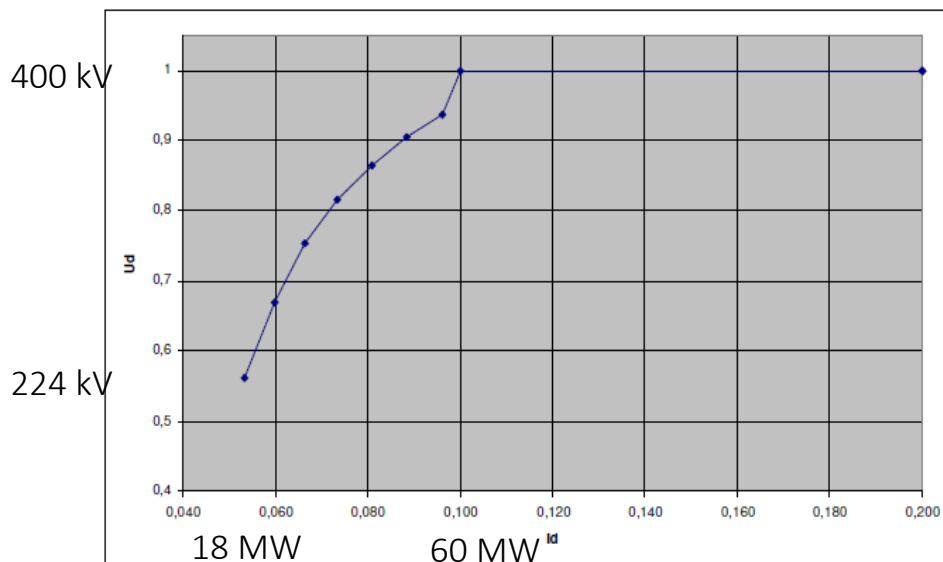


SAMMENLIGNING LCC OG VSC

	LCC	VSC
Kontrol af aktiv effekt	(+)	+
AC spændingsregulering	Kobl. AC-filtre (RPC)	PQ-diagram
Svagt AC net	-	+
Black net start	-	+
Multi-terminal/DC-net	-	+
Semiconductor	Tyristor	IGBT
DC kabler	MI (olie-papir) (Kontek: 50Hz PEX)	PEX
Kommuteringsfejl	Ja	Nej
Skifte effektretning	Skifte polaritet	Skifte strømretning

LCC – MINIMUM EFFEKT

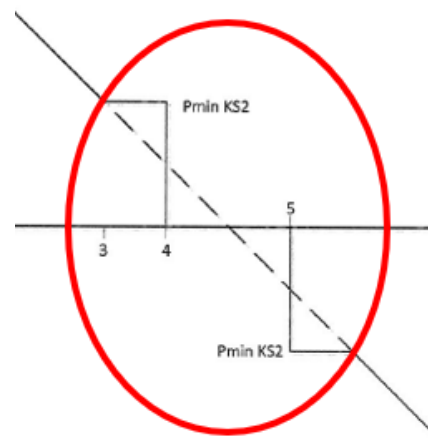
- Typisk 10% af P_n
- Danske HVDC anlæg (undtagen SK12): 3% af P_n



Reduktion af DC-spænding på SB under 60 MW

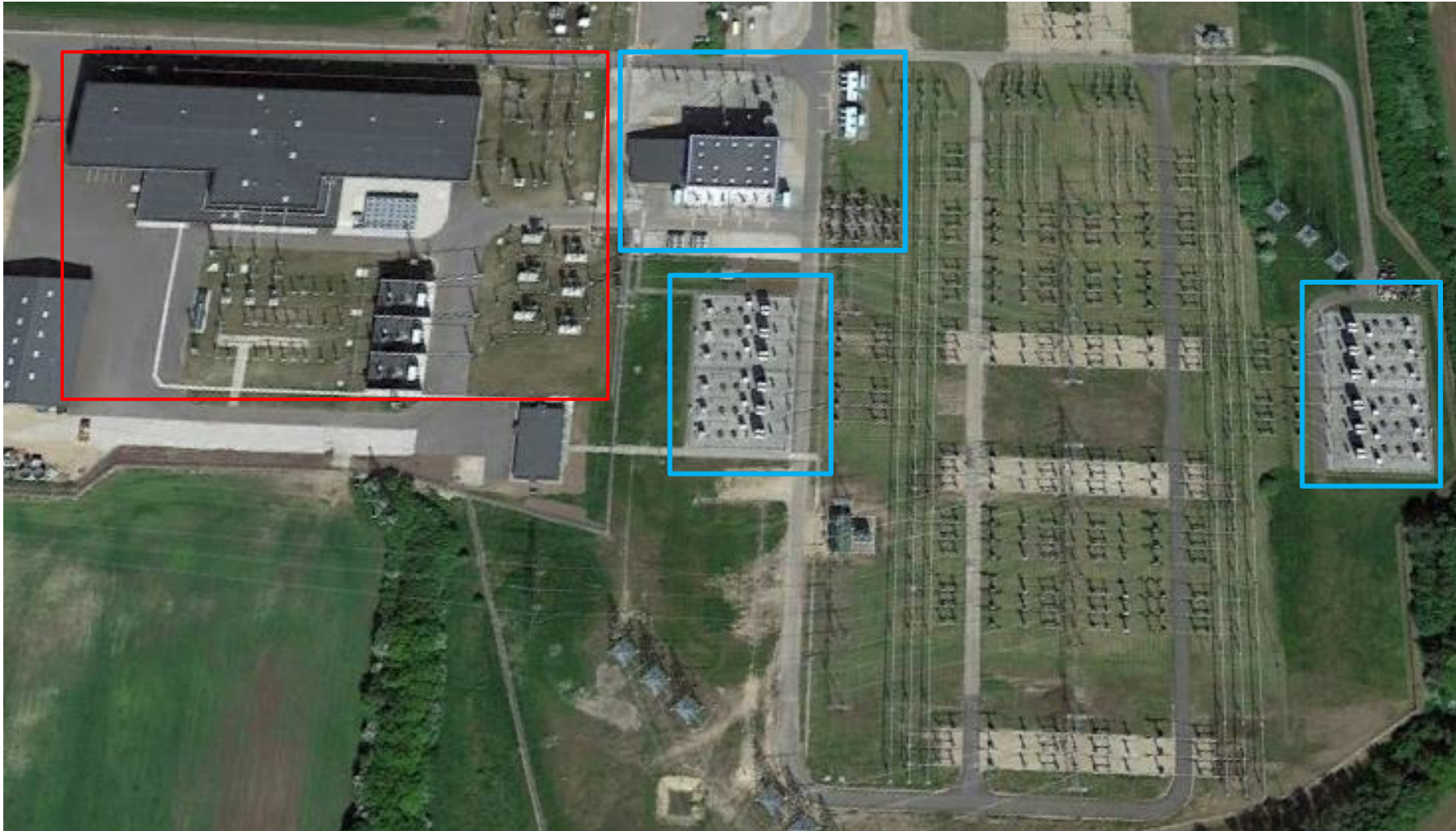
Navn	P_n [MW]	P_{min} [MW]
Konti-Skan 1	380	11,4
Konti-Skan 2	300	9
Skagerrak 1	250	25 ¹⁾
Skagerrak 2	250	25 ¹⁾
Skagerrak 3	440	13
Storebælt	600	18 ²⁾
Kontek	600	18

- 1) SK12 kan køre i soft-mode med $P_{min} = 1$ MW
- 2) Under 60 MW bliver DC-spændingen reduceret på SB.



Deblokerer/blokerer når effektordre er større/mindre end 50% af P_{min}

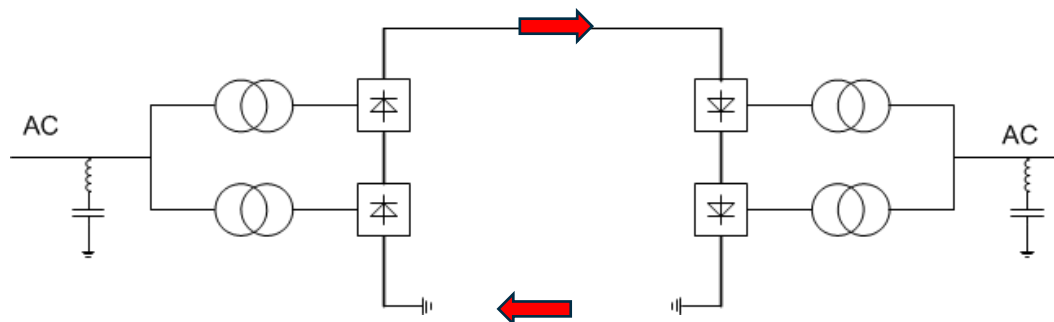
FOOT PRINT LCC OG VSC



VSC: Stor bygning

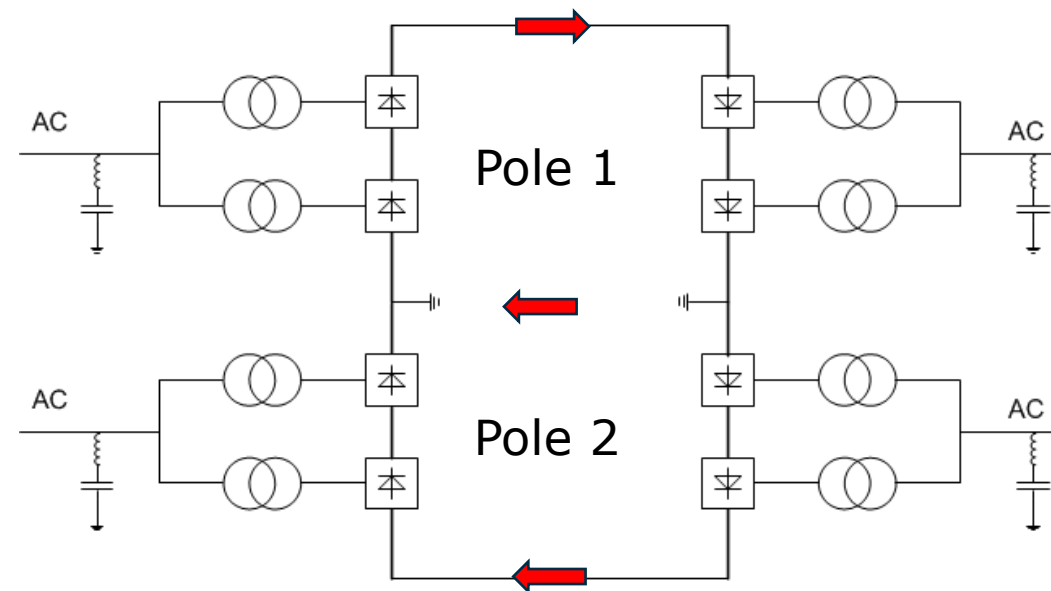
LCC: AC-filtre

LCC KONFIGURATIONER



Monopol med jordretur: Kontek

Monopol med metallisk retur: Storebælt

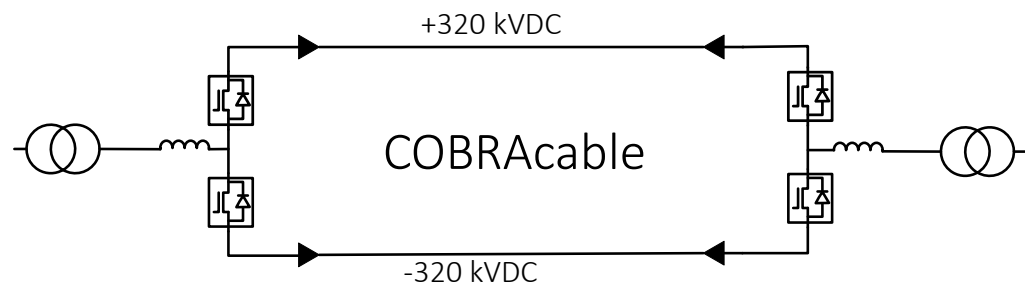


Bipol med mulighed for jordretur:

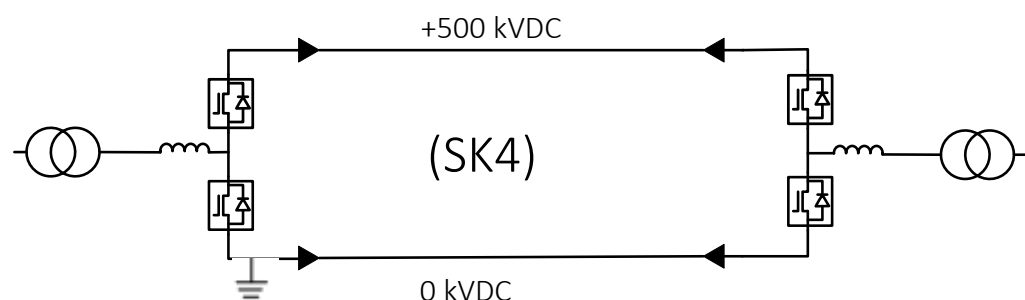
- Skagerrak 1+2, Skagerrak 3+4,
- Konti-Skan 1+2
- Bipoldrift: Ingen strøm i jorden

VSC TOPOLOGIES

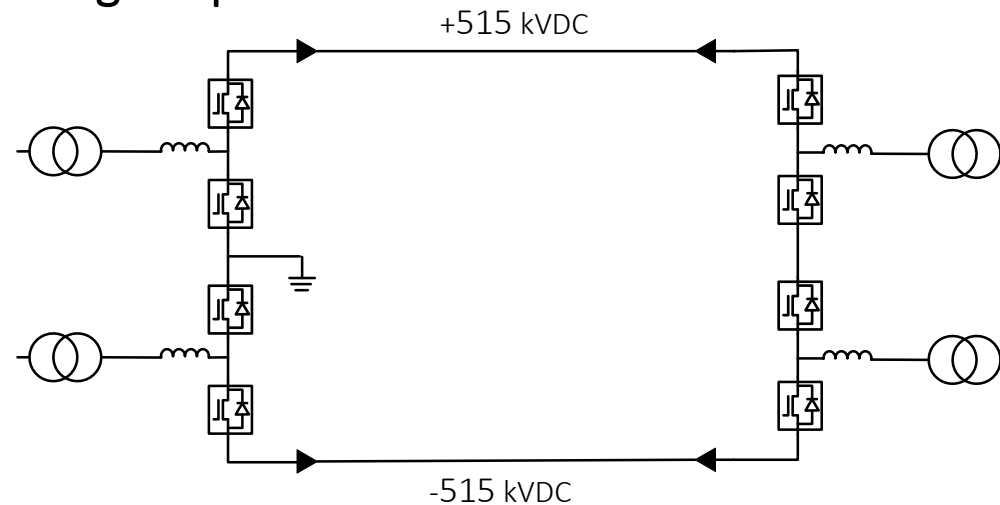
Symmetrical monopole



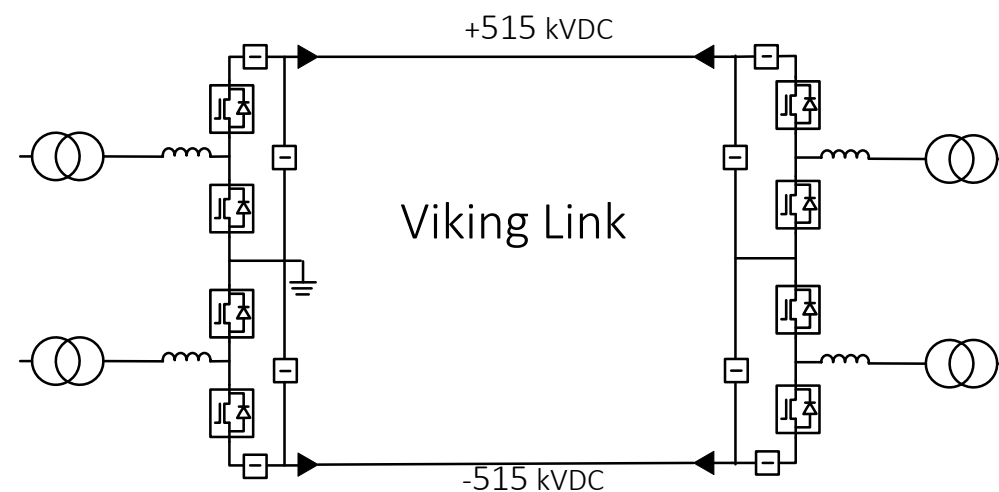
Asymmetric monopole



Rigid bipole

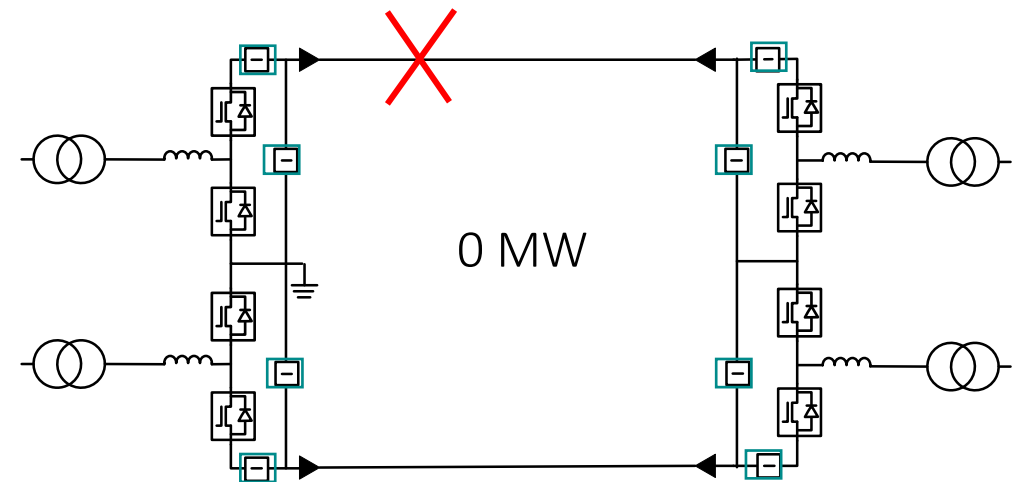
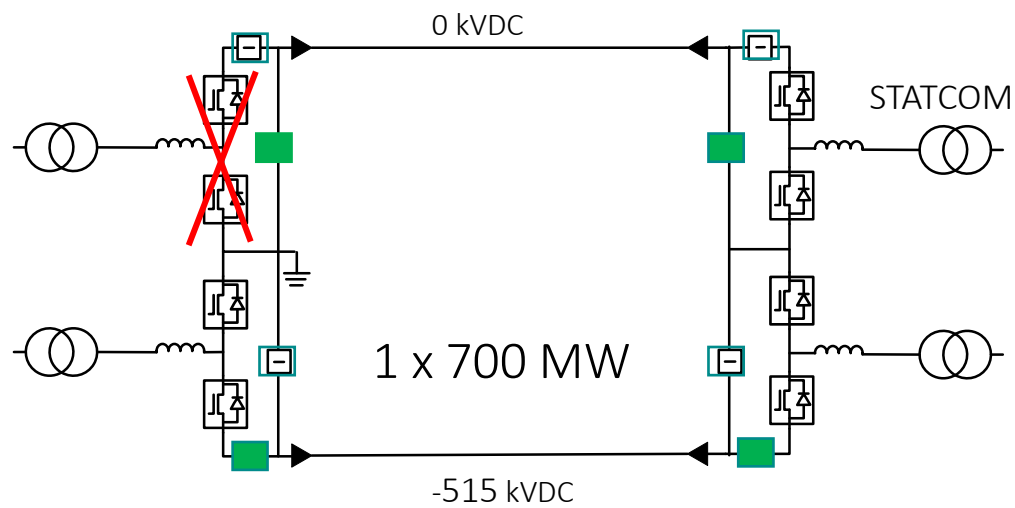
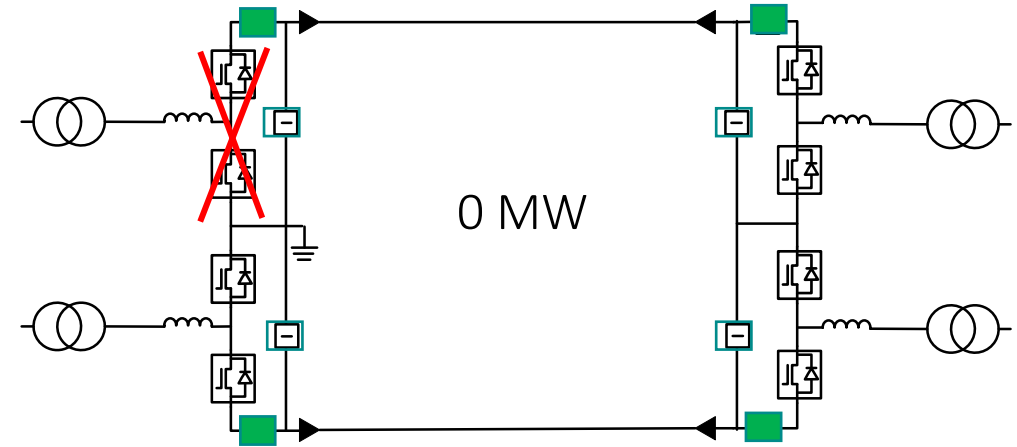
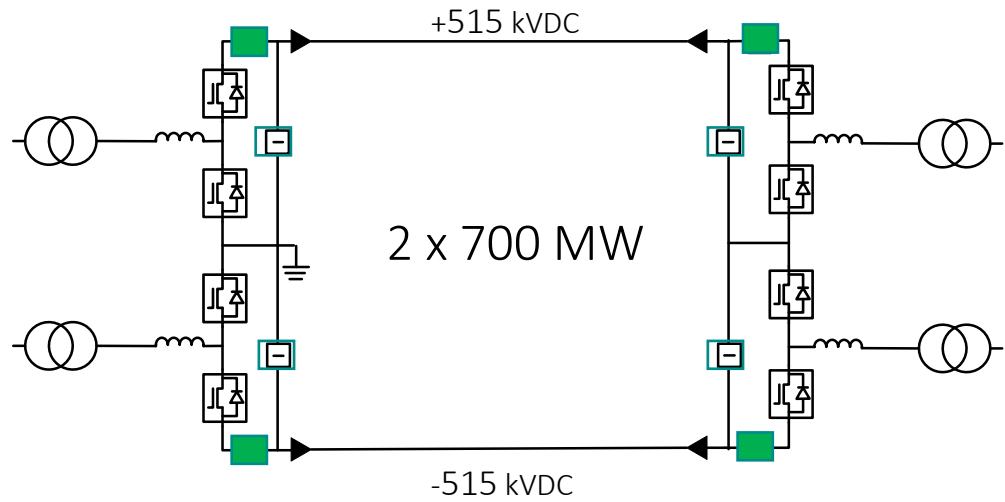


Rigid bipole with HSS for monopolar operation



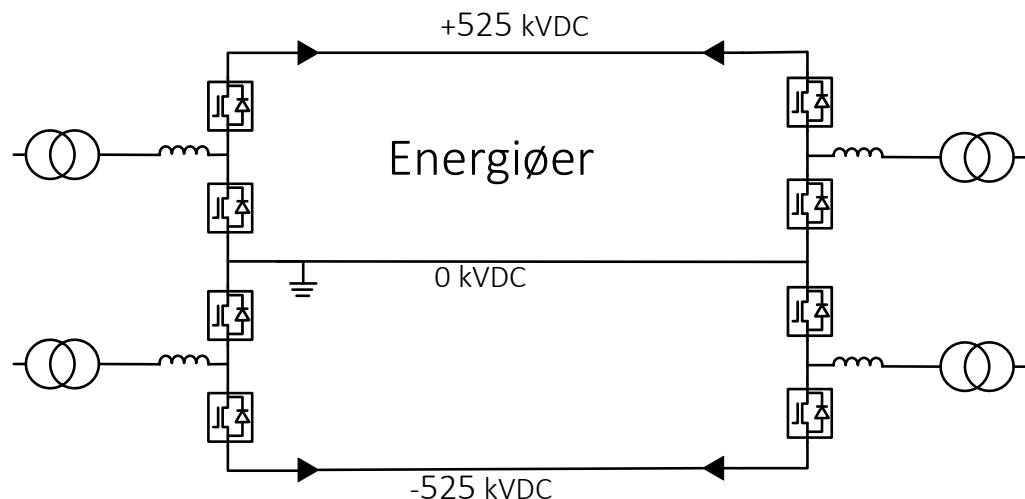
VIKING LINK

Rigid bipole with HSS for monopolar operation



ENERGIØER

Bipole with metallic return



Bipol med metallisk retur:

- Konverterfejl: En pol udkobles
- Kabelfejl
 - Polkabel: En pol udkobles
 - Returkabel: Ridgid bipol (balancering af effekten: Parallelkobling af konverterne på AC-siden)
 - Mere end 1 kabel: Begge poler udkobles

Bundling af kablerne?

- Billigste installation
- Øget risiko for ødelæggelse af >1 kabel

<p>Option 1</p>	<p>Option 2</p>	<p>Option 3</p>	<p>Option 4</p>
<p>Bundled</p>	<p>Unbundled with two metallic returns</p>	<p>Unbundled with one metallic return (one pole separated from other pole and DMR)</p>	<p>Unbundled with one metallic return (DMR separated from plus and minus)</p>

Bundlede kabler SKAL anvendes i tysk farvand aht. magnetfelt

CABLE DESIGN

The Viking 525kV HVDC MIND is based on a design with highest commercially available voltage rating with references.

Cable weight approximately

- 16.21kg/m copper
- 10.955kg/m lead
- 7.75Kg/m MI
- 10.392kg/m steel armour

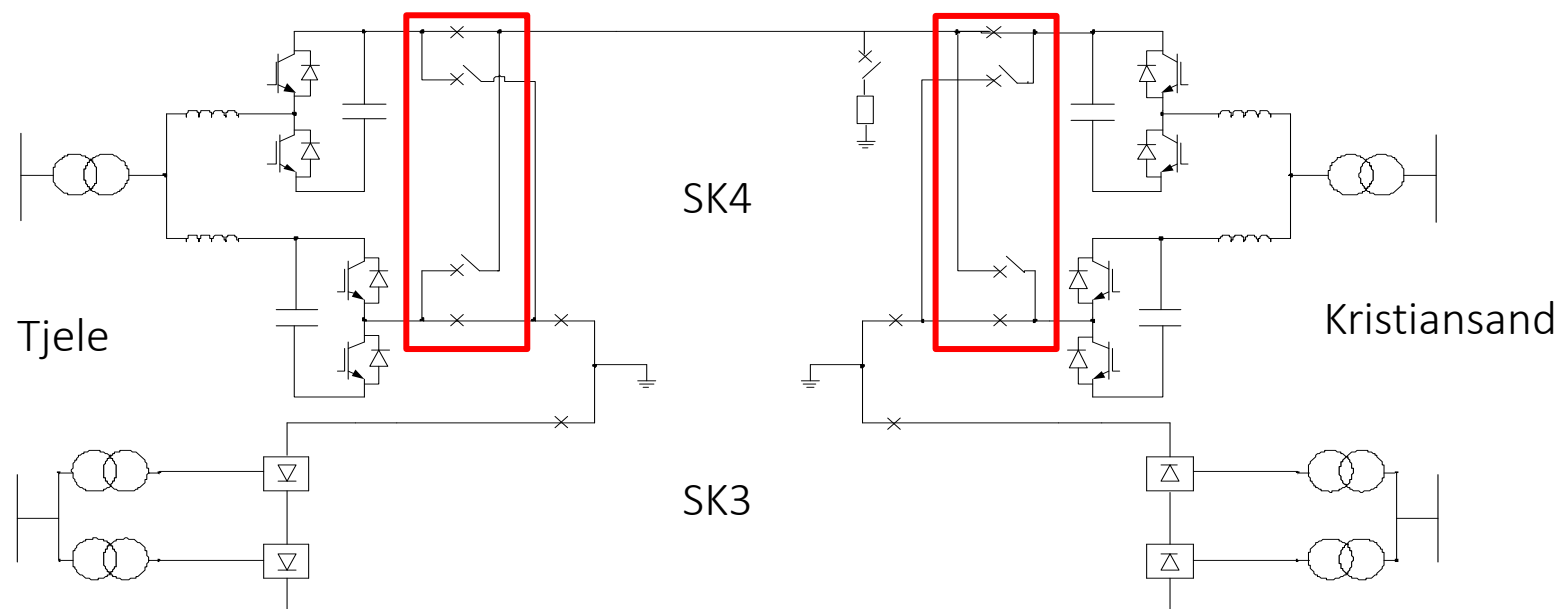


SK4 POLARITETSSKIFTE

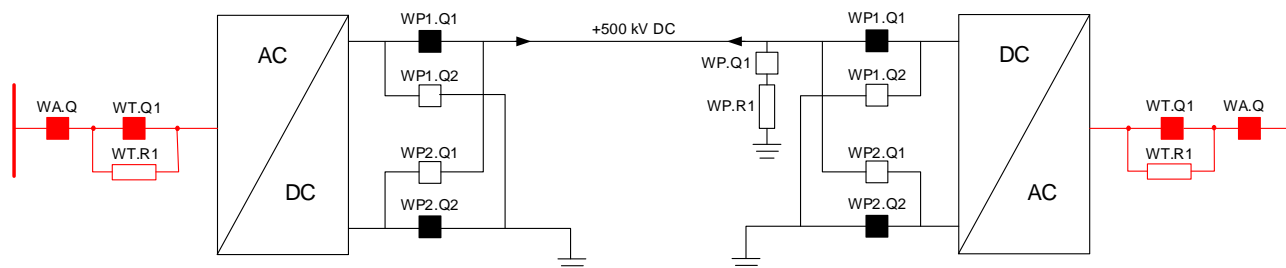
SK3: LCC always same current direction

SK4: VSC always same polarity on the converter

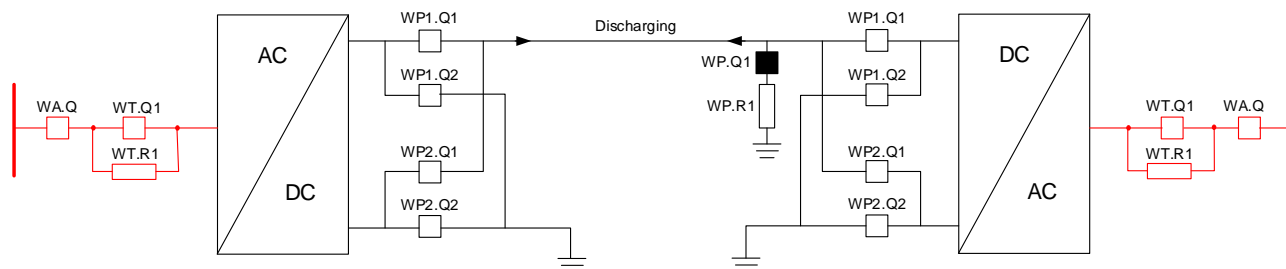
High Speed Switches on DC side to change polarity on SK4 cable due to power reversal



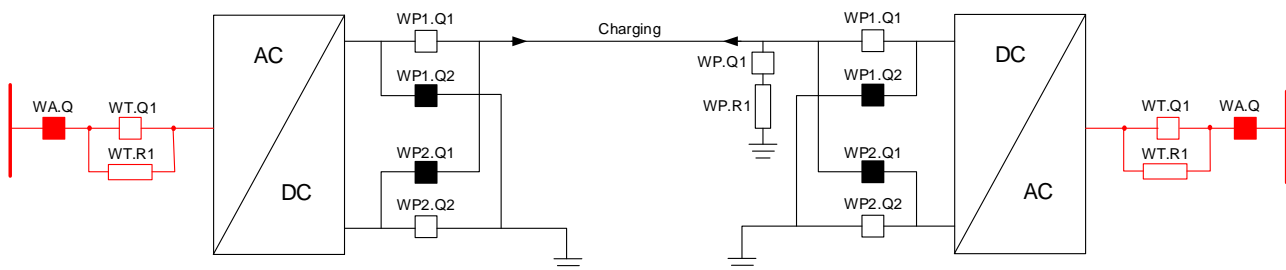
SK4 POLARITETSSKIFTE



Norge → Danmark
+500 kV

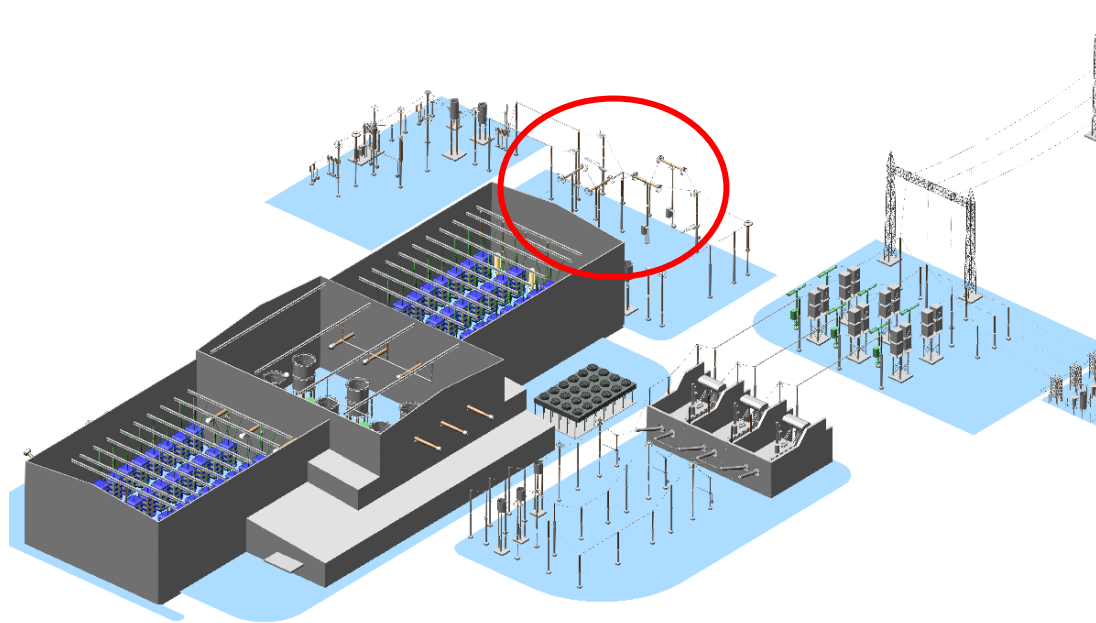


Afladning af kabel



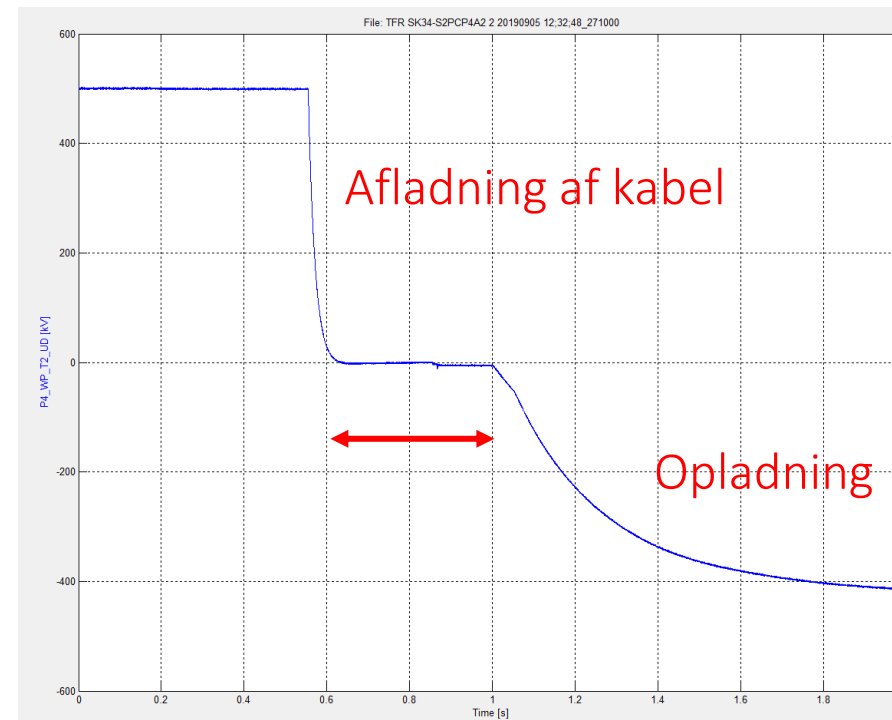
Danmark → Norge
-500 kV

SK4 POLARITETSSKIFTE



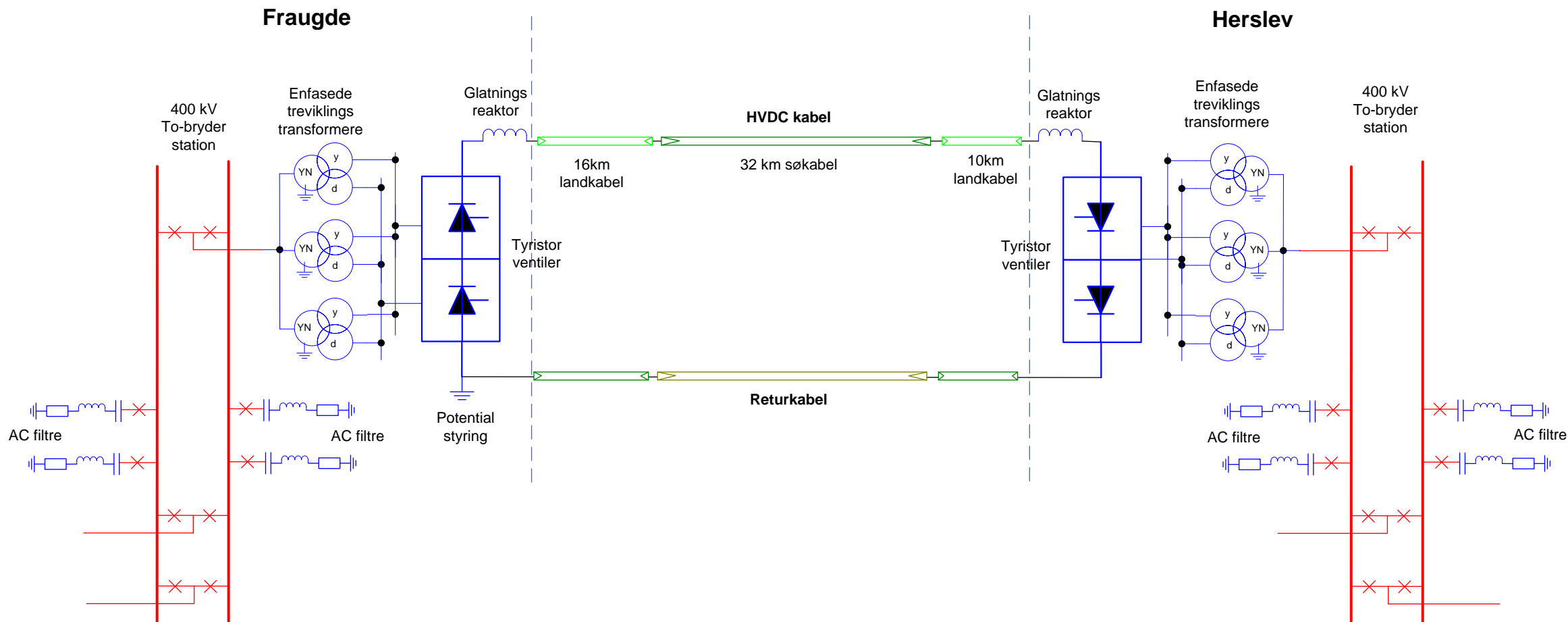
High Speed Switch: 800 kV AC-afbryder
HSS til afladning af kablet i Kristiansand

Polaritetsskifte +500 → -500 kV



Spændingsløse pause øges fra ca. 0,2 s til
2 minutter aht. DC-kablet
(ingen AC-spændingsregulering)

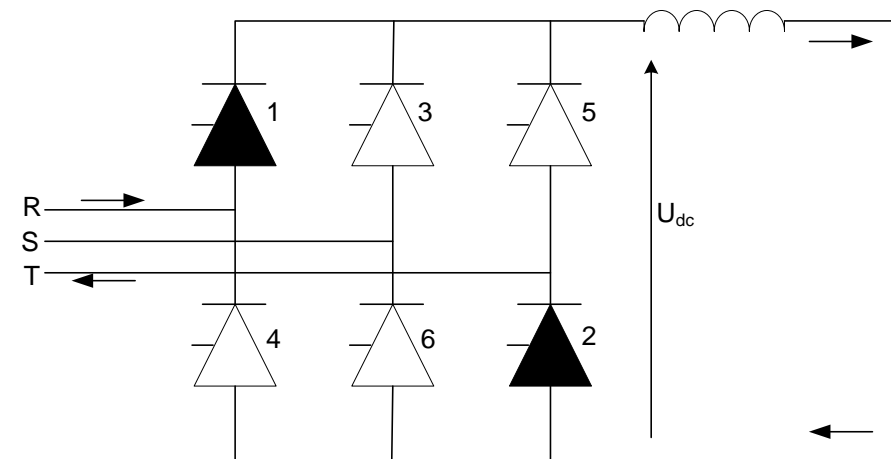
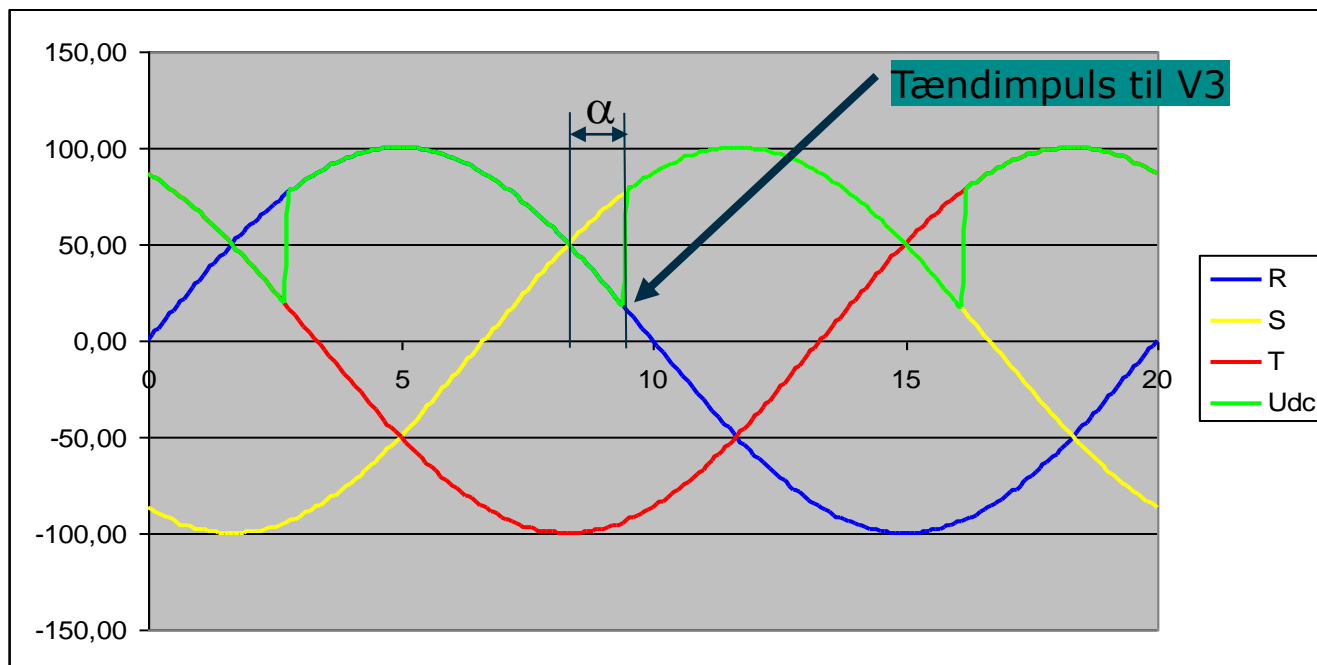
LCC HVDC LINK



TYRISTORVENTILER I VENTILHAL



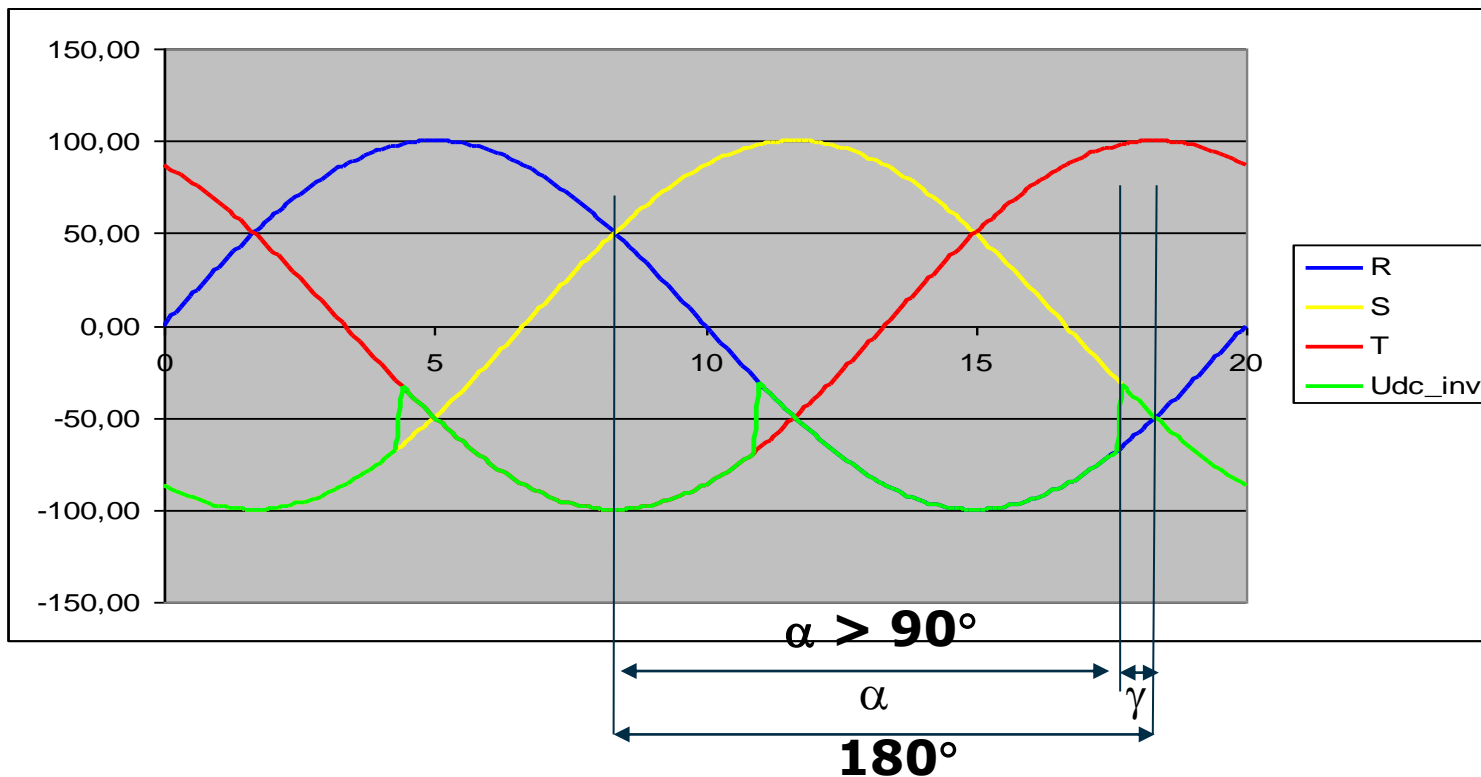
LCC - ENSRETTER



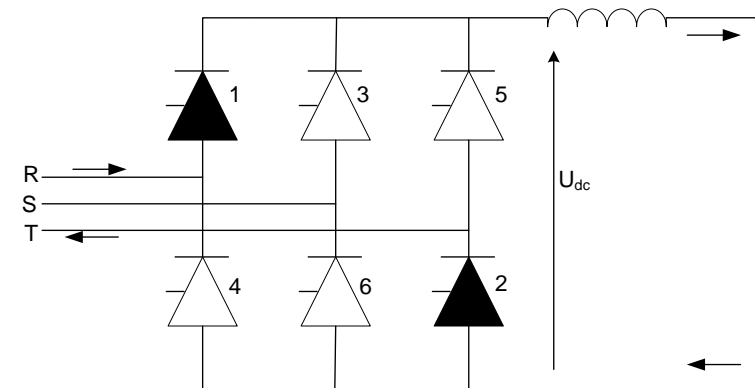
Tyristorer begynder at lede strøm, når den har spænding i lederetning og får en tændimpuls

α er tændvinklen i grader – regnes fra det tidspunkt hvor spændingen er i lederetningen (10-15°)

LCC - VEKSELRETTER



LCC er afhængig af, at AC-spænding er til stede =>
Kan ikke udføre black-start

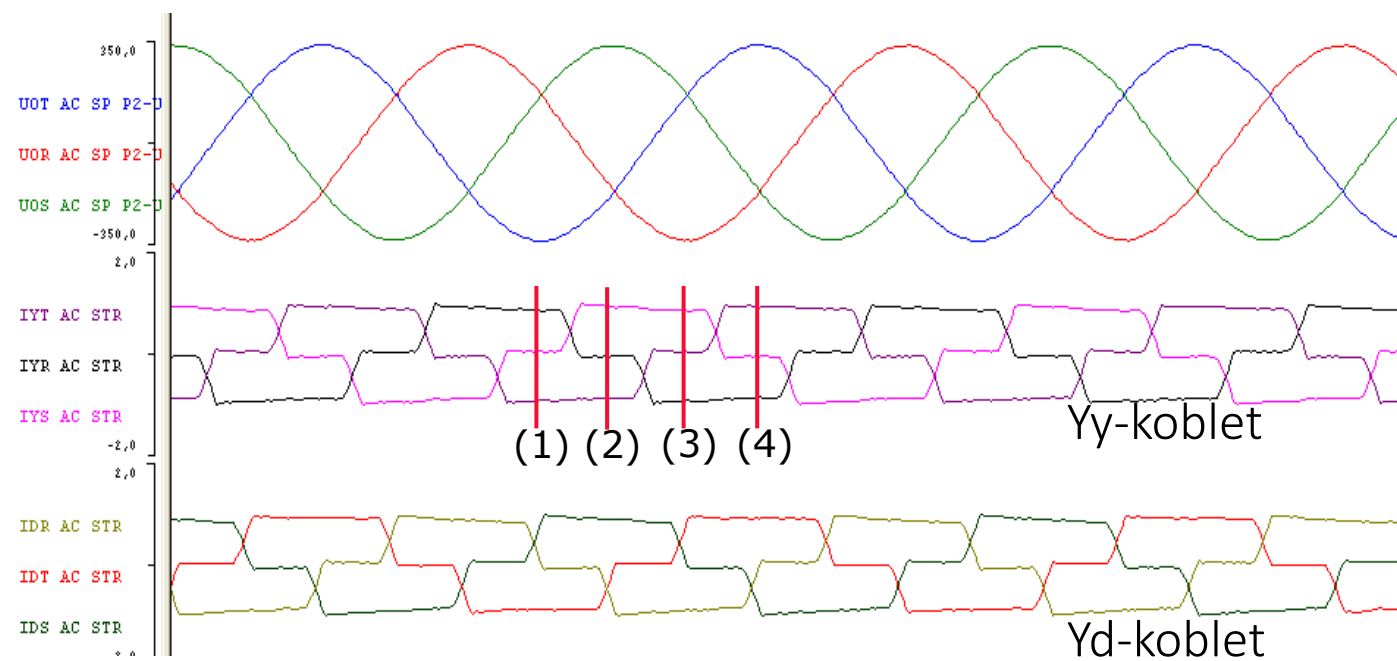
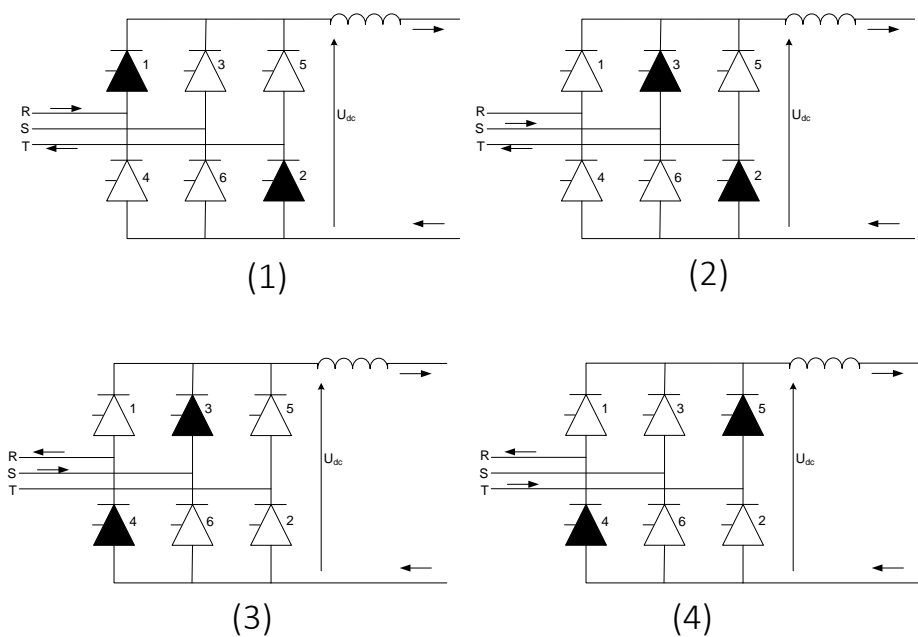


$\alpha > 90^\circ \Rightarrow$ polaritet for U_{dc} skifter

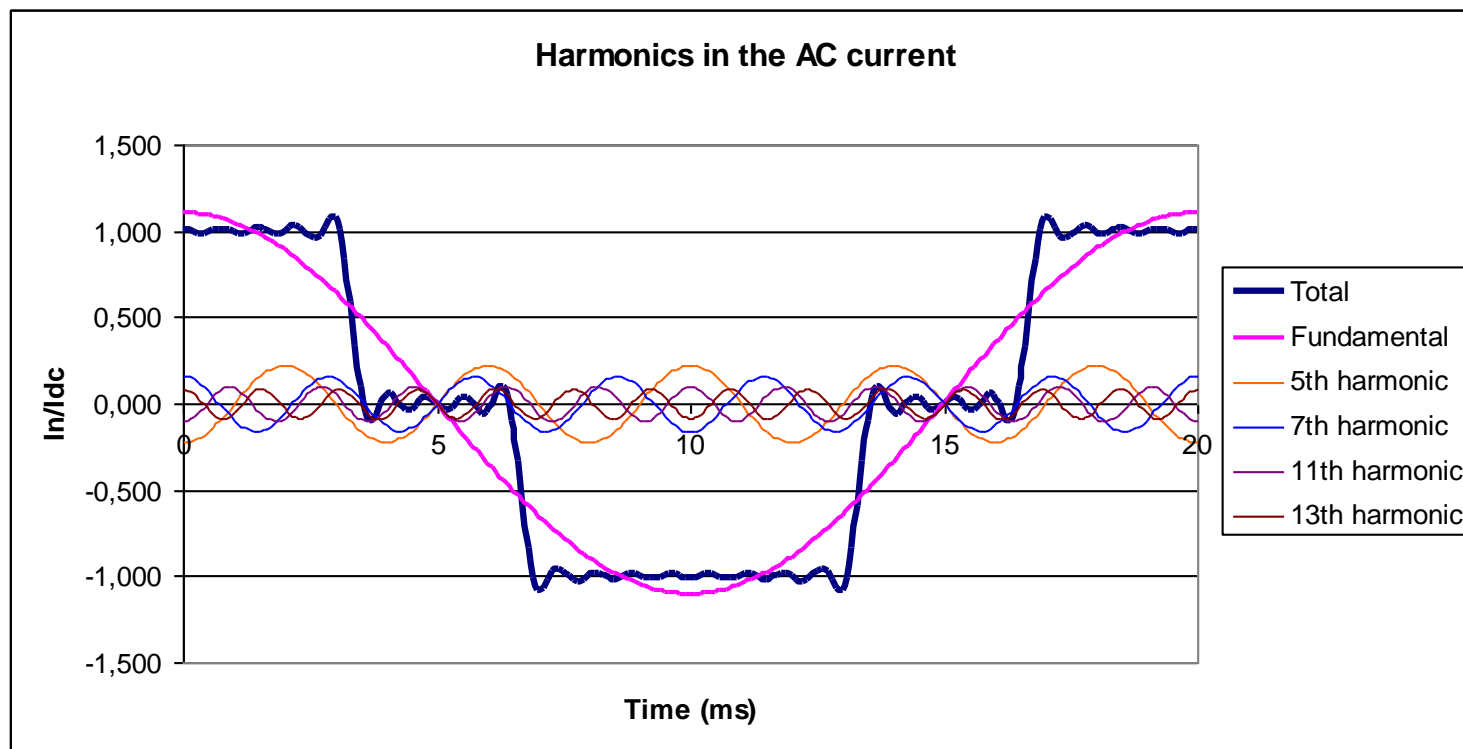
V3 skal tændes før $U_S > U_R$

γ er kommuteringsmarginalen
(15-18°)

LCC – NORMALT KOMMUTERINGSFORLØB

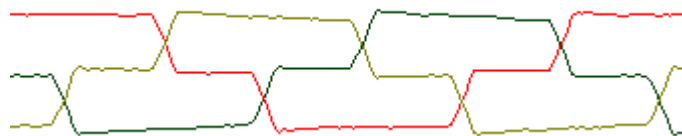


HARMONISKE STRØMME PÅ AC SIDEN



En 6-puls bro genererer harmoniske strømme af orden $6n \pm 1$:

5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25., ...



$$i_{AC, valve}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_{DC} \cdot \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) \dots \right]$$

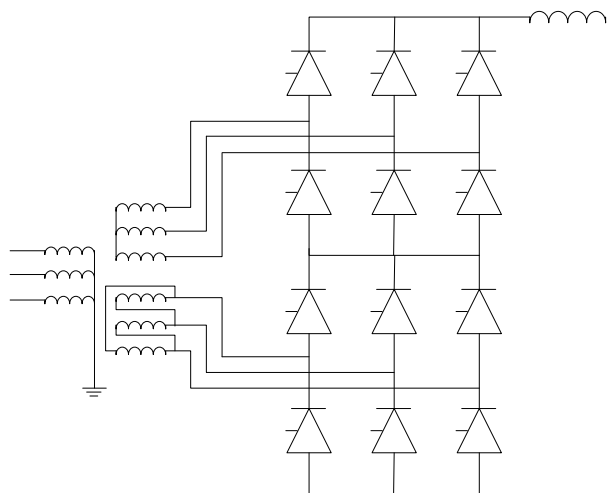
HARMONISKE STRØMME FRA LCC

6-puls bro genererer harmoniske i AC-strømmen:

$6n \pm 1$: 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25., ...

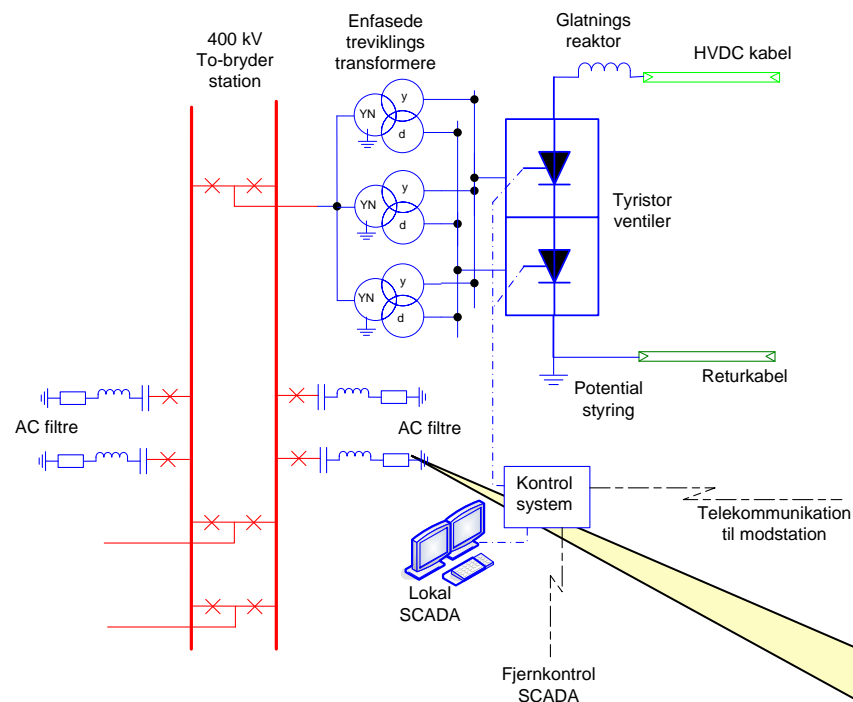
12-puls bro består af to 6-puls broer koblet i serie.

30° faseforskydning mellem spændinger til de to 6-puls broer (Yy og Yd transformere)



Faseforskydningen betyder, at nogle harmoniske udbalancerer hinanden. Harmoniske fra 12-puls bro: $12n \pm 1$: 11., 13., 23., 25., 35., 37. ... Filtre reducerer indholdet af harmoniske.

AC FILTRE - STOREBÆLT



Karakteristiske harmoniske:

11., 13., 23., 25., 35., 37., ...

To triple-tunede filtre: 12., 24., 36.

To dobbelt-tunede filtre: 3., 12.

Hvert filter producerer 87 Mvar (420kV)

AC-filtre

Reducerer højere harmoniske

Leverer reaktiv effekt til konverteren

Ind-/udkobles afhængig af aktive effekt
(reaktiv effekt = 40-60% af aktiv effekt)

REACTIVE POWER CONTROL

RPCen skal automatisk ind-/udkoble AC filtre for at opfylde forskellige krav

Afhængig af, hvilken effekt der overføres på HVDC forbindelsen:

- ABSMIN FILTER: Mindste antal filtre for at undgå overbelastning af filtre
- MIN FILTER: Mindste antal filtre for at overholde krav til højere harmoniske

ABSMIN og MIN FILTER kan kun medføre **indkobling** af filtre

Afhængig af om 400 kV spændingen er lav/høj (U-kontrol)

- Ind-/udkoble filtre
- Ud-/indkoble reaktor

Udkobling sker pga. U-/Q-kontrol

Afhængig af om der er underskud/overskud af reaktiv effekt (Q-kontrol)

- Ind-/udkoble filtre
- Ud-/indkoble reaktor

Problem med høje 400 kV spændinger:

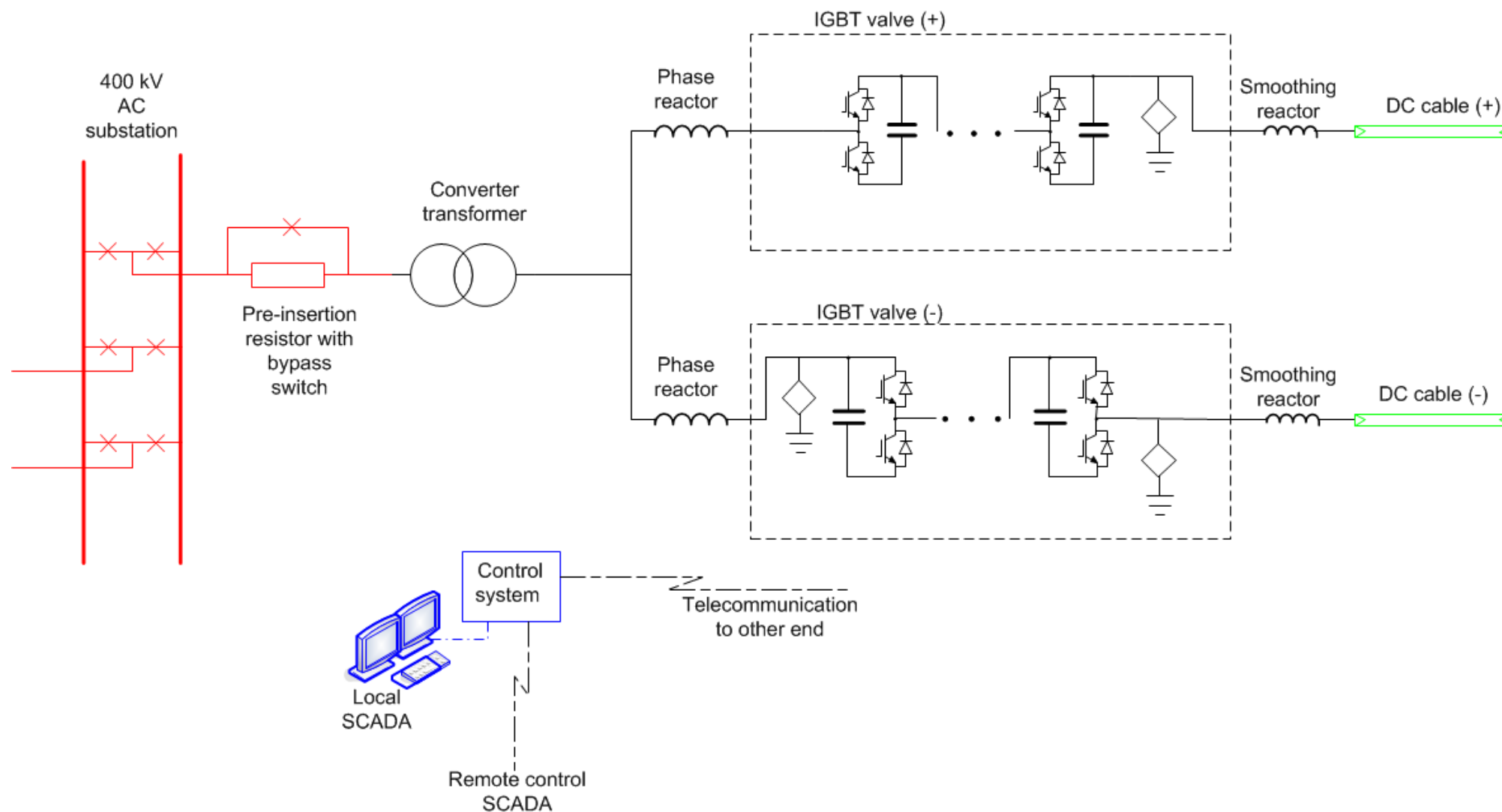
- U-kontrol: Sætte lav værdi for U-ref
- Q-kontrol: Sætte negativ værdi for Q-ref

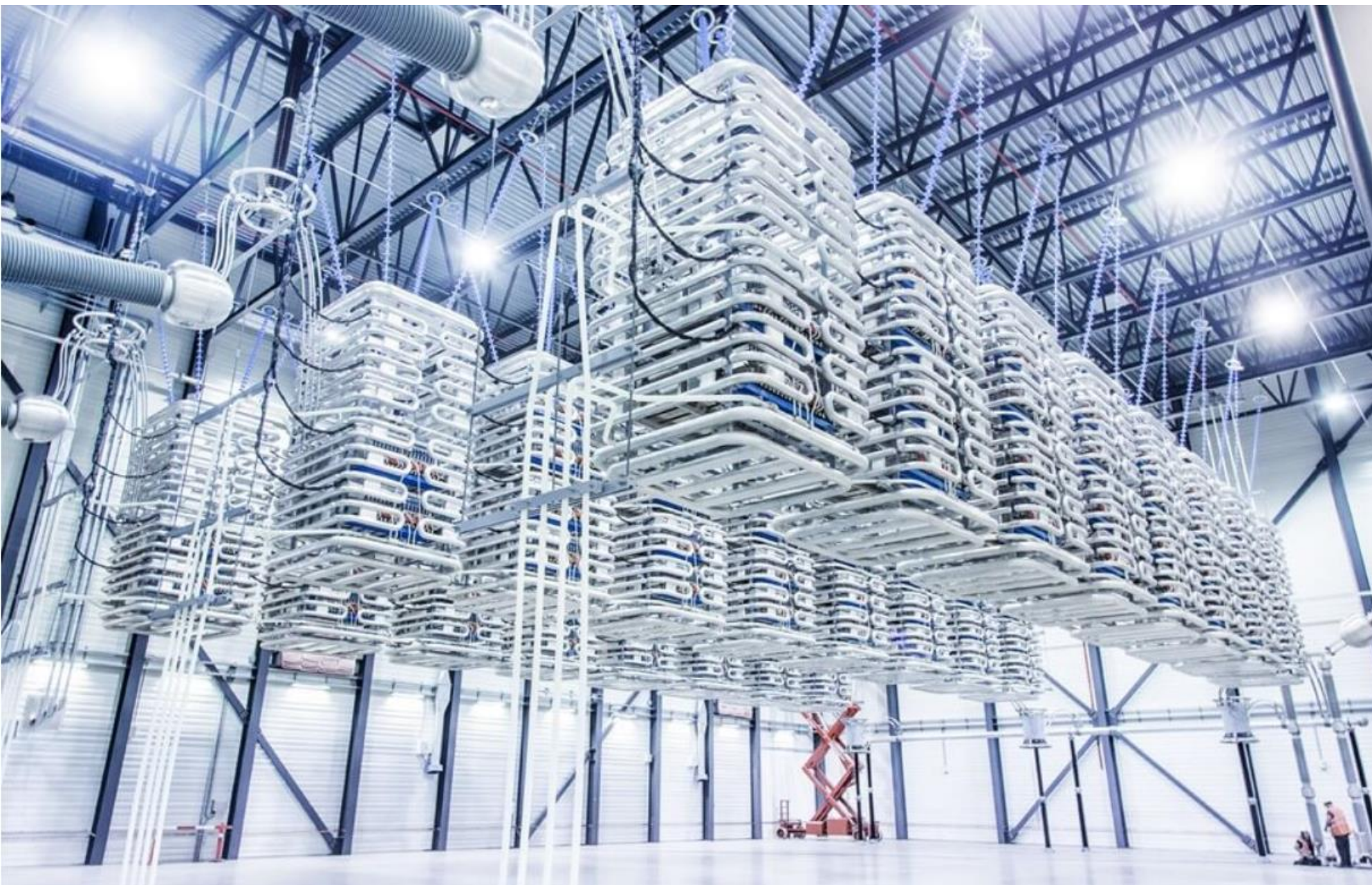
Ikke sikkert det hjælper, for ABSMIN og MIN FILTER har højere prioritet

LCC - SYNKRONKOMPENSATOR



VSC - HOVEDKOMPONENTER

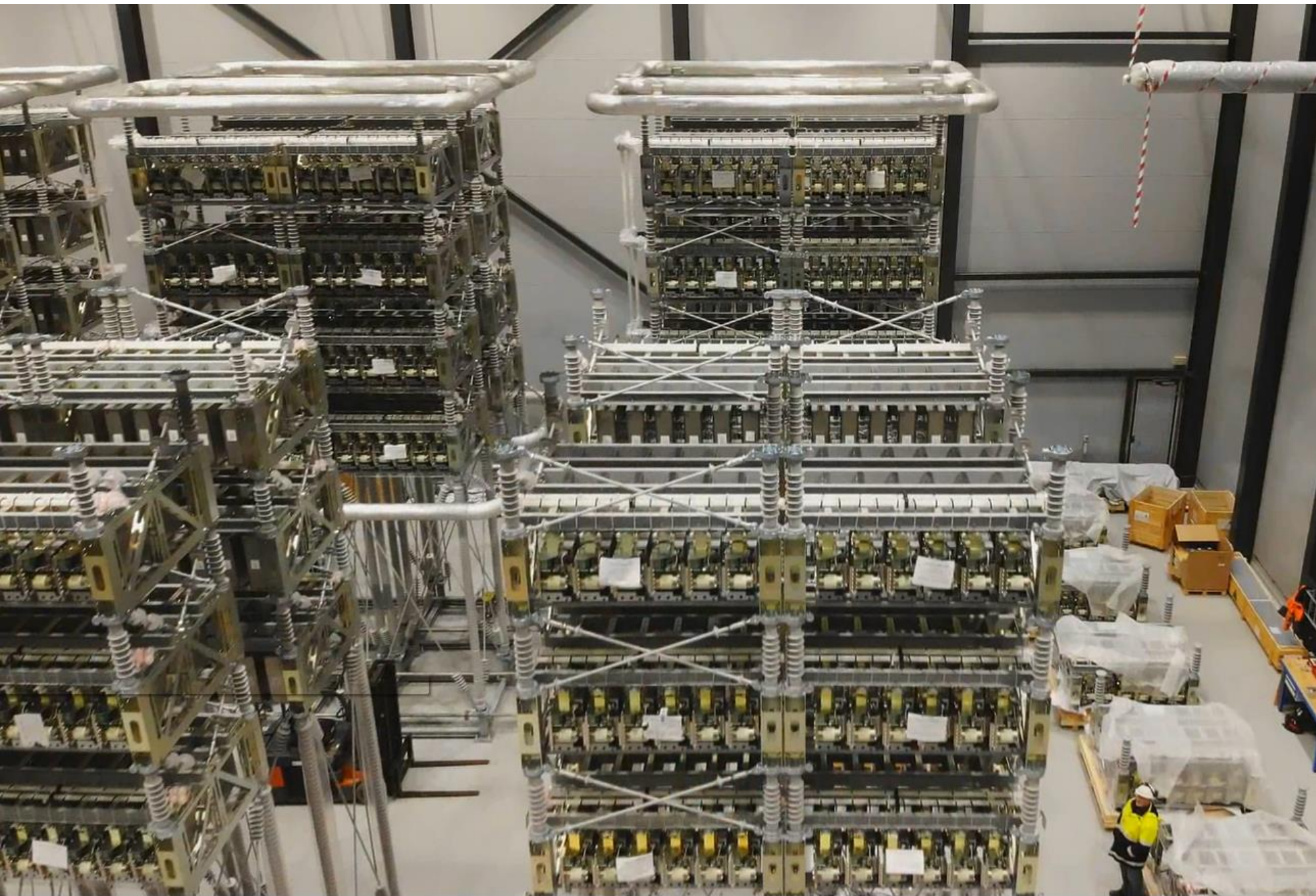




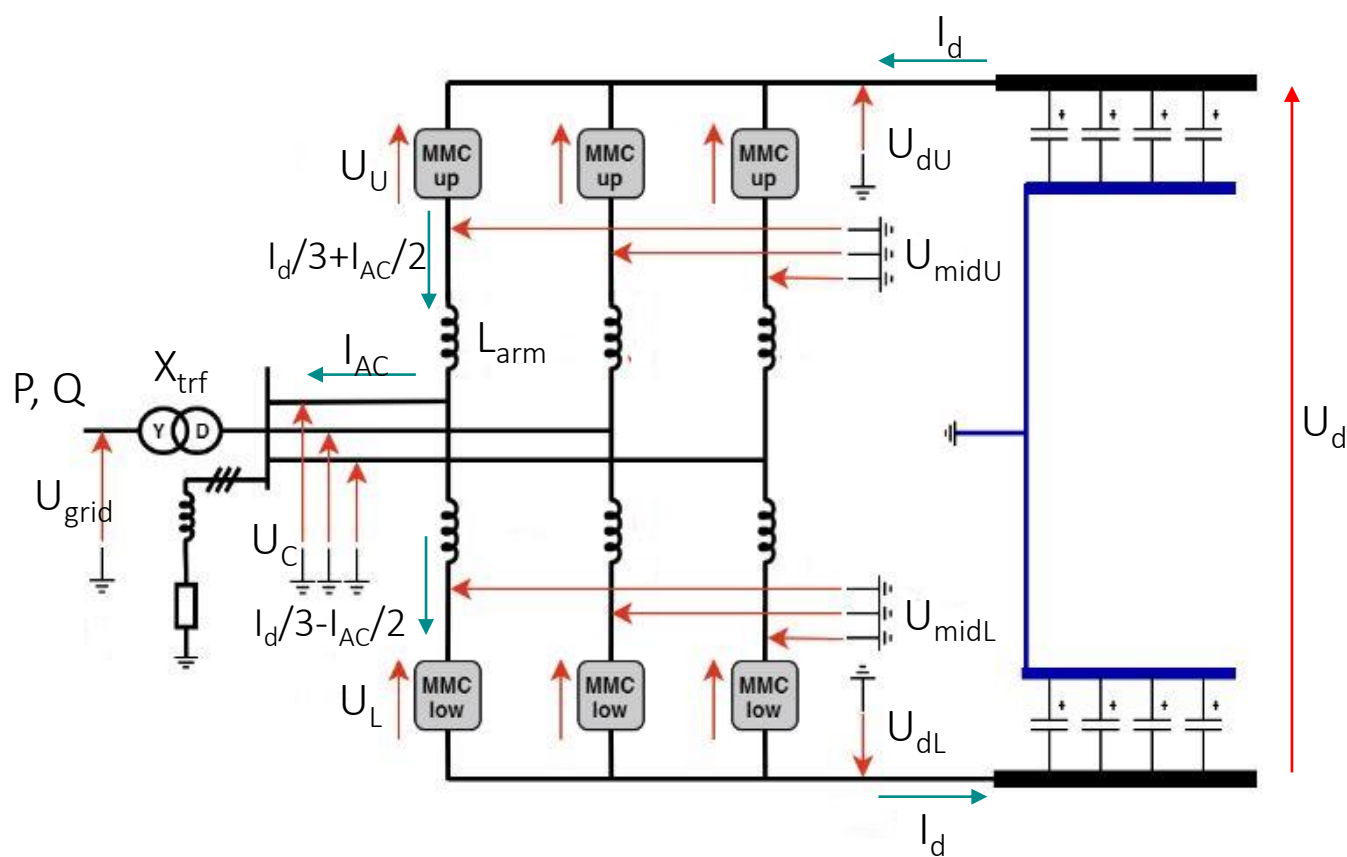
HVDC LIGHT
HITACHI
GEN. 4

ENERGINET

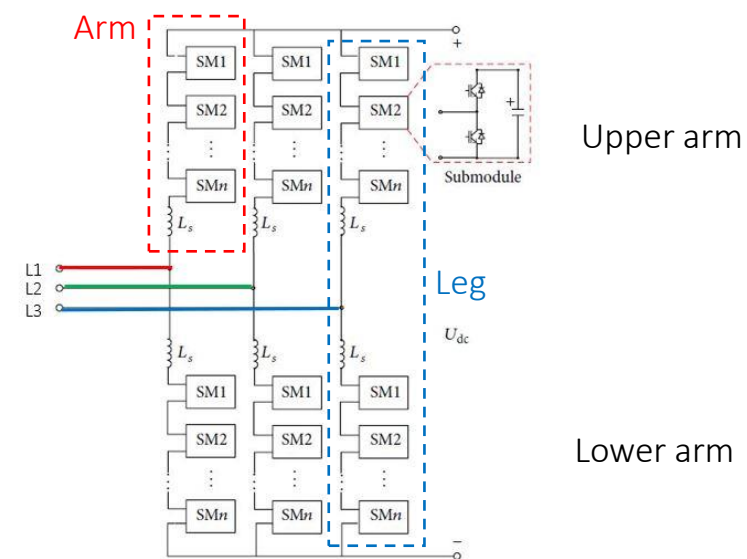
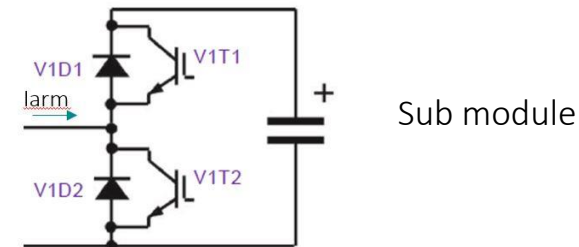
COBRACABLE,
SIEMENS
HVDC PLUS



VSC MMC KONVERTER

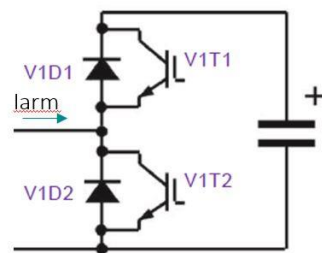
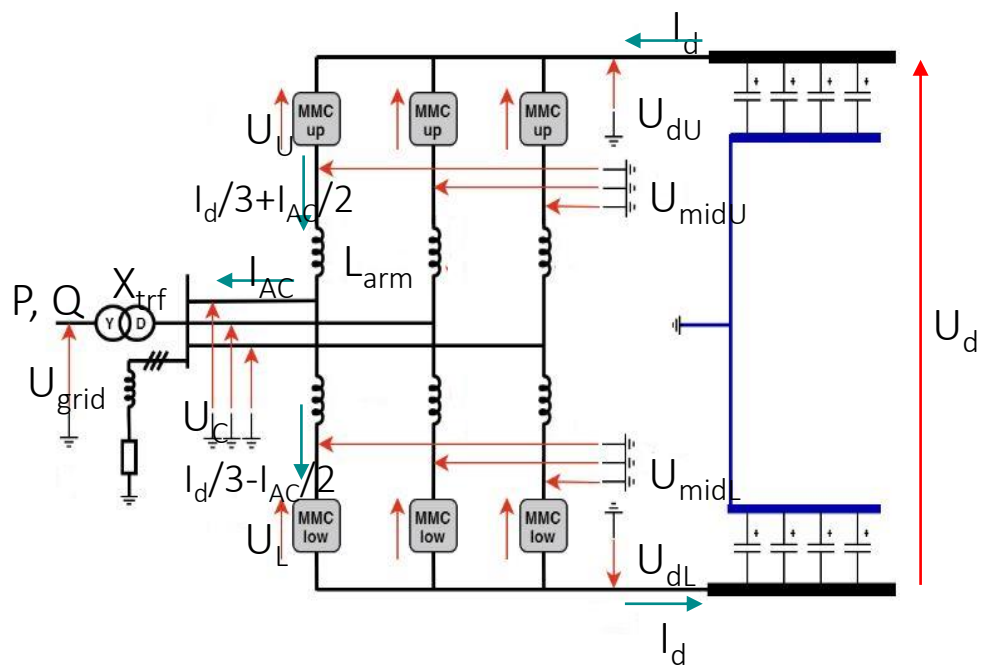


Voltage Source Converter
Modular Multi-level Converter

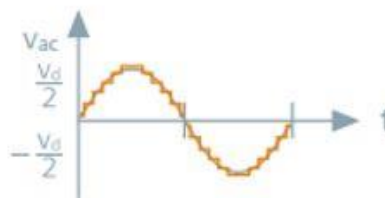
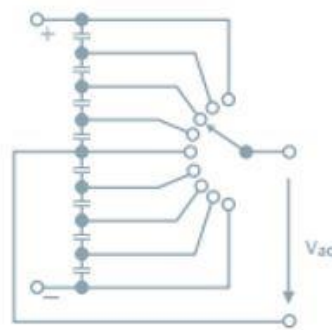


Viking Link: 232 submodules i hver arm

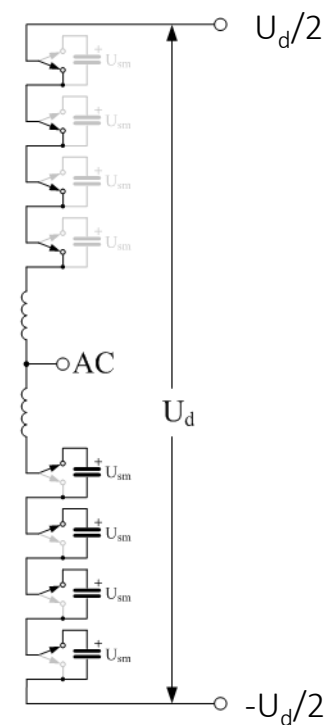
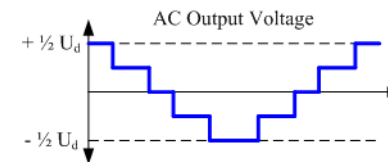
MMC PRINCIP



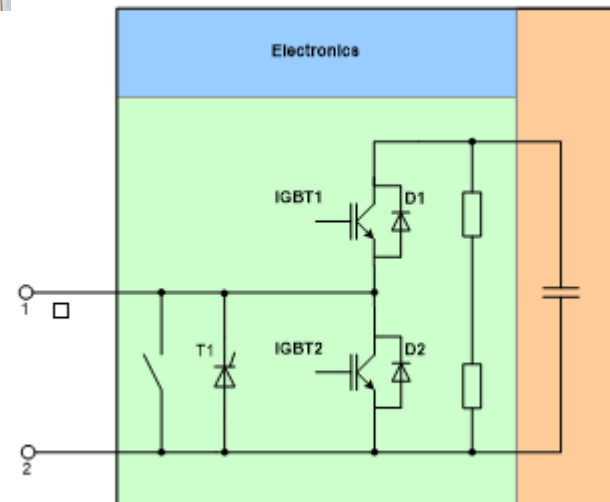
Multilevel



SM opladet til $U_d/4$



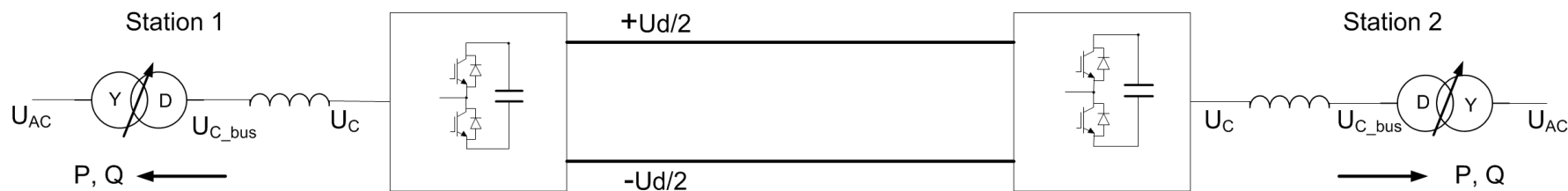
VSC KOMPONENTER







EFFEKTUDVEKSLING MED AC-NET



PtP: Ene konverter styrer DC-spænding, den anden styrer **aktiv** effektudveksling

Udveksling af **aktiv** og **reaktiv** effekt mellem konverter og AC-net

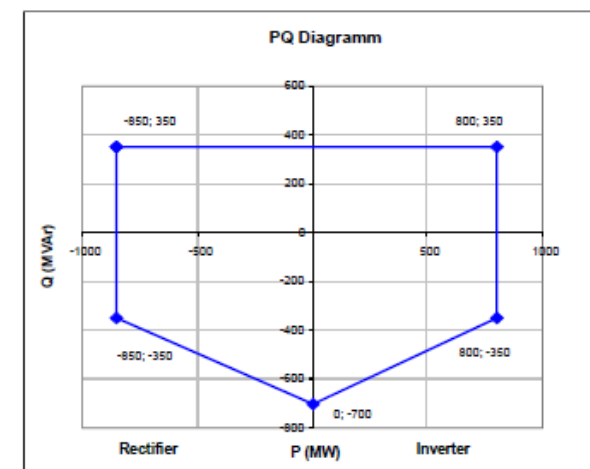
$$P = \frac{U_c \cdot U_{AC} \cdot \sin(\theta)}{X}$$

X : Total reactance in phase reactor and converter transformer

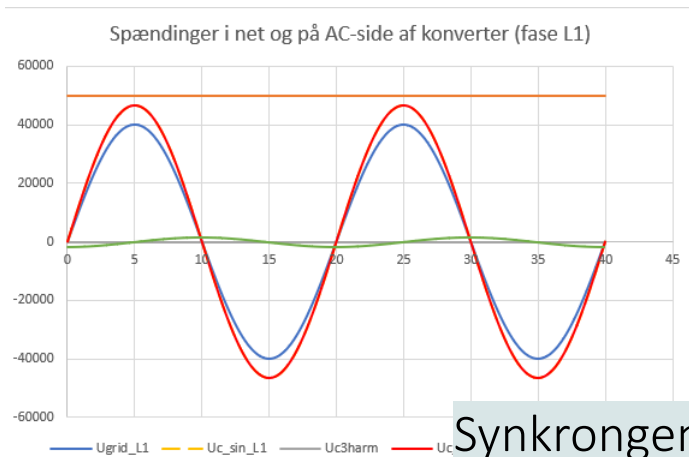
θ : phase angle between U_c and U_{AC}

$$Q = \frac{U_{AC}(U_c \cdot \cos(\theta) - U_{AC})}{X}$$

VSC kan styre **reaktive** effekt i de to ender uafhængigt af hinanden og uafhængig af aktive effekt (PQ-diagram)

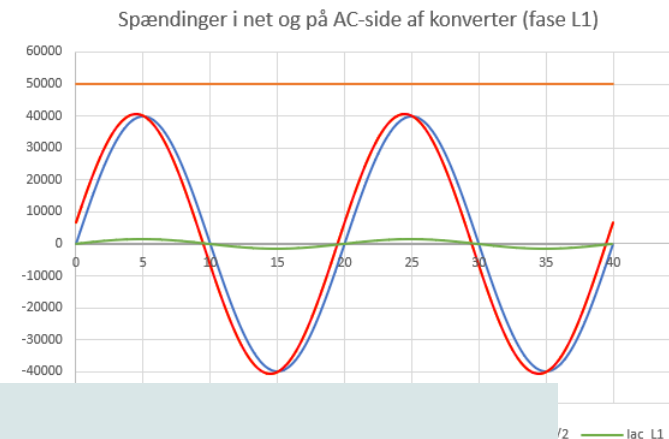


EFFEKTUDVEKSLING MED AC-NETTET



$P = 0$
 $Q = >0$

Producerer Mvar
 Amplitude større
 end netspænding

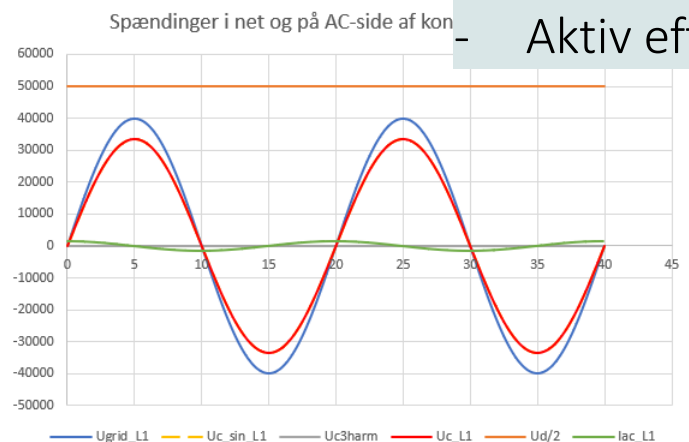


$P = > 0$
 $Q = 0$

Vekselretterdrift
 Vinkeldrejning
 mellem konverter-
 og netspænding

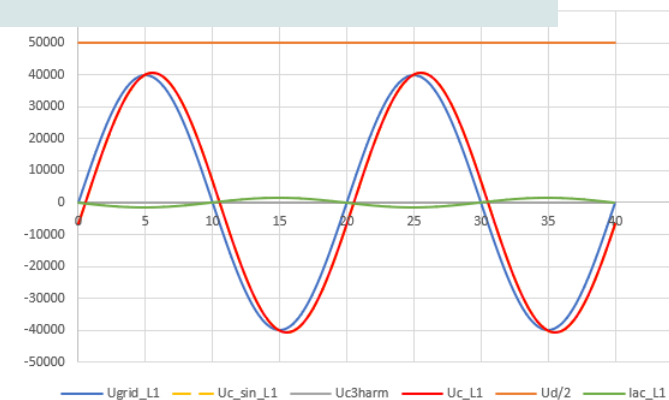
Synkrongenerator:

- Producere/optage Mvar: Over-/undermagnetisering
- Aktiv effekt: Polhjulsvinkel



$P = 0$
 $Q = -1 \text{ p.u.}$

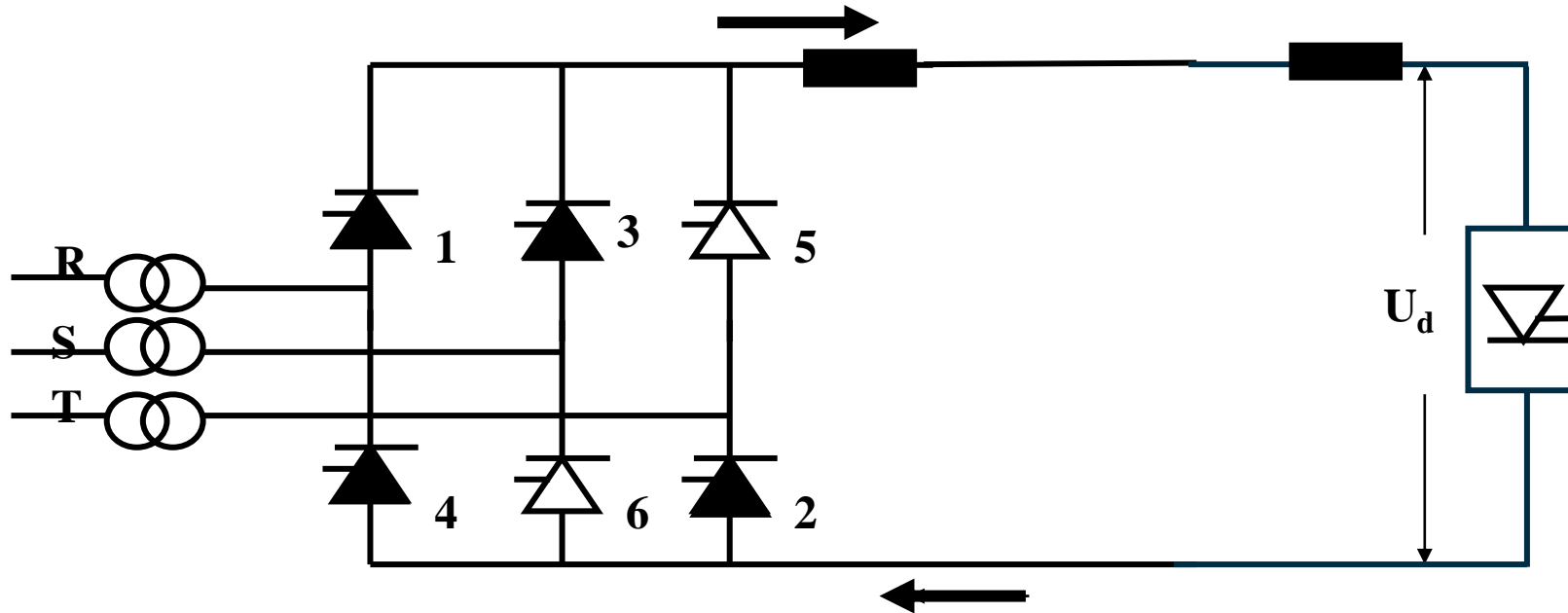
Optager Mvar
 Amplitude mindre
 end netspænding



$P = < 0$
 $Q = 0$

Ensretterdrift
 Vinkeldrejning
 mellem konverter-
 og netspænding

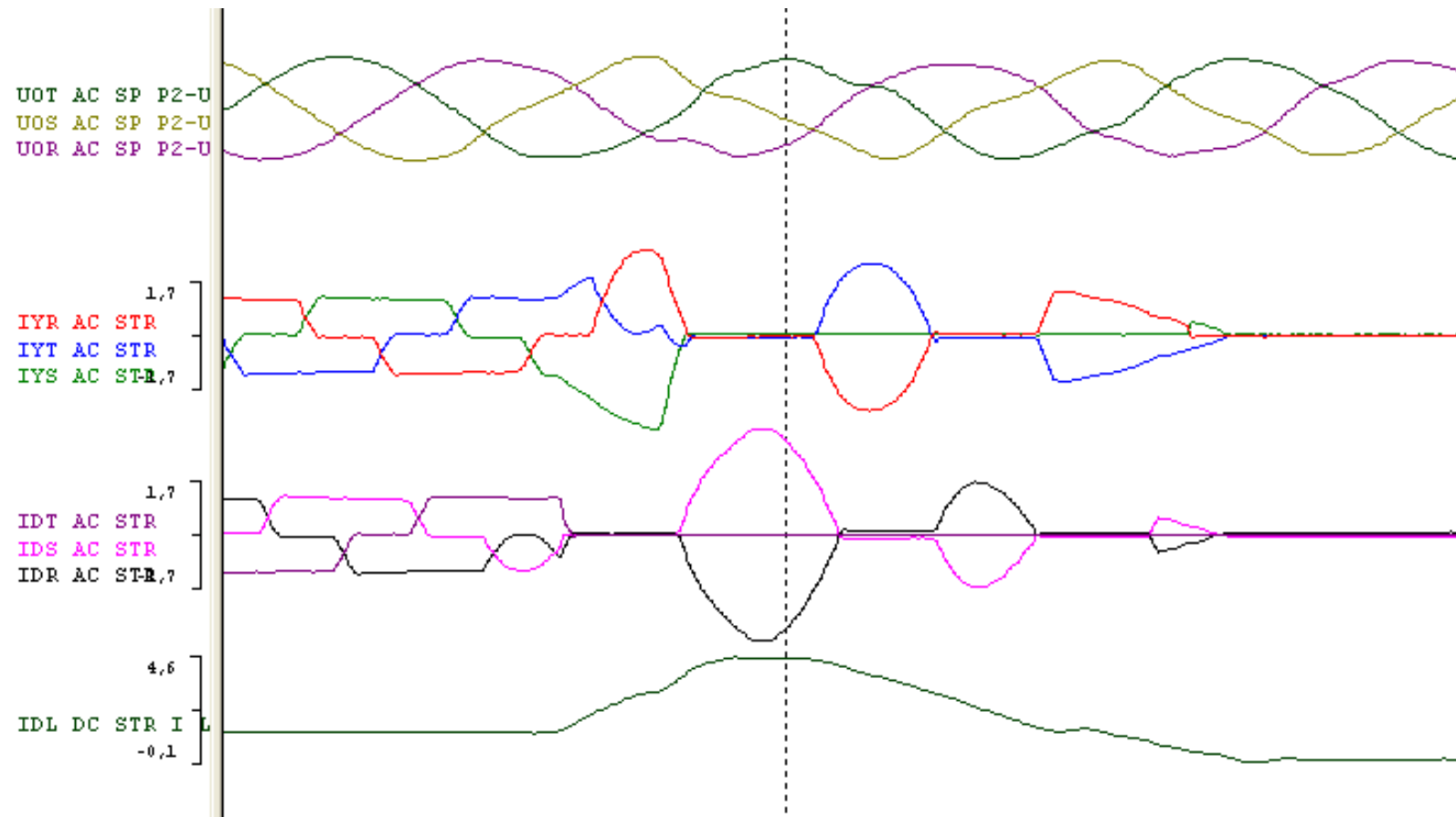
KOMMUTERINGSFEJL



- Ved kommuteringsfej i vekselretteren kortsluttes DC-kredsen, og DC-strømmen vokser hurtigt kun begrænset af de to glatningsreaktorer og kontrolsystemets reaktion i ensretteren.
- Eksempel: $U_d=400\text{kV}$, $L=2*200\text{mH}$ $\rightarrow dI/dt = U/L = 1$ kA/ms

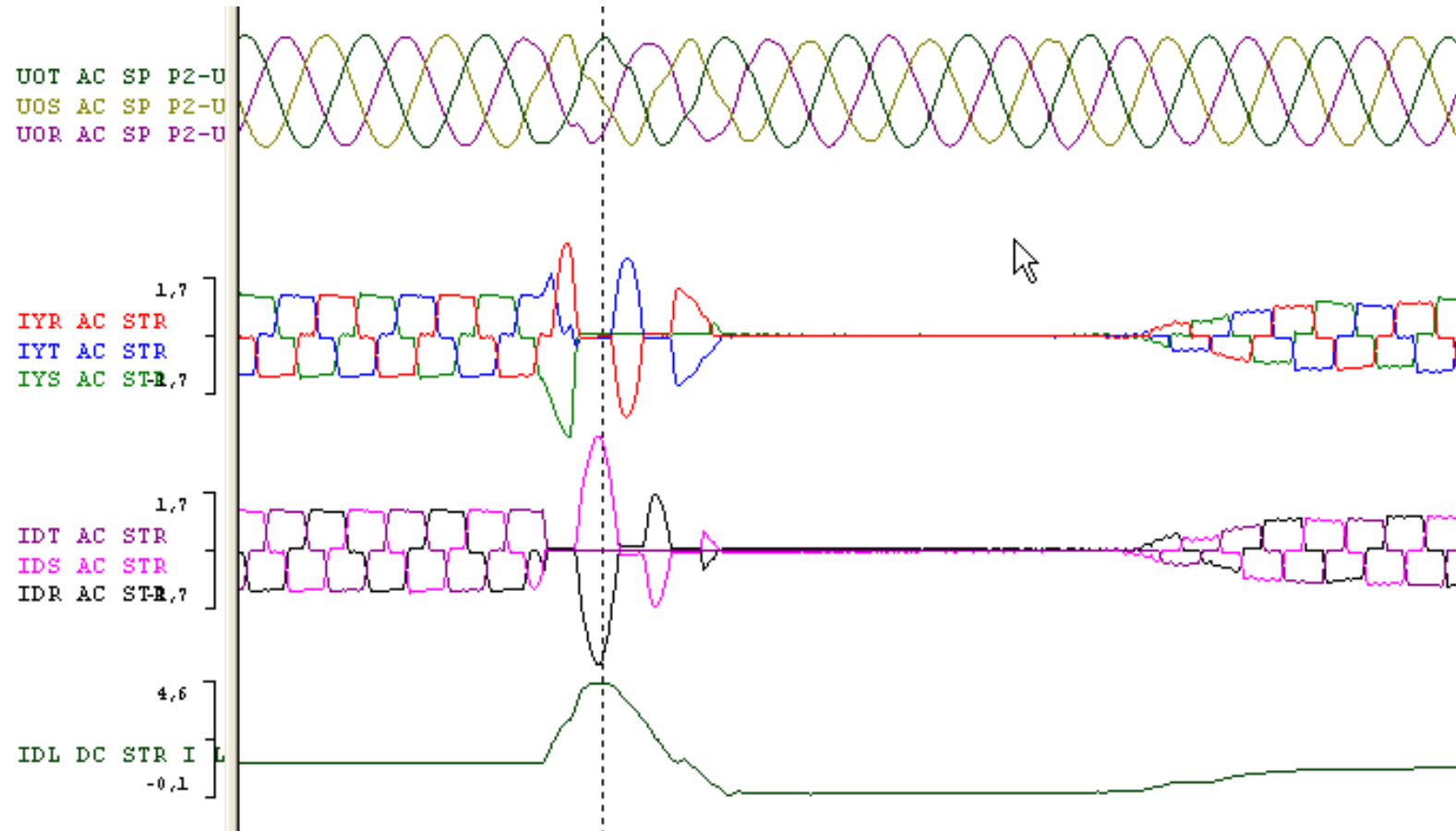
KOMMUTERINGSFEJL

Vekselretter:



KOMMUTERINGSFEJL

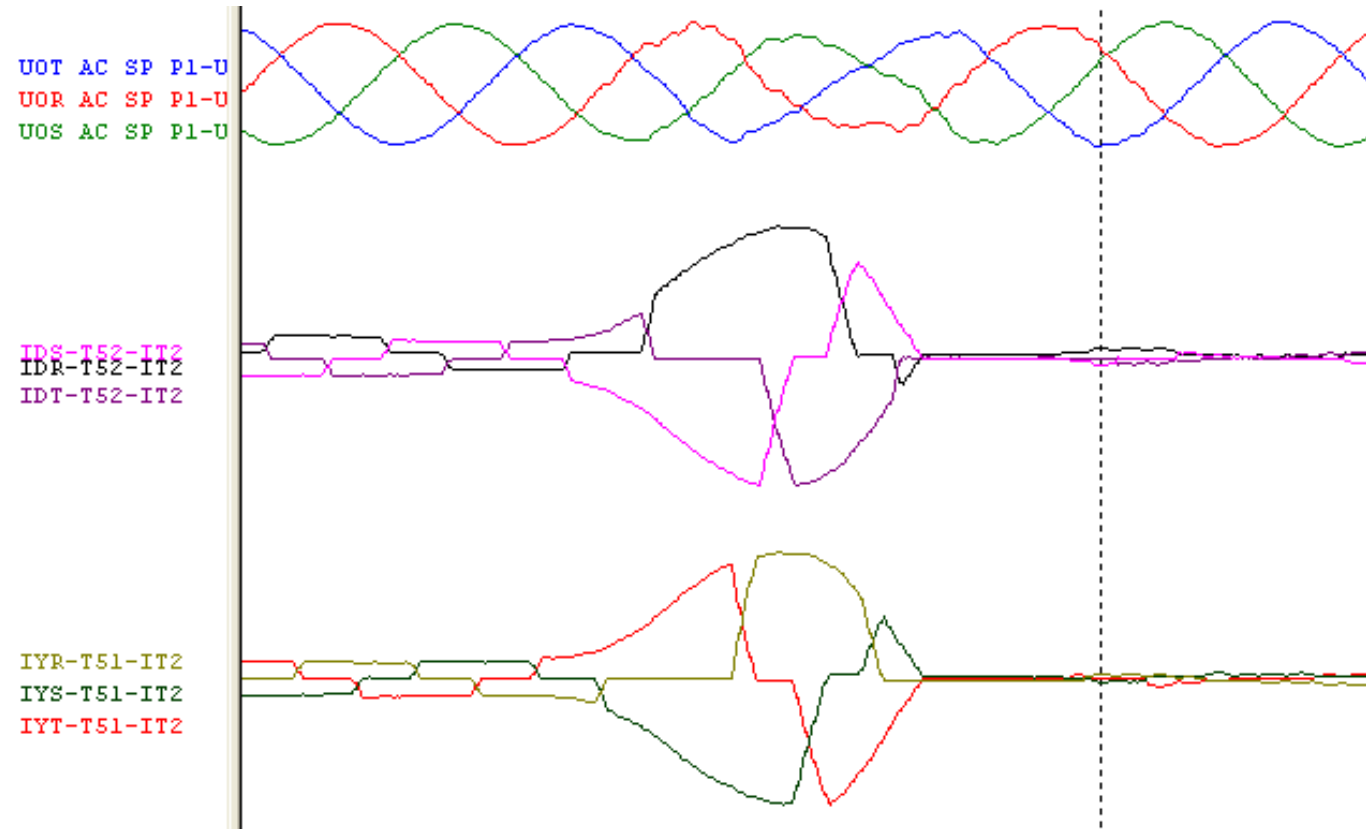
Vekselretter:



Effektoverføring starter igen efter ca. 100ms

KOMMUTERINGSFEJL

KF i vekselretter set fra ensretter:

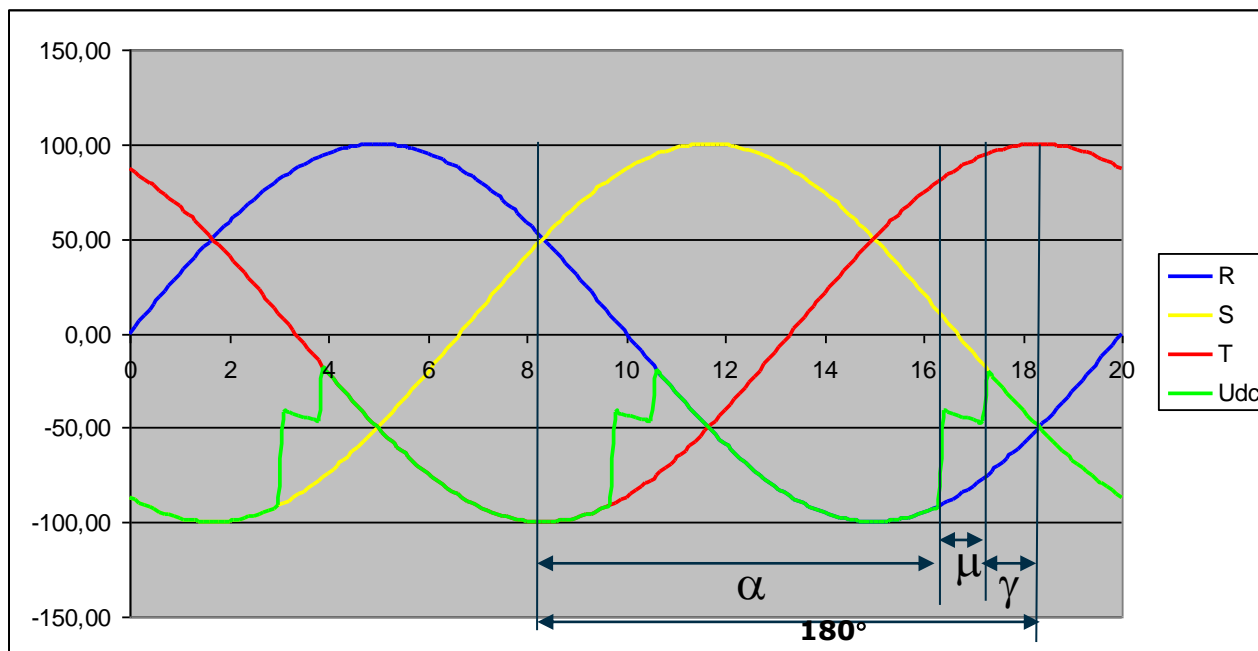
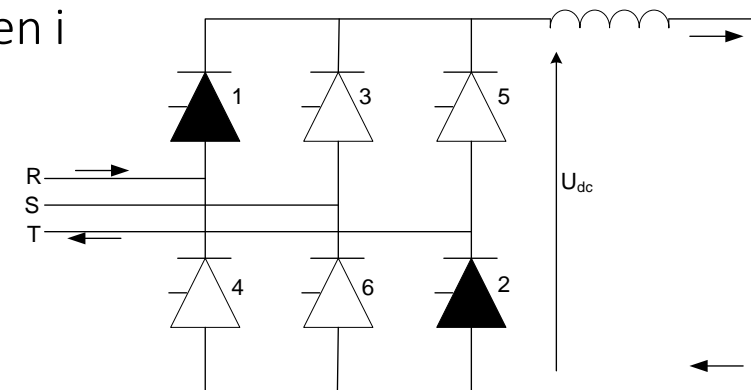


Den øgede DC-strøm leveres fra ensretteren og giver forstyrrelse af AC-spændingen, som evt. kan medføre KF på andre HVDC-forbindelser i samme AC-net. Dette problem er større jo svagere AC-nettet er.

ÅRSAGER TIL KOMMUTERINGSFEJL

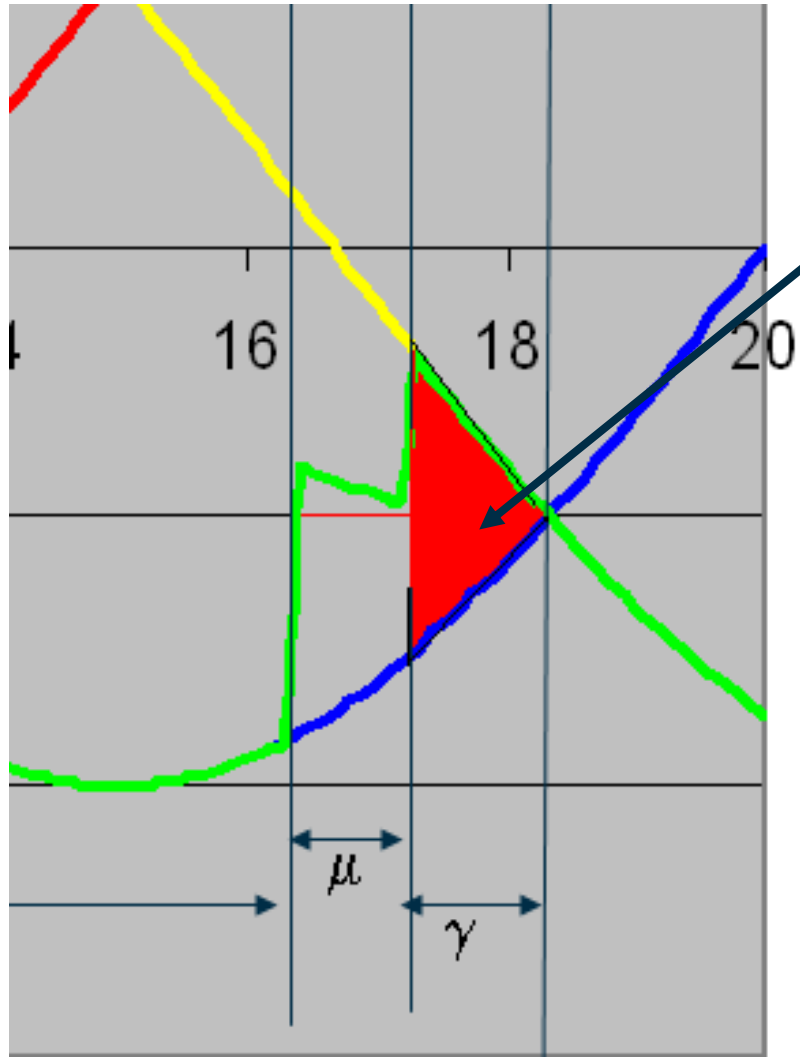
De fleste kommuteringsfejl opstår som følge af forstyrrelser i spændingen i AC-nettet i vekselretterenden:

- Fejl i nettet → temporær spændingssænkning
- Enfaset fejl → faseforskydning af spændingen
- Indkobling af transformere, filtre, kommuteringsfejl på andre HVDC forbindelser mv. kan give spændingsforvrængning.



- Jo større γ er jo større forstyrrelse kan anlægget klare uden KF.
- Stort γ giver store tab og stort Mvar forbrug
- Ved hurtig øgning af γ (reduktion af tændvinkel) kan man i nogle tilfælde undgå KF eller begrænse til den ene 6-puls gruppe

KOMMUTERINGSFEJL – SPÆNDINGS-TIDS AREAL



- Arealets størrelse er afgørende for om tyristoren genvinder sin blokeringssevne før den udsættes for spænding i lederetningen.
- Arealet kan pludselig blive mindre end forventet pga.:
 - Spændingsamplitude på den ene eller begge faser reduceres.
 - Faseforskydning, så skæringspunktet rykkes længere til venstre
 - Forvrængning af spændingen som følge af koblinger med transformere, filtre eller kommuteringsfejl på andre HVDC forbindelser.
- Det eneste vi har kontrol over er tændtidspunktet. Spændingsforstyrrelser efter tændtidspunktet kan vi ikke gøre noget ved

Spørgsmål?

JPK@energinet.dk