



INTRODUKTION TIL HVDC

Orientering til Energistyrelsen

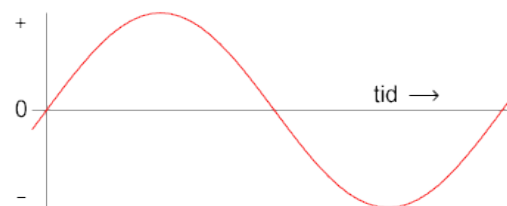
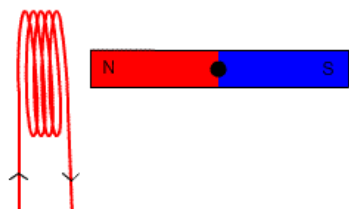
Jens Peter Kjærgaard

INDHOLD

- Elteknik generelt
 - AC-anlæg, AC-afbrydere, AC-stationsopbygning, lange kabler
- HVDC generelt
 - Teknologier, reguleringer
- Voltage Source Converter
 - Topologier, hovedkomponenter
- Funktion af VSC
- Tilslutning af vindmøller
 - Vindmølletyper, ilandføringsanlæg, Fault Ride Through
- Multi-terminal
 - AC-sammenkobling, DC-sammenkobling
- DC-afbrydere
 - Beskyttelse i AC- og DC-net
- Udstyr på energiø i Nordsøen

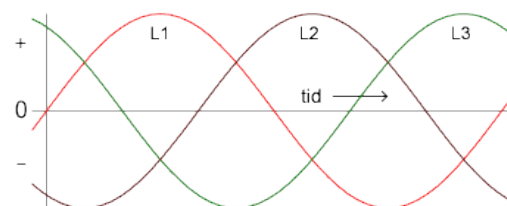
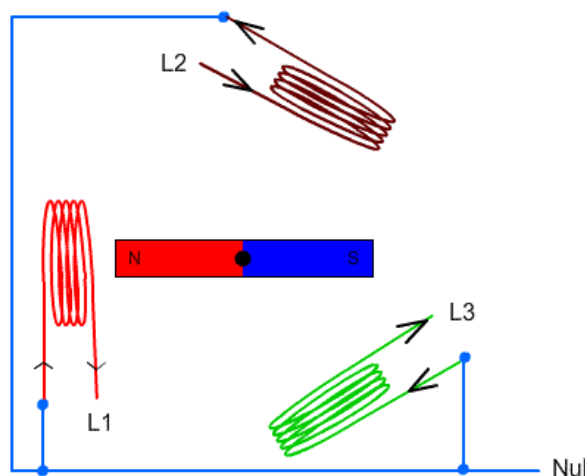
ELTEKNIK GENERELT

SIMPEL VEKSELSTRØMSGENERATOR



50 Hz

50 omdrejninger pr. sekund
3000 omdrejninger pr. minut
20 ms pr. omdrejning

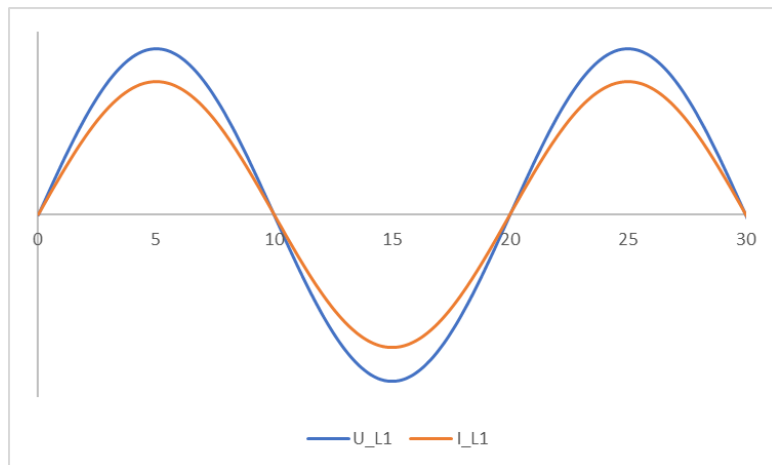


HVAC nettet har altid tre faser

Forskydning:

- 120 grader
- 6,67 ms

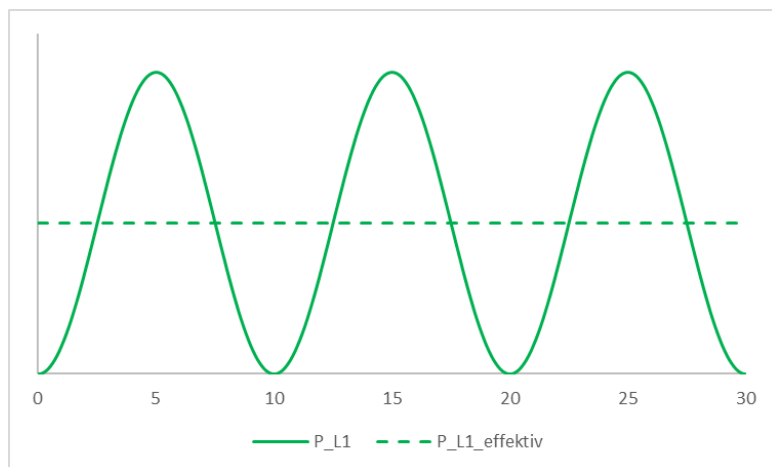
EFFEKT = SPÆNDING X STRØM



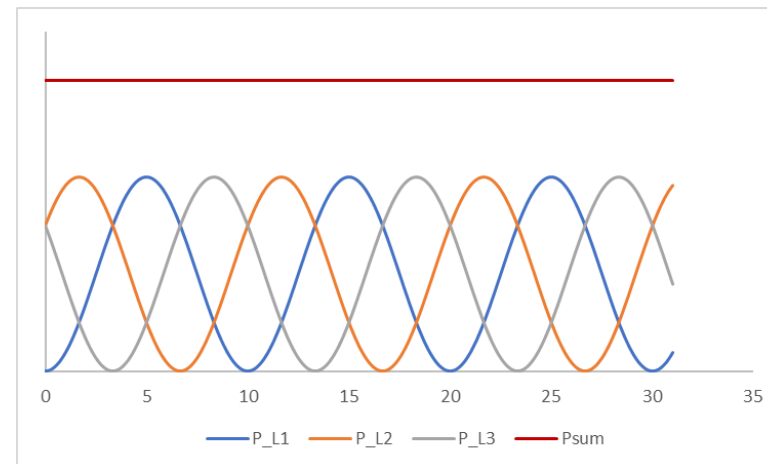
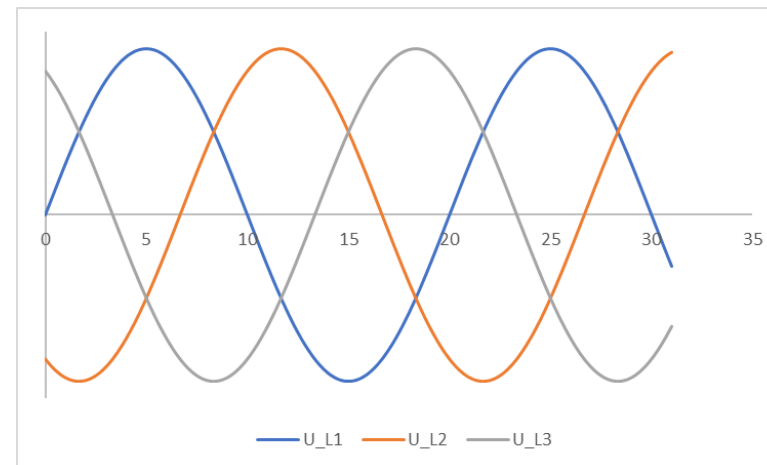
$$P = U \times I$$

Effekt svinger mellem nul og en maksimal positiv værdi
(kun 50% effektivværdi)

$P > 0$: Kan udføre et arbejde



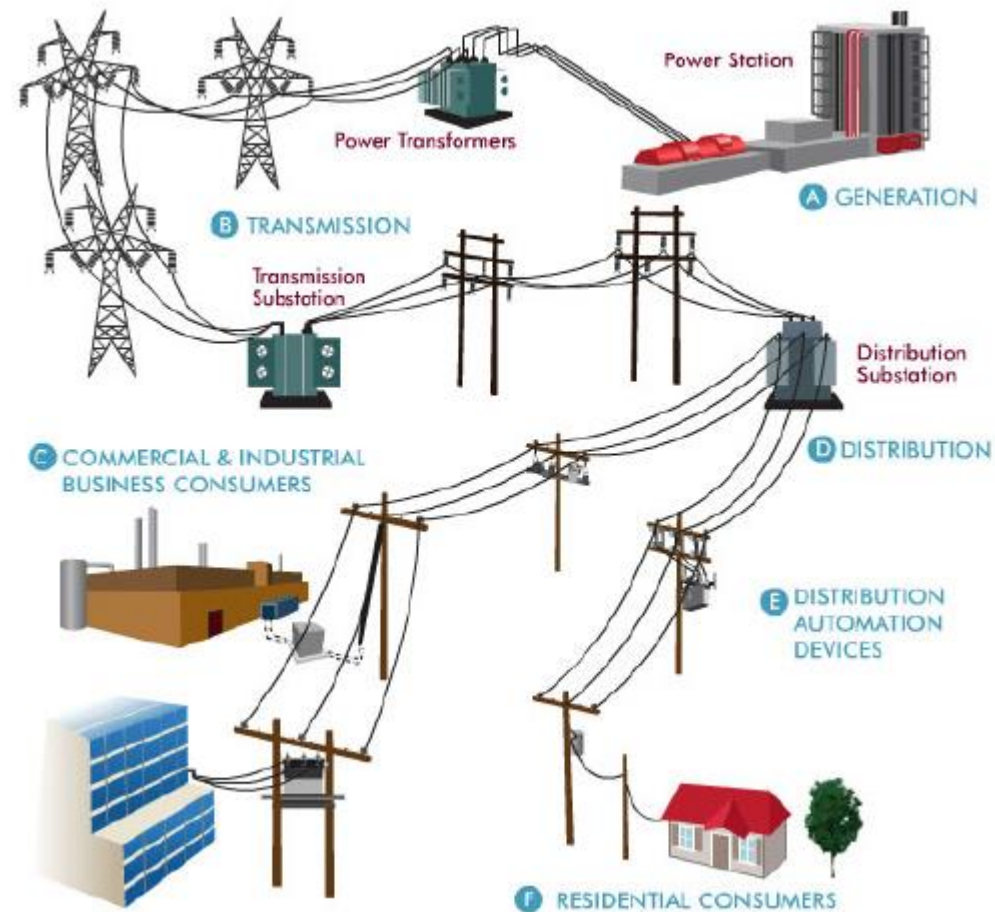
Sum af effekt fra tre faser er konstant



HVORFOR ANVENDES VEKSELSTRØM?

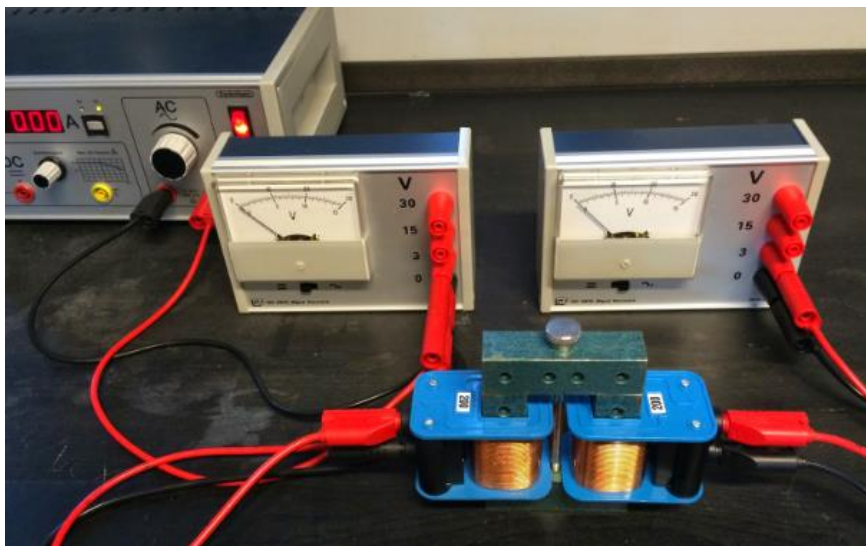
Det meste af elsystemet er opbygget med vekselstrøm

- Nemt at flytte energi mellem forskellige spændingsniveauer (transformere)
- Nemt at lave afbrydere, der kan afbryde en normal driftsstrøm eller en stor strøm i tilfælde af en kortslutning i nettet
- Nemt at opbygge et formasket vekselstrømsnet
- Nemt at lave generatorer og motorer til vekselstrøm



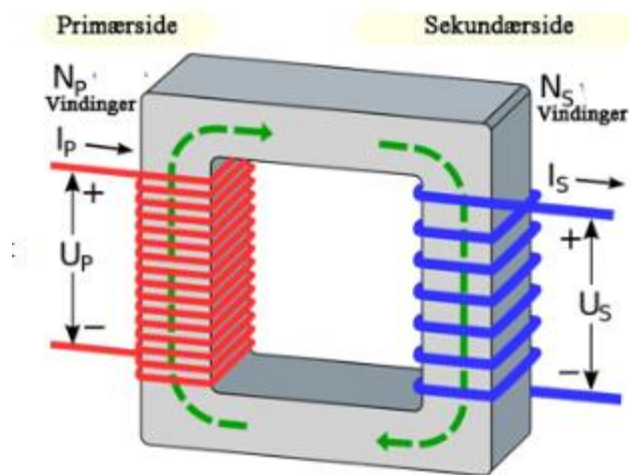
TRANSFORMERE

Skifte spændingsniveau i et AC-net



Stor effekt => Høj spænding

- Mindre strøm
- Elektriske tab proportional med I^2



Energien overføres i magnetfeltet i jernkernen mellem de to elektriske systemer

Ingen elektrisk forbindelse mellem de to systemer

Spændingsniveauer i DK1

- 400 kV
- 150 kV
- 60 kV
- 10 kV
- 0,4 kV

Spændingsniveauer i DK2

- 400 kV
- 132 kV
- 50 kV
- 10 kV
- 0,4 kV

Fase-fase spænding

TREFASET TRANSFORMER 400/150 KV



400 kV

150 kV

Elektrisk isolering: Papir viklet om elektriske ledere, oliefyldt tank

Olien anvendes også som kølemiddel



DK1

400 – 150 kV

150 – 60 kV

60 – 10 kV

10 kV – 400 V

DK2

400 – 132 kV

132 – 50 kV

50 – 10 kV

10 kV – 400 V



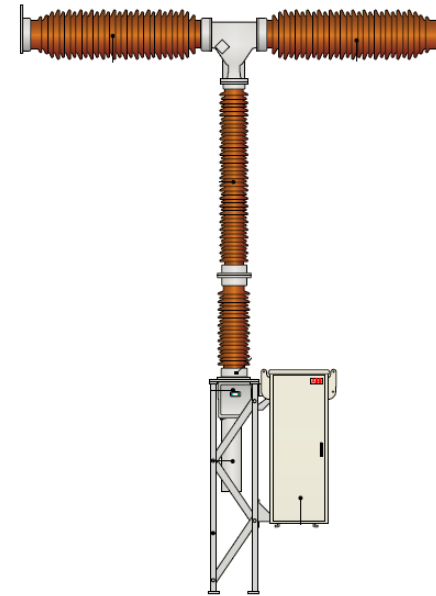
AC-AFBRYDERE

Vekselstrømsafbrydere findes i mange størrelser



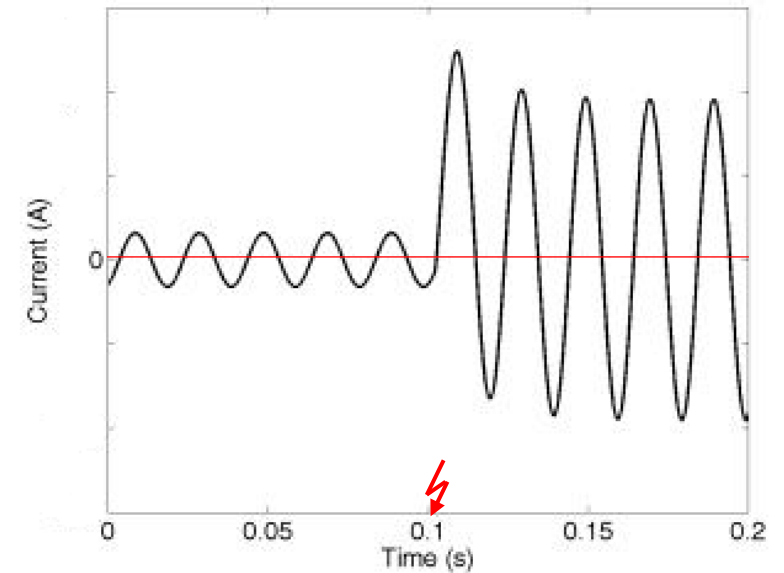
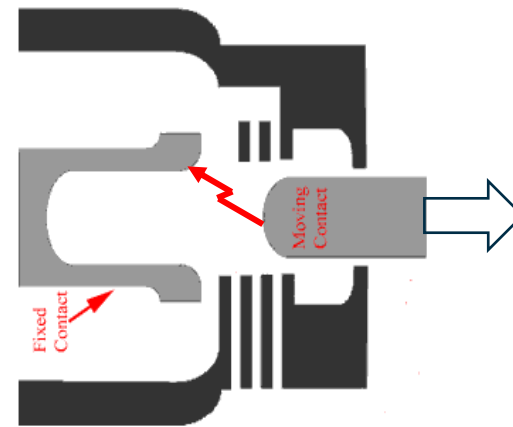
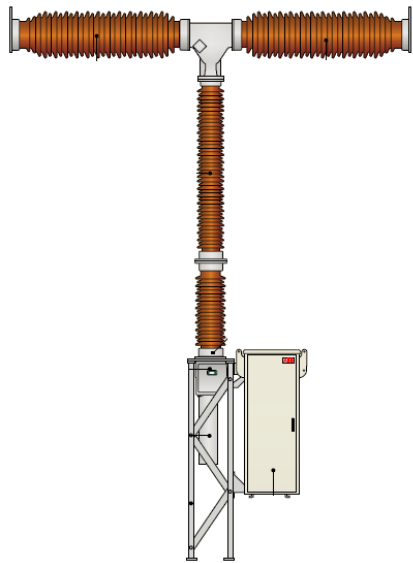
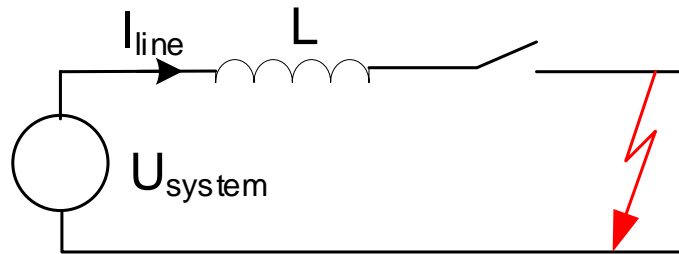
- Små afbrydere i hjemmet til at tænde/slukke for lys og apparater
- Ca. 8 m høje 400 kV afbrydere:
 - Ind-/udkoble f.eks. ledninger og transformere
 - Udkoble i tilfælde af kortslutningsstrøm

Kortslutningsstrømme skal hurtigt udkobles, så AC-nettet ikke kolliderer



AC-AFBRYDERE

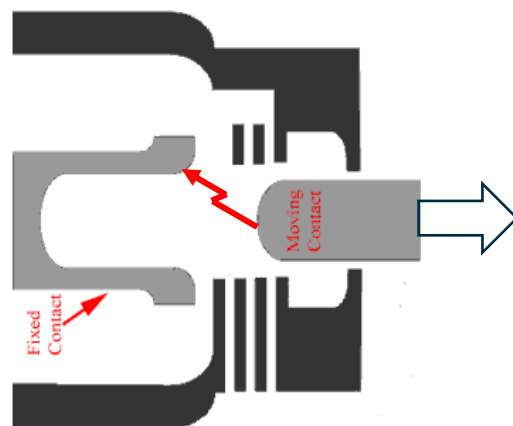
Funktion



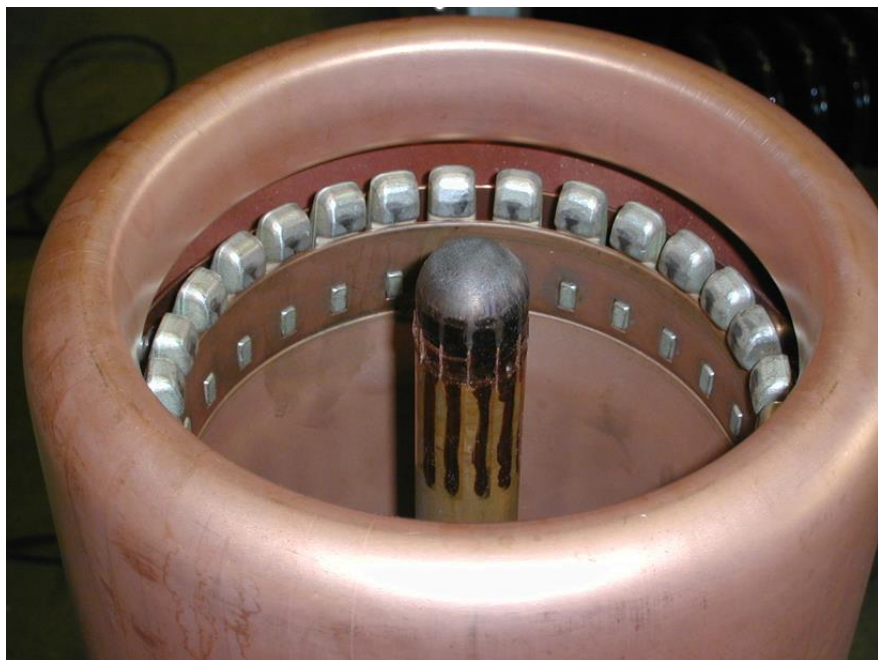
- Kortslutning => strømmen øges
- Relæ sender trip-signal til afbryderen
- Afbryderen begynder at åbne => lysbue mellem kontakter
- Strømmen når nulpunkt => lysbue slukker
- Kontaktafstand tilstrækkelig til at klare spændingen over afbryderen (undgå gentænding og tilbagetænding)
- Totalt 50-70 ms fra kortslutning til strømmen er afbrudt

AC-AFBRYDER

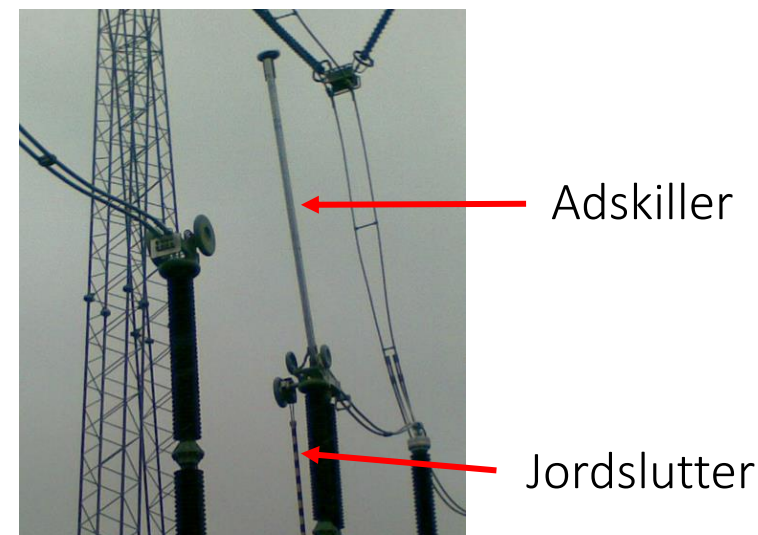
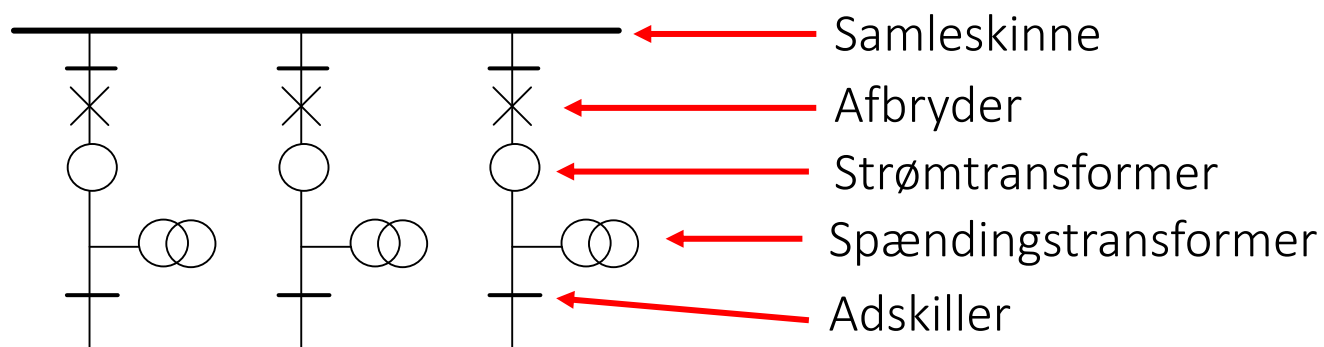
Opbygning, 400 kV afbryder



Ofte SF₆-gas fyldte



AC-STATION, OPBYGNING



Samleskinne: Knudepunkt mellem forskellige forbindelser

Afbryder: Afbryde strøm (driftsstrøm eller fejlstrøm)

Adskiller: Stor afstand mellem anlæg, der er i drift og anlæg, der skal arbejdes på. Må kun åbnes i strømløs tilstand

Jordslutter: Sikrer jordforbindelse til anlæg, der skal arbejdes på

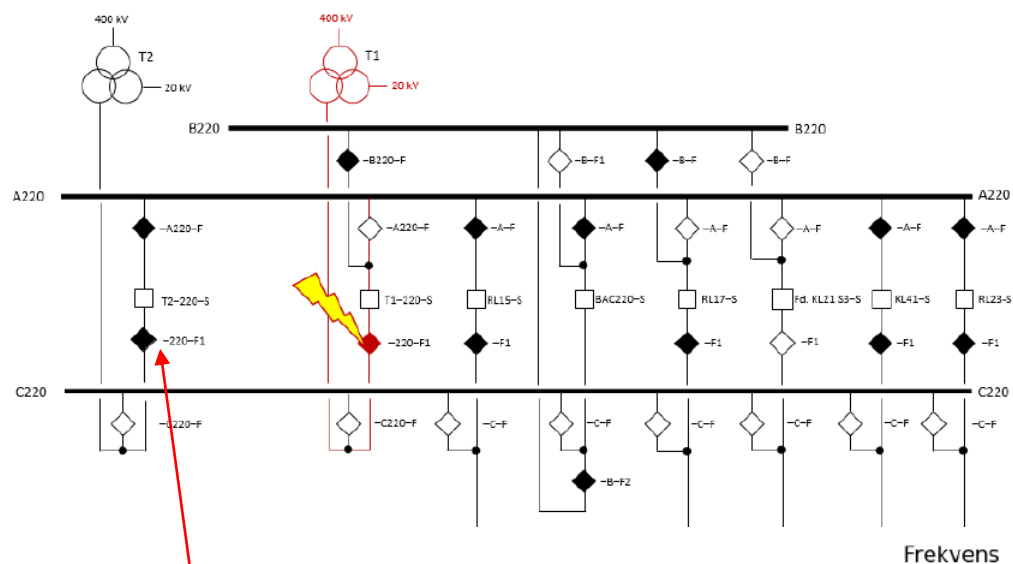
Strømtransformer: Måler strømmen. F.eks. 2000/1

Spændingstransformer: Måler spændingen. F.eks. 400kV/100 V



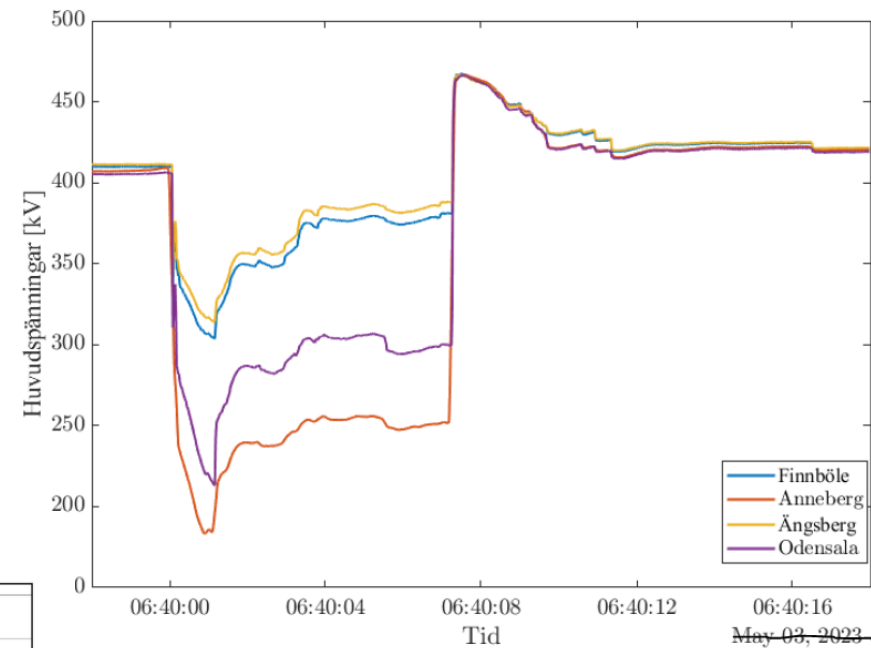
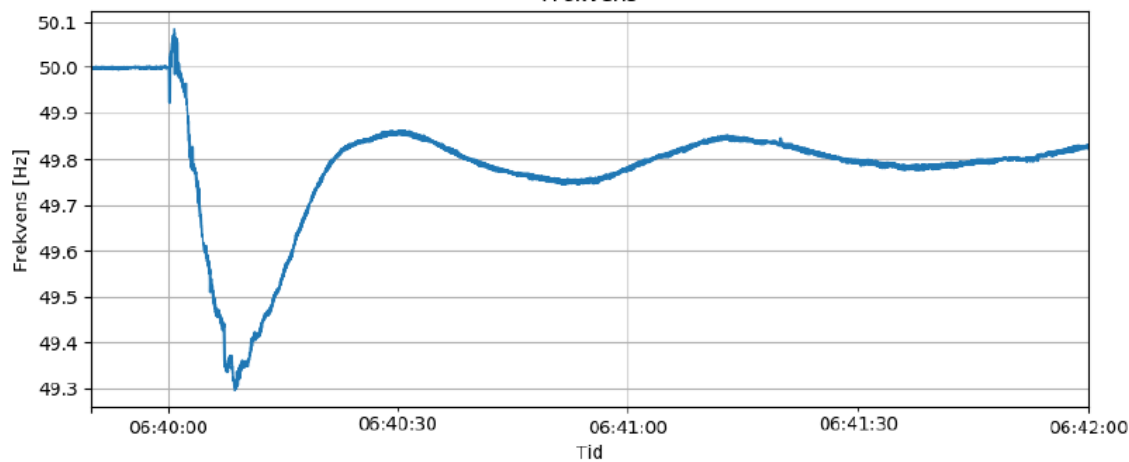
Adskillere må
KUN åbnes,
når der ikke
går strøm i
dem

DRIFTSFORSTYRELSE I SVERIGE 2023-04-26



Denne adskiller
skulle have været
åbnet

Aflåsning skal
forhindre
fejlkoblinger

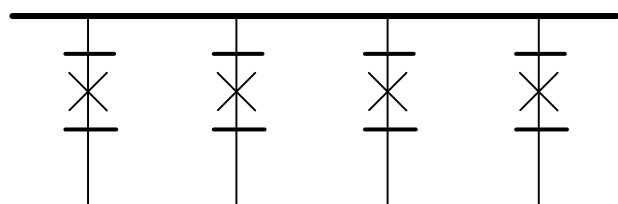


Forsmark 1 og 2 koblede ud pga. lav
spænding i for lang tid. >2100 MW

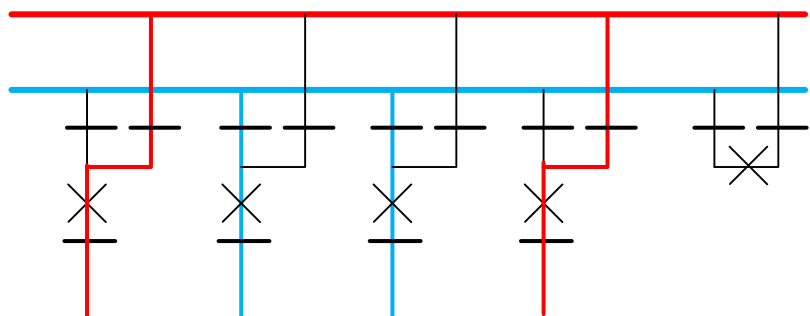
Fejlen stod på i ca. 7 sekunder

Ca. 600 MW nødeffekt via HVDC-
forbindelser

AC-STATION, SAMLESKINNE



Enkelt samleskinne



Dobbelt samleskinne,
enkelt afbryder

Samleskinnefejl eller
bryderforsager:

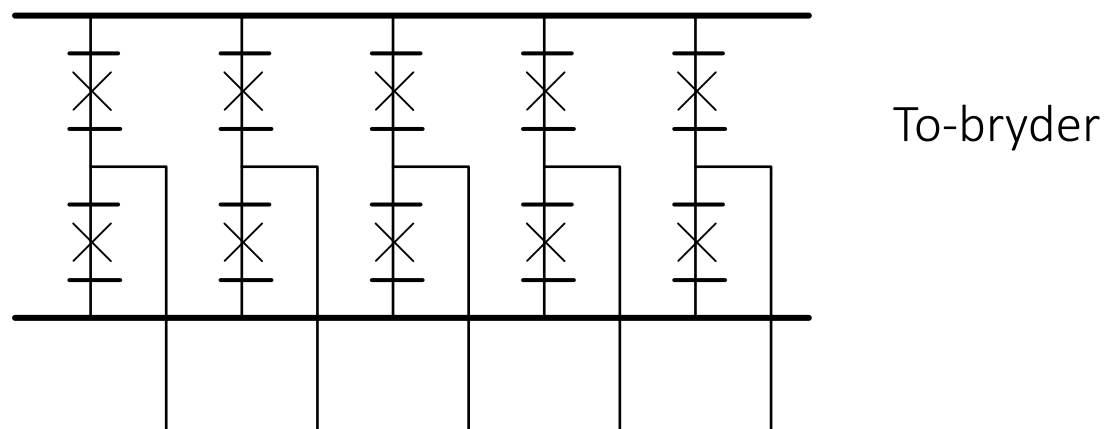
Enkelt samleskinne:

- Alle forbindelser udkobles

Dobbelt samleskinne, enkelt
afbryder:

- “halvdelen” af
forbindelserne udkobles

AC-STATION, SAMLESKINNE

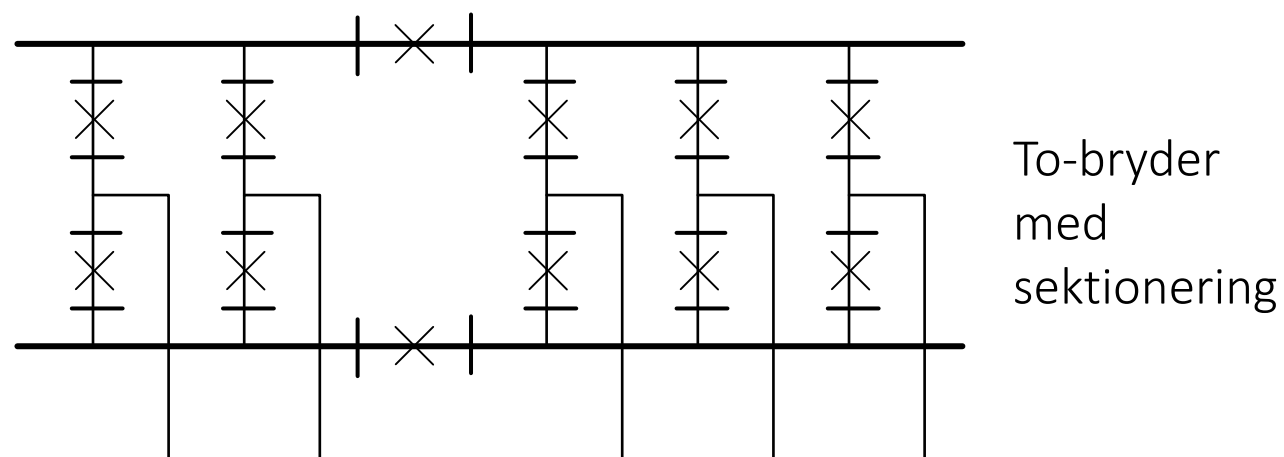


Samleskinnefejl eller bryderforsager:

- Ene samleskinne udkobles, alle forbindelser fortsat i drift

Vedligehold af samleskinneadskillere:

- Udkobling af samleskinne => enkeltskinne => større risiko
- Store stationer opdeles i flere sektioner



AC-STATION, AIS ELLER GIS



Energinet målsætning:

- Ingen SF6 efter 2050
- Levetid på ca. 40 år

SF6-gas i både AIS og GIS i øjeblikket

Leverandører planlægger SF6-frie løsninger inden 2030

Øget kortslutningseffekt i 400 kV nettet.

Store stationer skal dim. til 63 kA i fremtiden

HVORFOR ANVENDE JÆVNSTRØM?

Når der er så mange fordele ved vekselstrøm, hvorfor så bruge jævnstrøm til energiøerne?

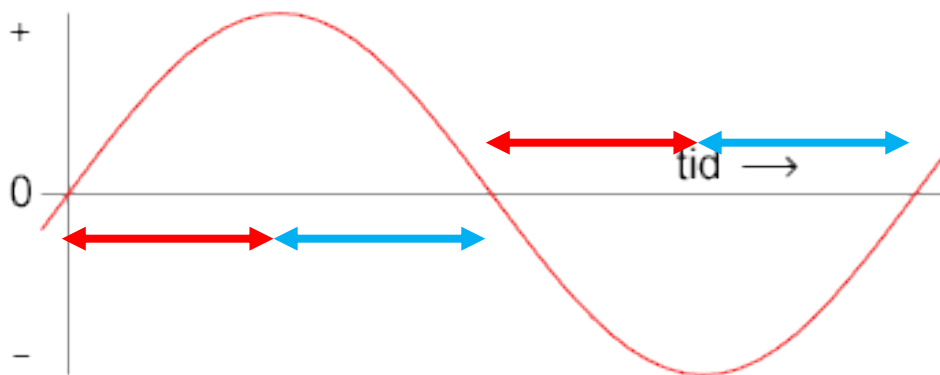
Vekselstrøm og lange søkabler er en dårlig kombination!



AC KABLER – OPLADES/AFLADES

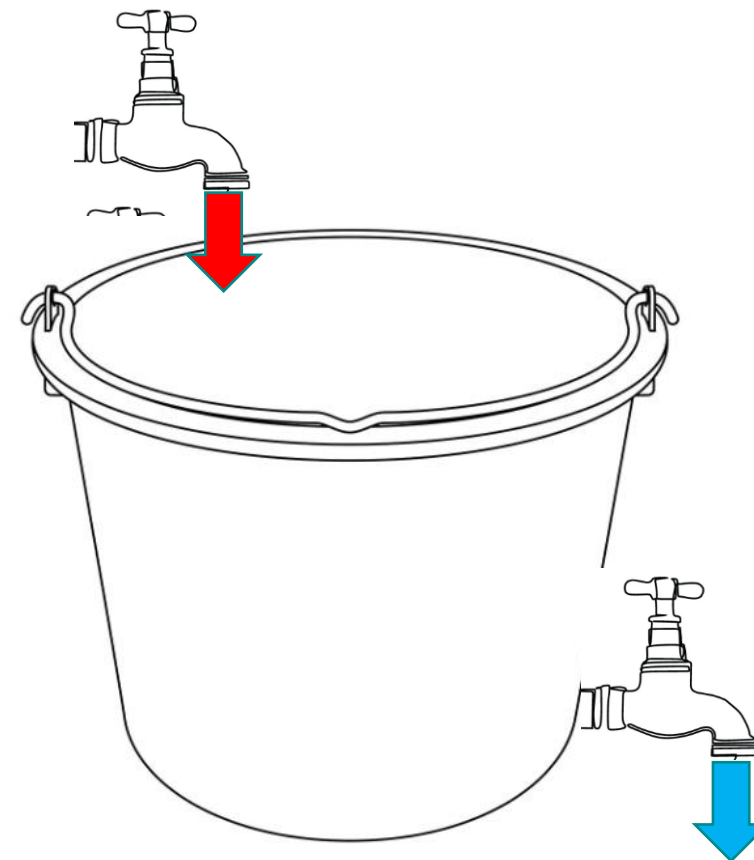


Et kabel virker som en kondensator
Skal oplades/aflades på 5 ms



Reaktiv effekt

Kabellængde fordobles => dobbelt så stor kondensator
(større strøm)



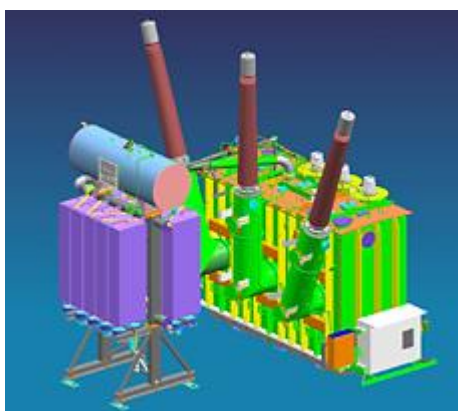
LANGE AC-KABLER MED HØJ SPÆNDING

Vekselstrøm og lange højspændingskabler giver udfordringer

Strøm til opladning/afladning af AC kabler stiger med:

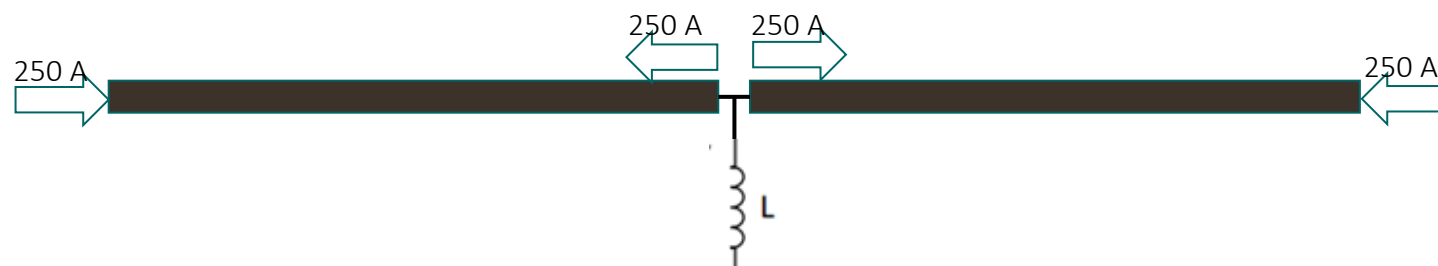
- Øget kabellængde (dobbelt strøm ved dobbelt kabellængde)
- Øget AC-spænding (ca. 3 gange så stor strøm ved 400 kV som ved 132 kV)

Reaktive strøm kan ikke undgås og optager noget kapacitet i kablet




Kompensering af kabler med spoler (shuntreaktorer)

Ikke velegnet til søkabler



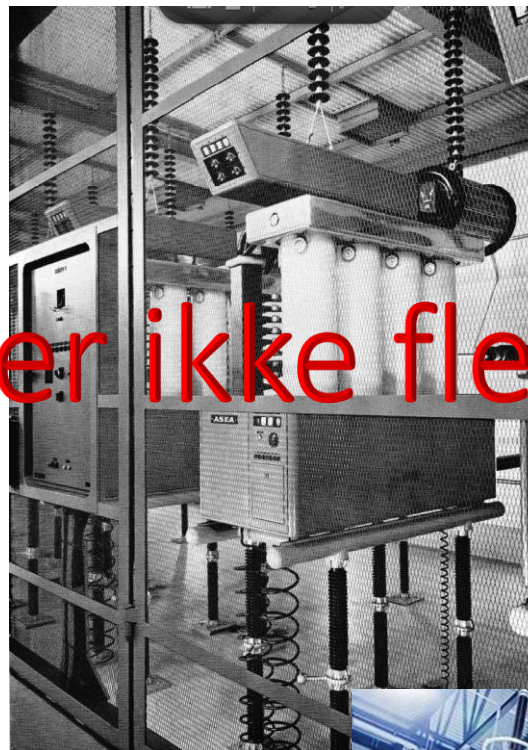
HVDC GENERELT

HVORFOR DC I STEDET FOR AC?

- Fordele ved DC i forhold til AC:
 - Lange kabler giver ingen problemer (f.eks. lange søkabler) 
 - Mere effektiv for meget lange transmissionsforbindelser
 - Forbinde to AC-net, som ikke er synkrone
 - Effektflow kan kontrolleres
 - Fejl i et AC-net vil ikke direkte blive overført til andre AC-net
- Ulemper ved DC i forhold til AC:
 - Konvertere mellem AC og DC er komplicerede, kostbare og kræver mere vedligehold end AC-udstyr
 - Afbrydere for DC er meget mere komplicerede og kostbare end AC-afbrydere
 - Ændring af spændingsniveau er meget mere kompliceret end transformere i AC-nettet

HVDC TEKNOLOGIER

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



Energinet bygger ikke flere LCC

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

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

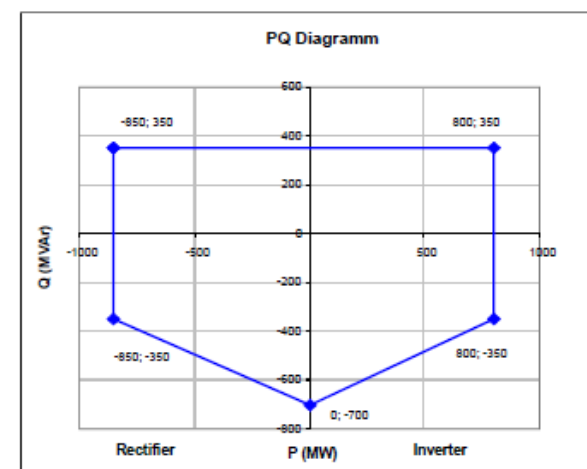
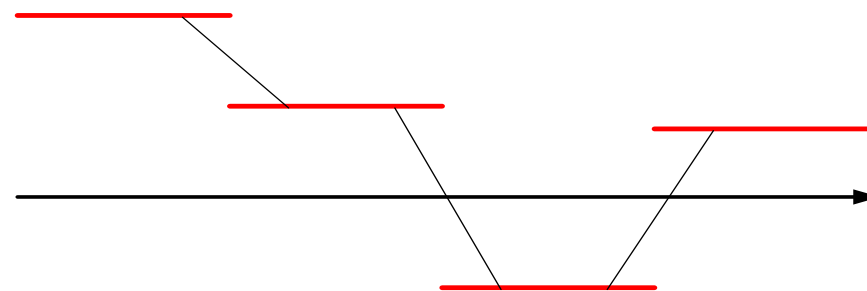
HVDC REGULERINGSFUNKTIONER (VSC)

Aktiv effekt:

- Planregulering (timeplan fra NordPool)
- Frekvensregulering
 - FSM
 - LFSM
- Nødeffekt (P); frekvensafvigelse eller systemværn
- Runback; systemværn

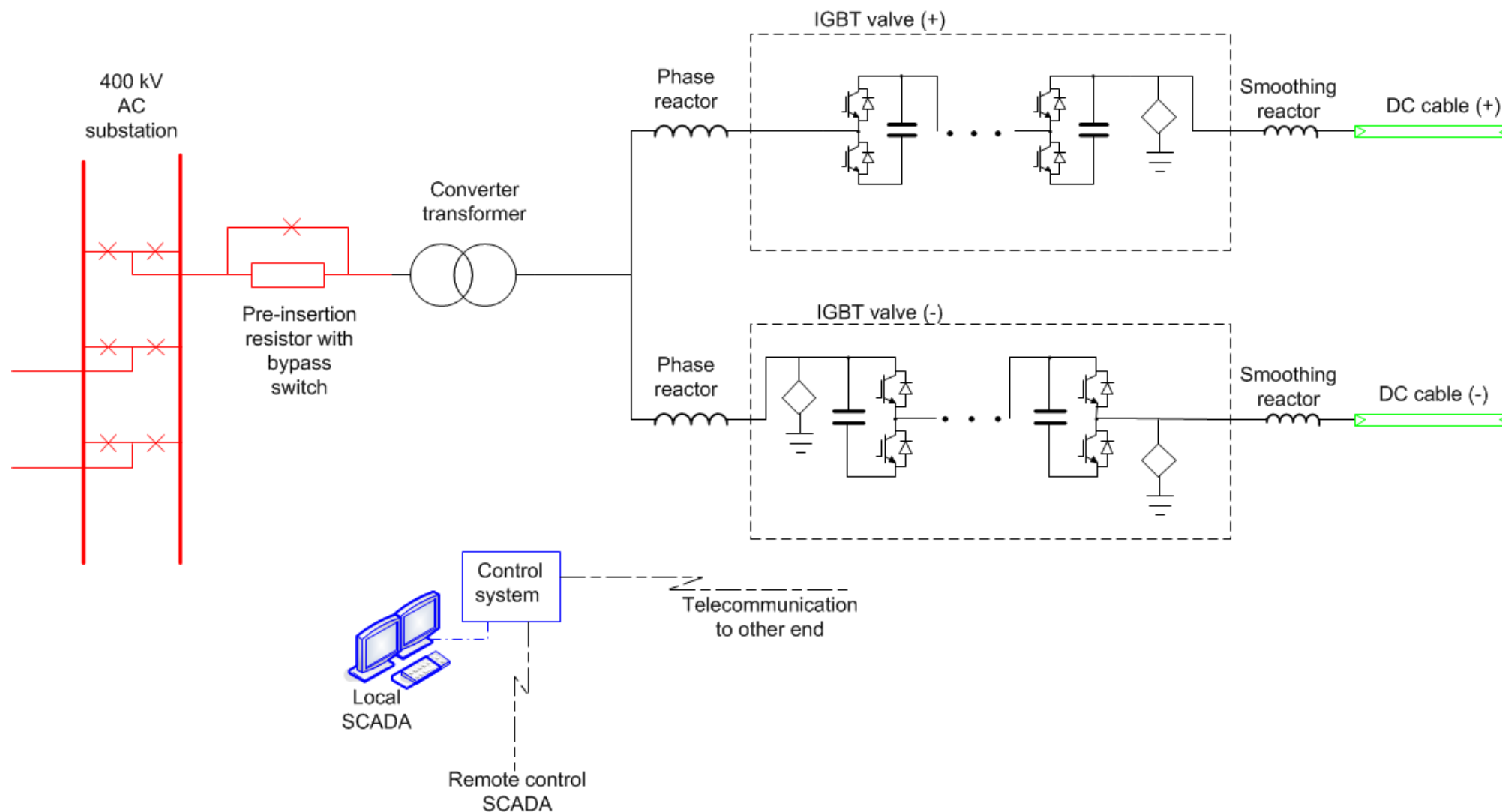
Reaktiv effekt:

- Spændingsregulering (Mvar regulering)
 - Kobling med reaktorer, sikre maksimalt dynamisk reguleringsområde
- Nødeffekt (Q)
- Reaktiv strøm efter netfejl (Fault Ride Through)



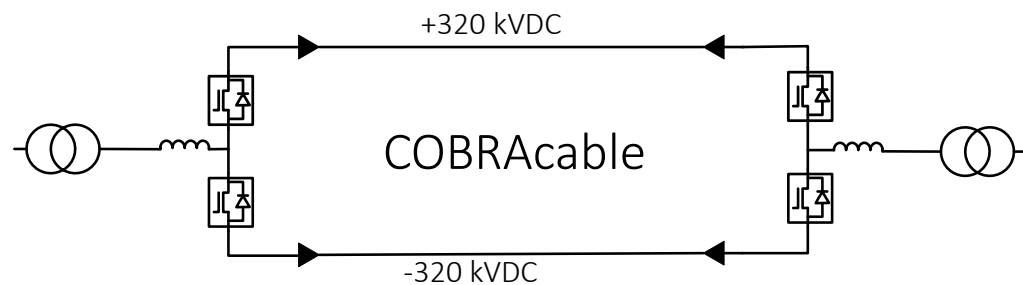
Voltage Source Converter

VSC - HOVEDKOMPONENTER

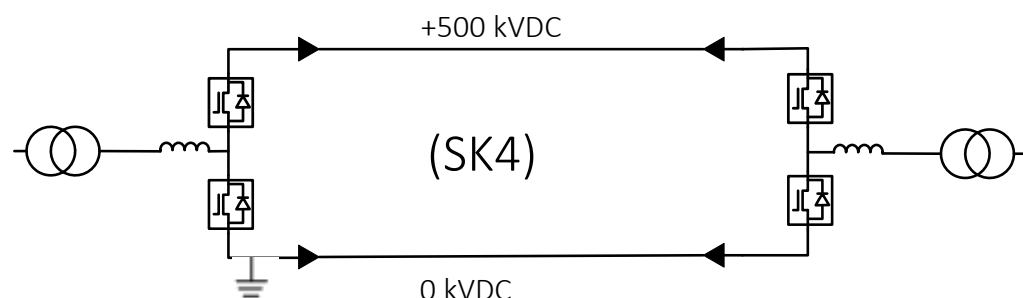


VSC TOPOLOGIES

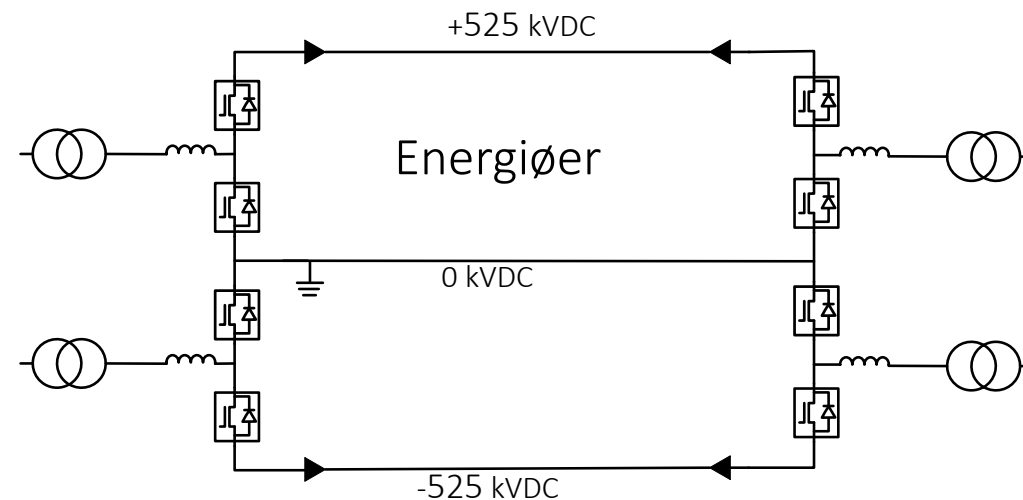
Symmetrical monopole



Asymmetric monopole



Bipole with metallic return

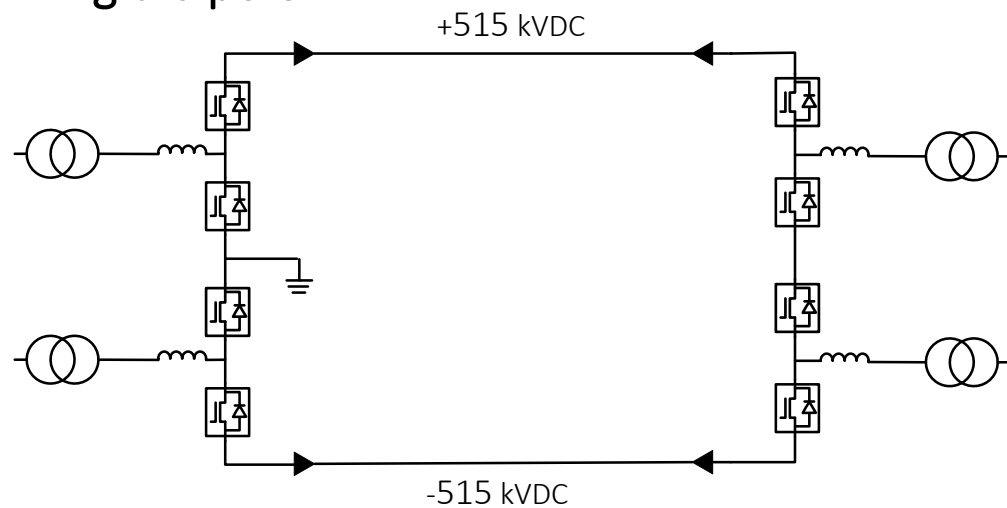


Fordele ved bipol:

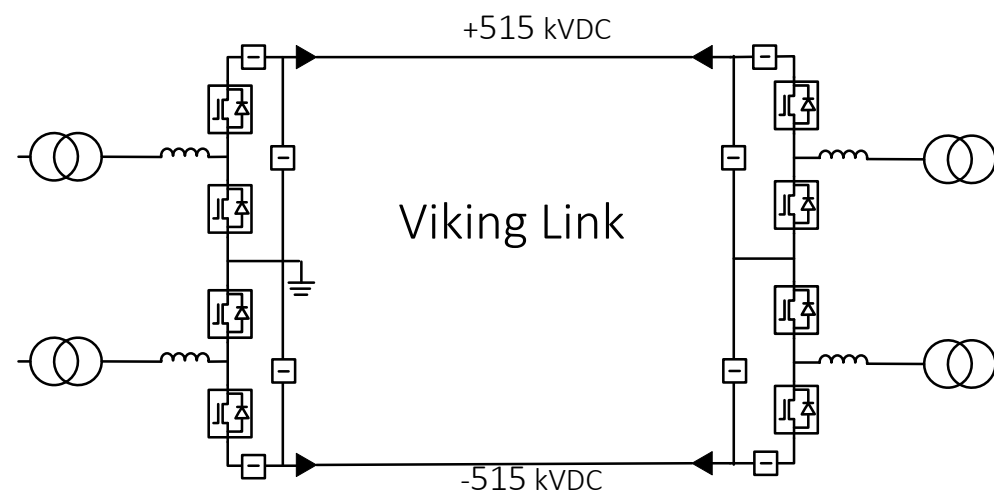
- To HVDC kabler til høj spænding
- Et returkabel (lavere spænding)
- Ved fejl på en konverter eller ét kabel mistes kun halvdelen af effekten

VSC TOPOLOGIES

Rigid bipole

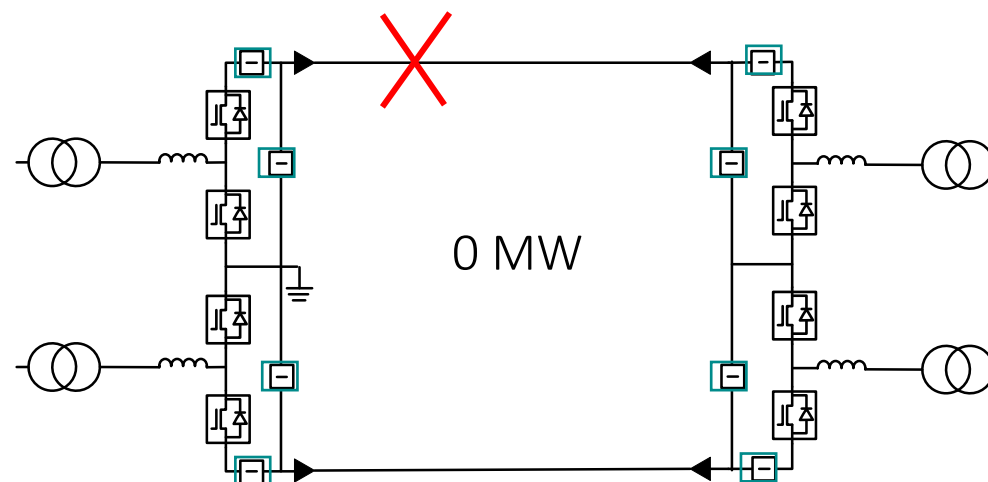
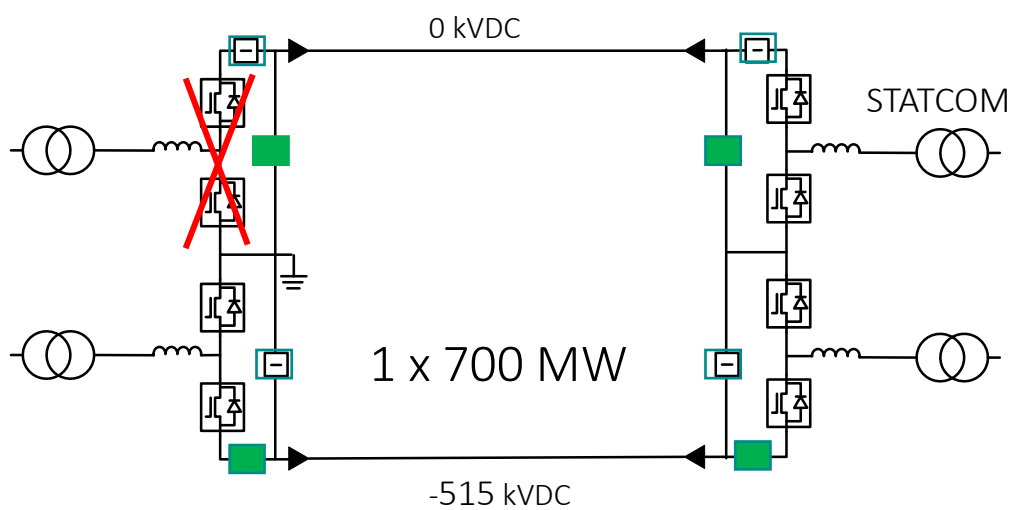
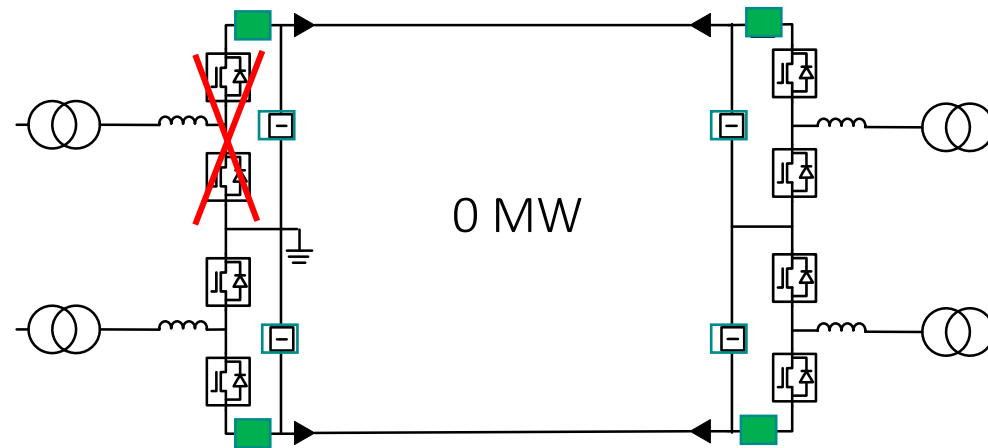
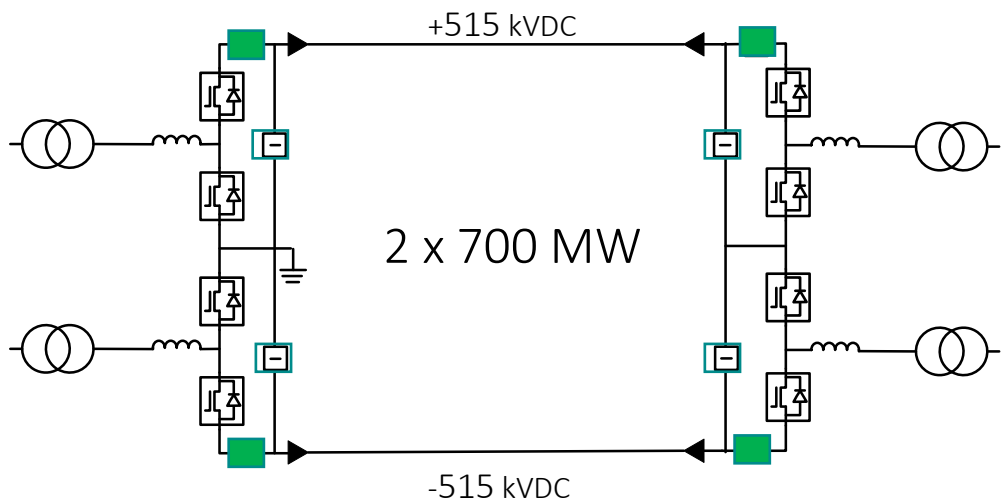


Rigid bipole with HSS for monopolar operation

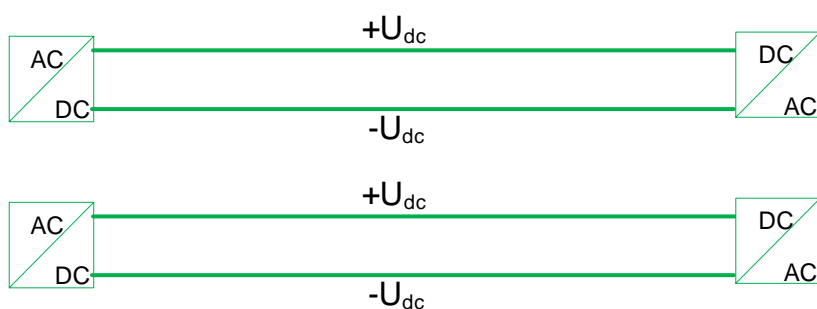


VIKING LINK

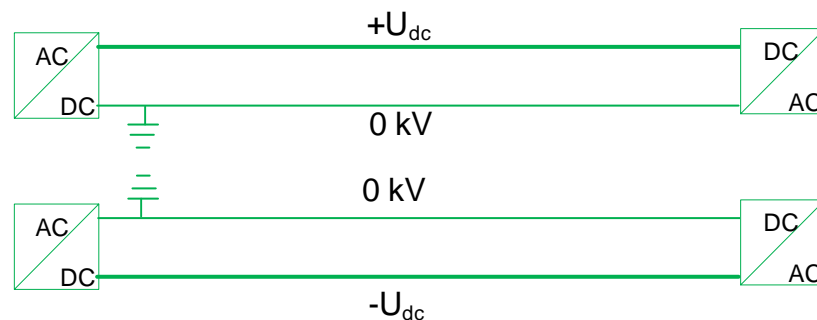
Rigid bipole with HSS for monopolar operation



TO UAFHÆNGIGE MONOPOLER



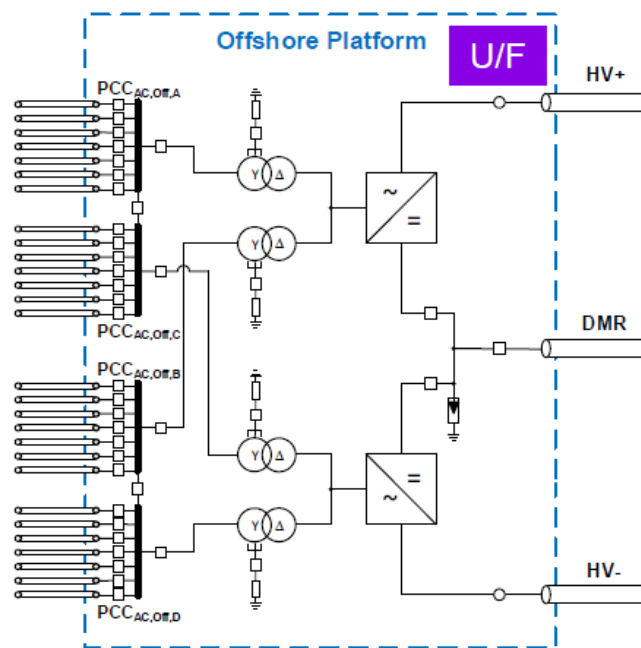
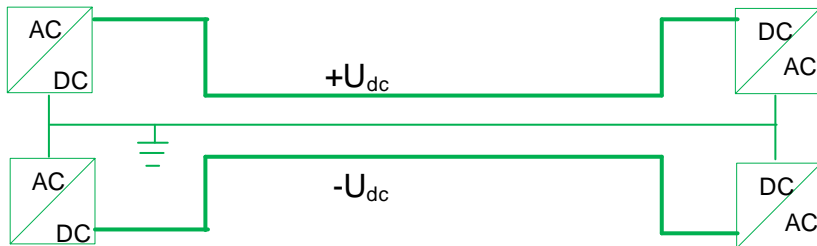
Symmetriske monopoler



Asymmetriske monopoler

- Kabler: 4 kabler og 2 udlægninger (bundles parvis)
- Stor forsyningsikkerhed
 - Usandsynligt at samme hændelse kan påvirke begge poler
- Symmetriske monopoler (f.eks. +/-320 kV)
 - Kan **ikke** kobles sammen med MTDC i Nordsøen (bipol, 525 kV)
- Asymmetriske monopoler
 - Kan kobles sammen med MTDC i Nordsøen

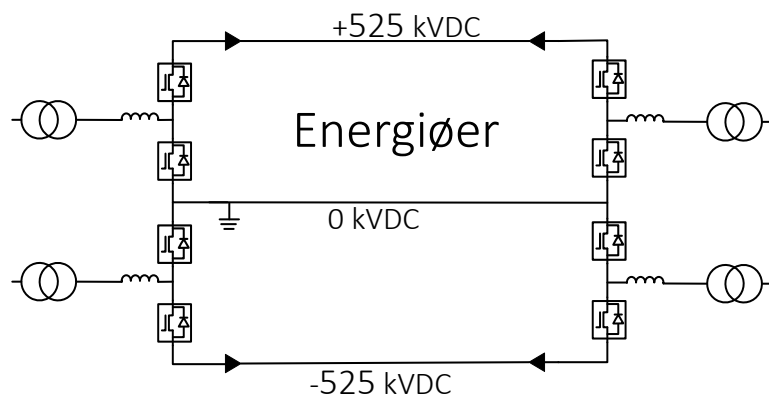
BIPOL MED METALLISK RETUR (DMR)





- To polkabler og et returkabel
- Udkobling ved fejl
 - Konverterfejl: Bipol → monopol
 - Enkelt fejl på polkabel: Bipol → monopol
 - Fejl på begge polkabler: Bipoltrip
 - Bundling af kabler?
 - Fejl på DMR:
 - Risiko for bipolartrip (afhængig af balancering)
 - Kan startes op som rigid bipolar som radial forbindelse
- Hver konverter kan have hvert sit offshore AC-net
 - Simplere grid-forming kontrol
 - Ikke behov for effektbalancering mellem poler

BUNDLEDE KABLER?

Diskussion om der kan tillades bundling af kablerne til Danmark

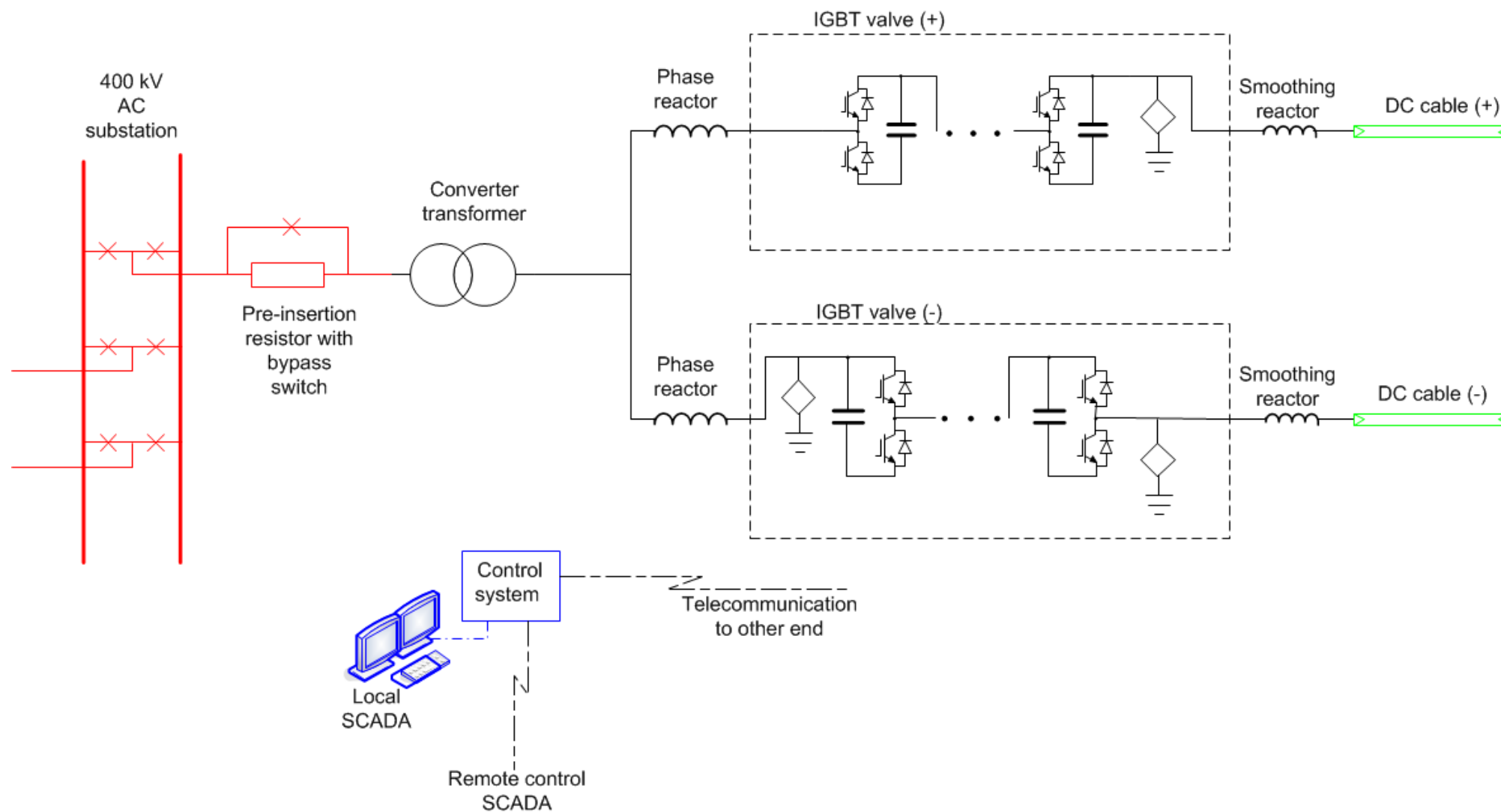


 <p>Option 1</p>	 <p>Option 2</p>
Bundled	Unbundled with two metallic returns

- Bundlede kabler er billigere at installere
- Risiko for at man kan miste hele kapaciteten (1200 MW i DK2) hvis f.eks. et anker ødelægger mere end et kabel
- I tysk farvand skal kablerne bundles aht. magnetfeltet (forstyrrelse af magnetkompass)

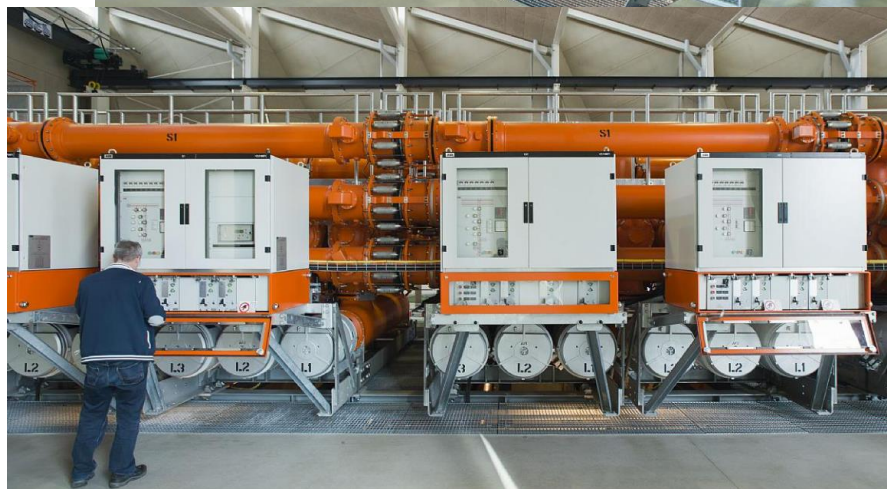
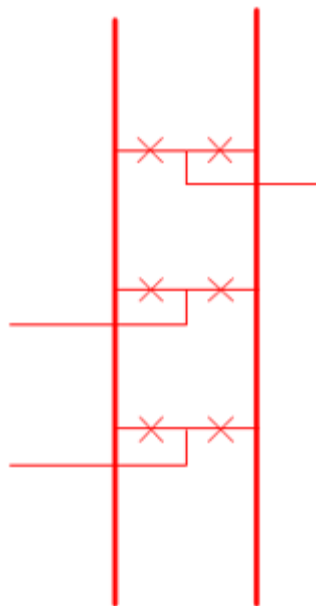


VSC - HOVEDKOMPONENTER



REV - 400 KV AC-STATION

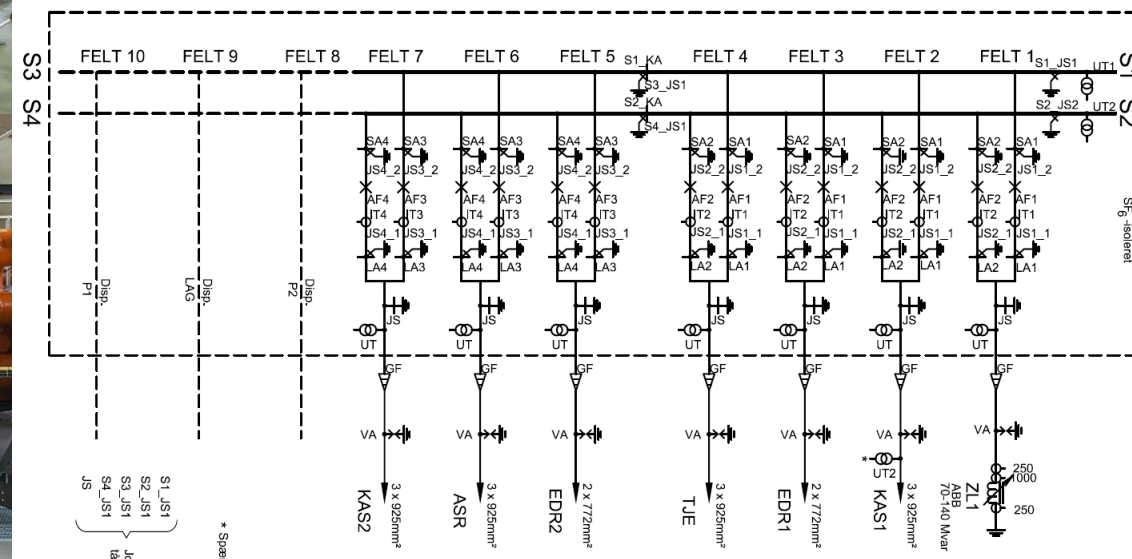
400 kV
AC
substation



400 kV GIS-anlæg

To-bryder station

Opdelt i to sektioner



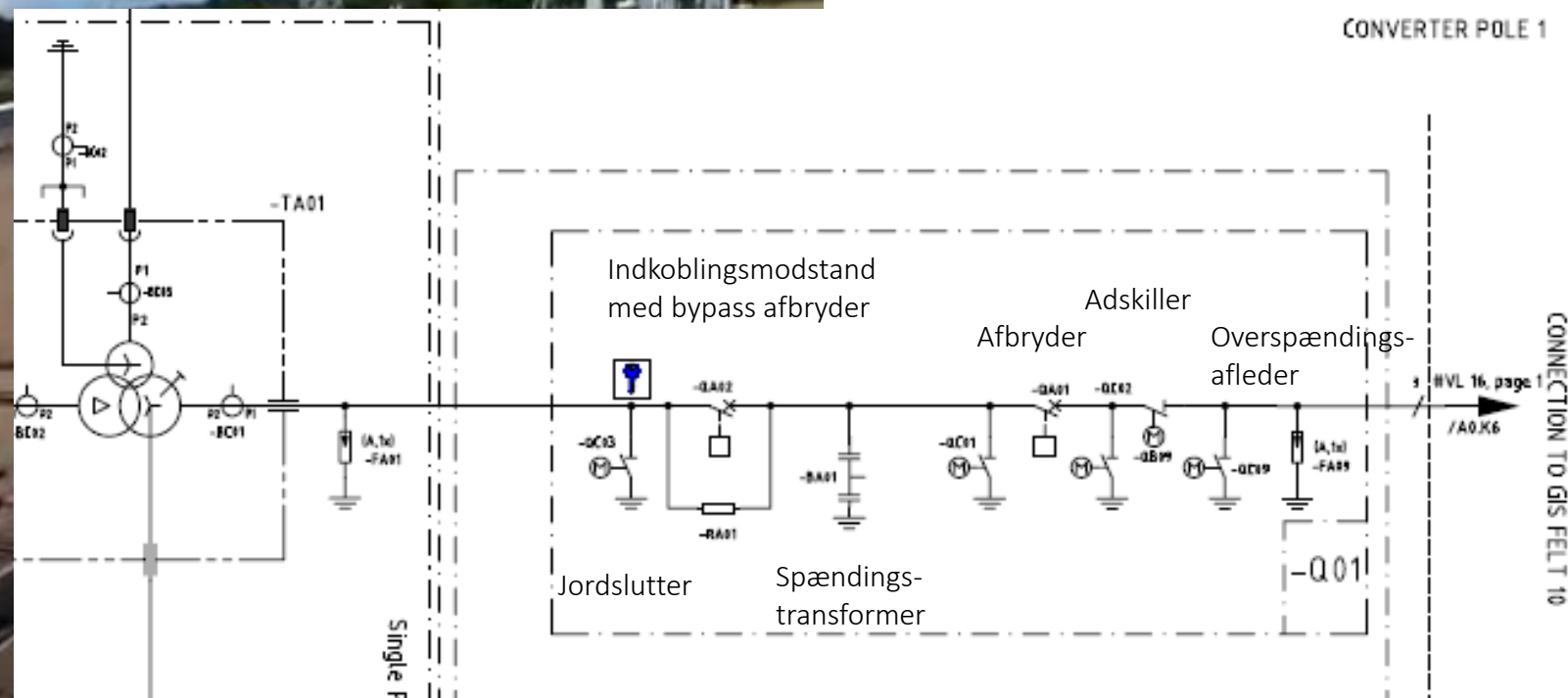
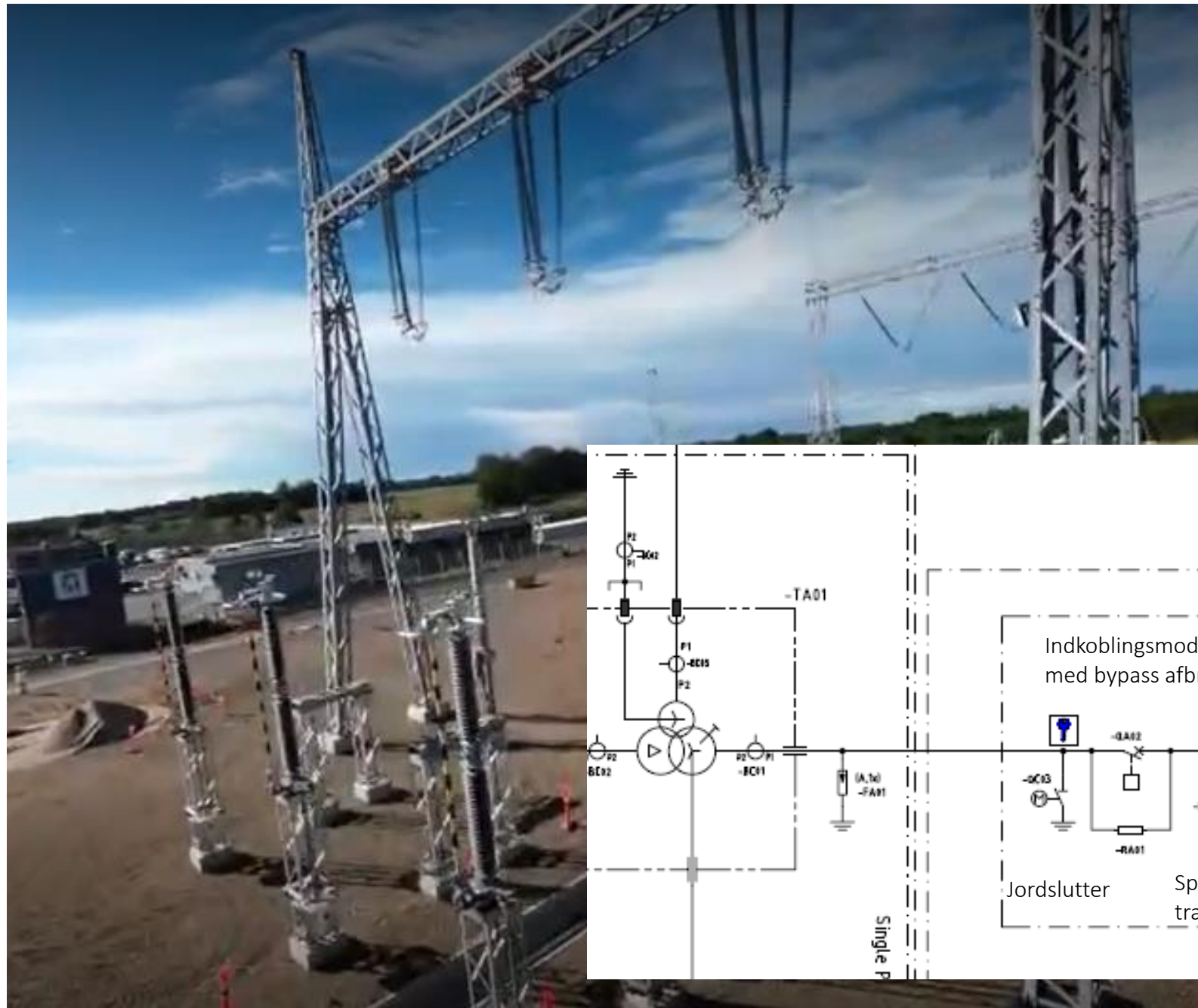




REVSING

400 kV AIS mellem 400 kV station og konvertertransformere

Kan leveres i GIS undtagen pre-insertion resistor



INDKOBLINGSMODSTAND

COBRAcable

PIR med adskiller til
forbikobling

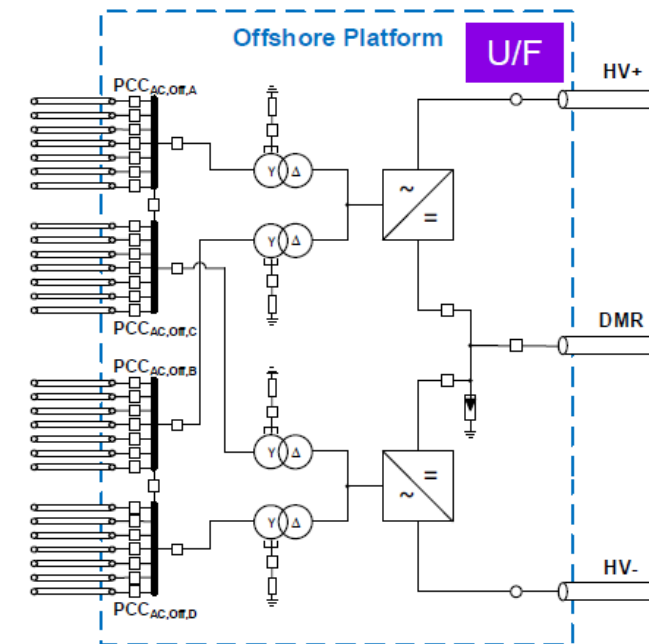


SK4

PIR med 400 kV afbryder til
forbikobling



KONVERTERTRANSFORMERE



Kan placeres op af bygning (Viking) eller fritstående (COBRA og SK4)

Onshore: Tre en-fasede transformere pr. pol

Reserve transformer:

- "Hurtigt" flyttes på plads
- Kan tilsluttes alle tre steder uden flytning

Offshore platform:

To parallelle trefasede transformere pr. pol (f.eks. 70% rating pr. trf.)

KONVERTERTRANSFORMERE

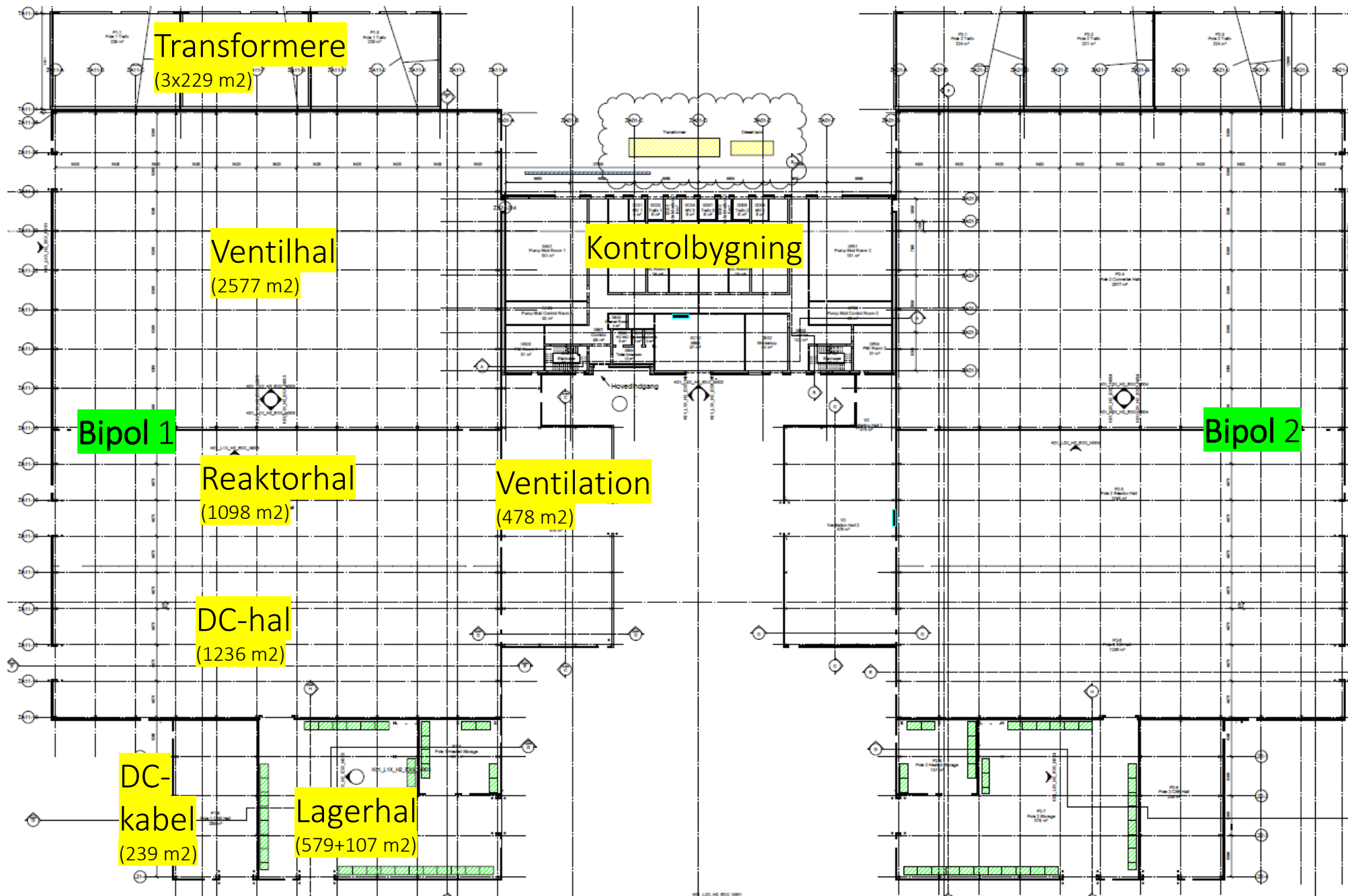


Viking: 400 / 290 kV

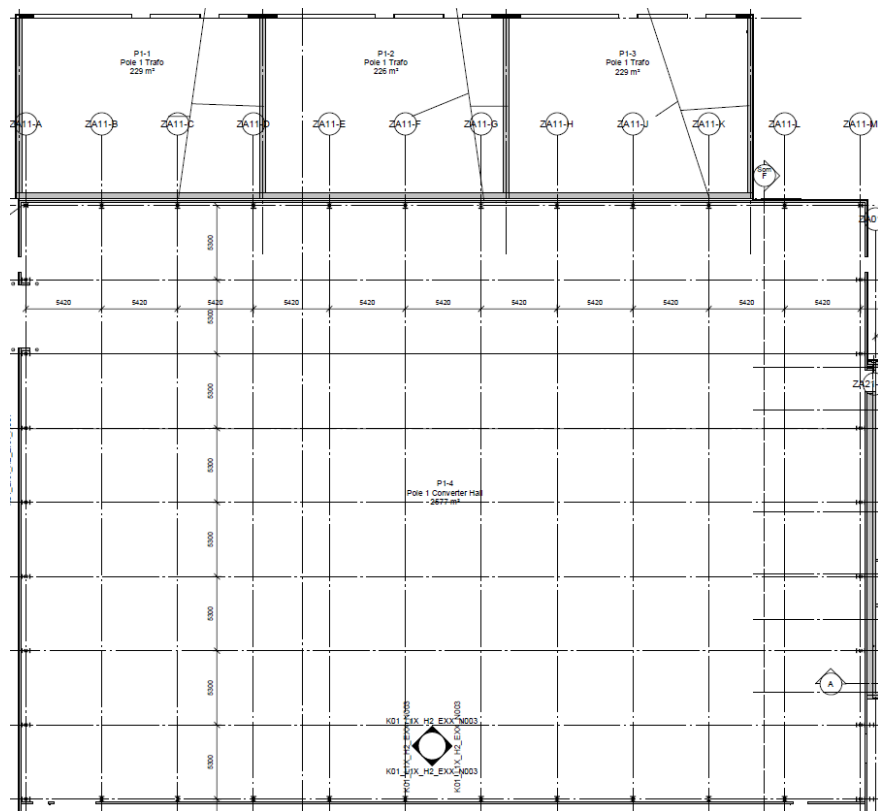
Viklingskobler holder konstant spænding på konverteren ved variation af 400 kV spændingen

Asynkron monopol: DC-offset på spændingen på konvertersiden

Tertiærvikling: 20 kV til egenforsyning



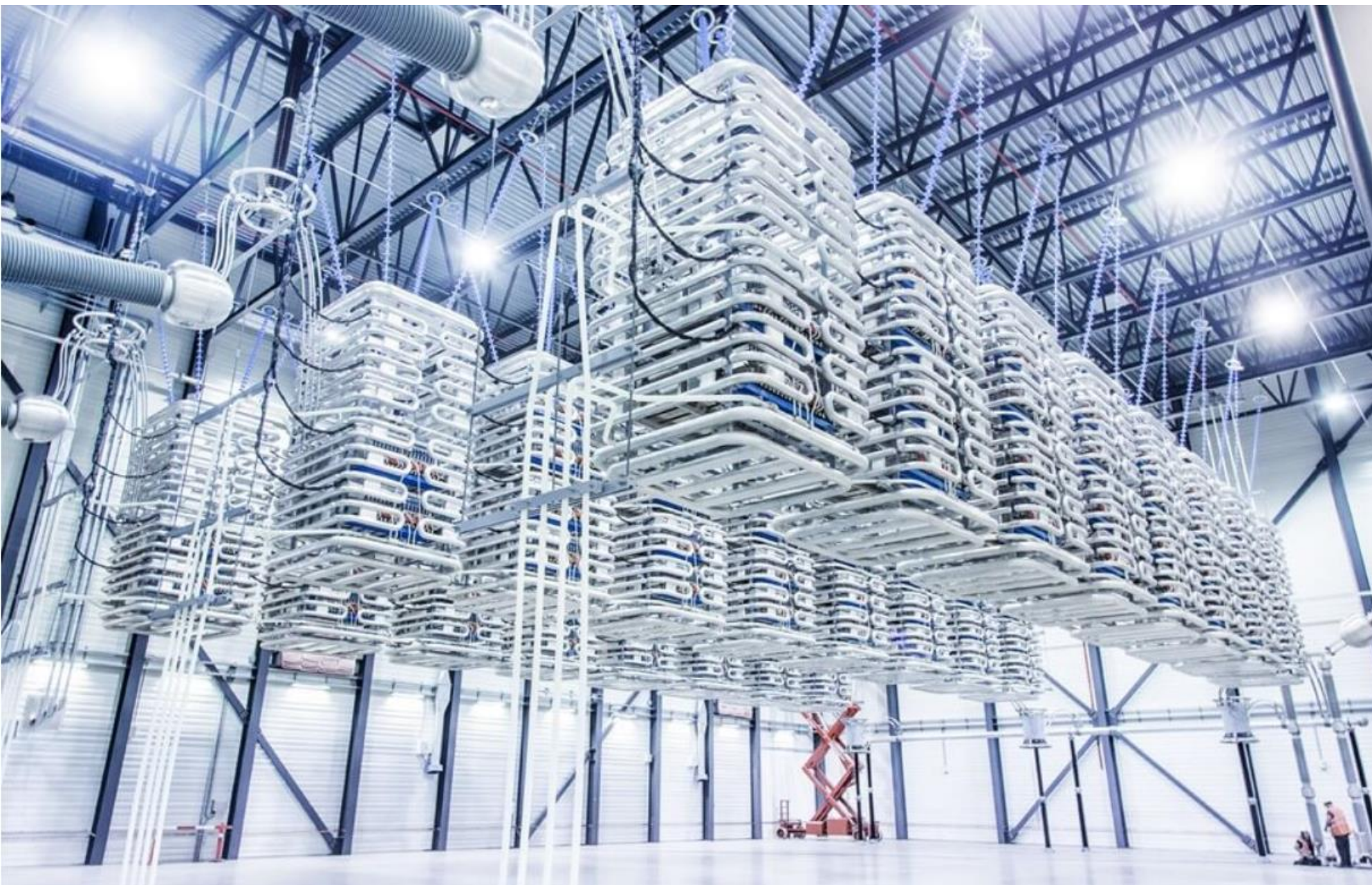
GENNEMFØRINGER FRA TRANSFORMERE



VKL gennemføring fra transformere direkte ind i ventilhal



SK4, AC-gennemføring, jordslutter



VENTILHAL

SK4

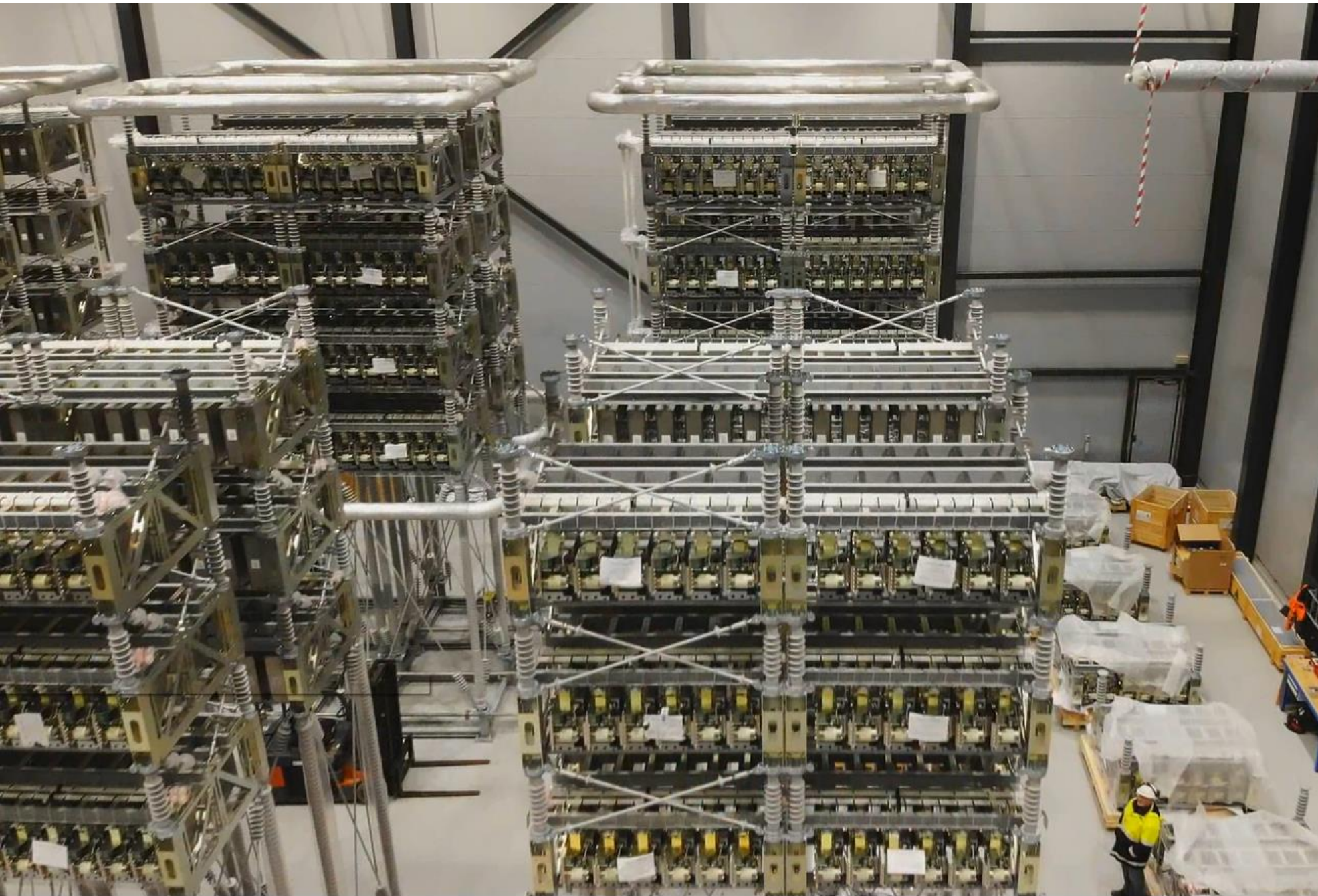
Hitachi

HVDC Light

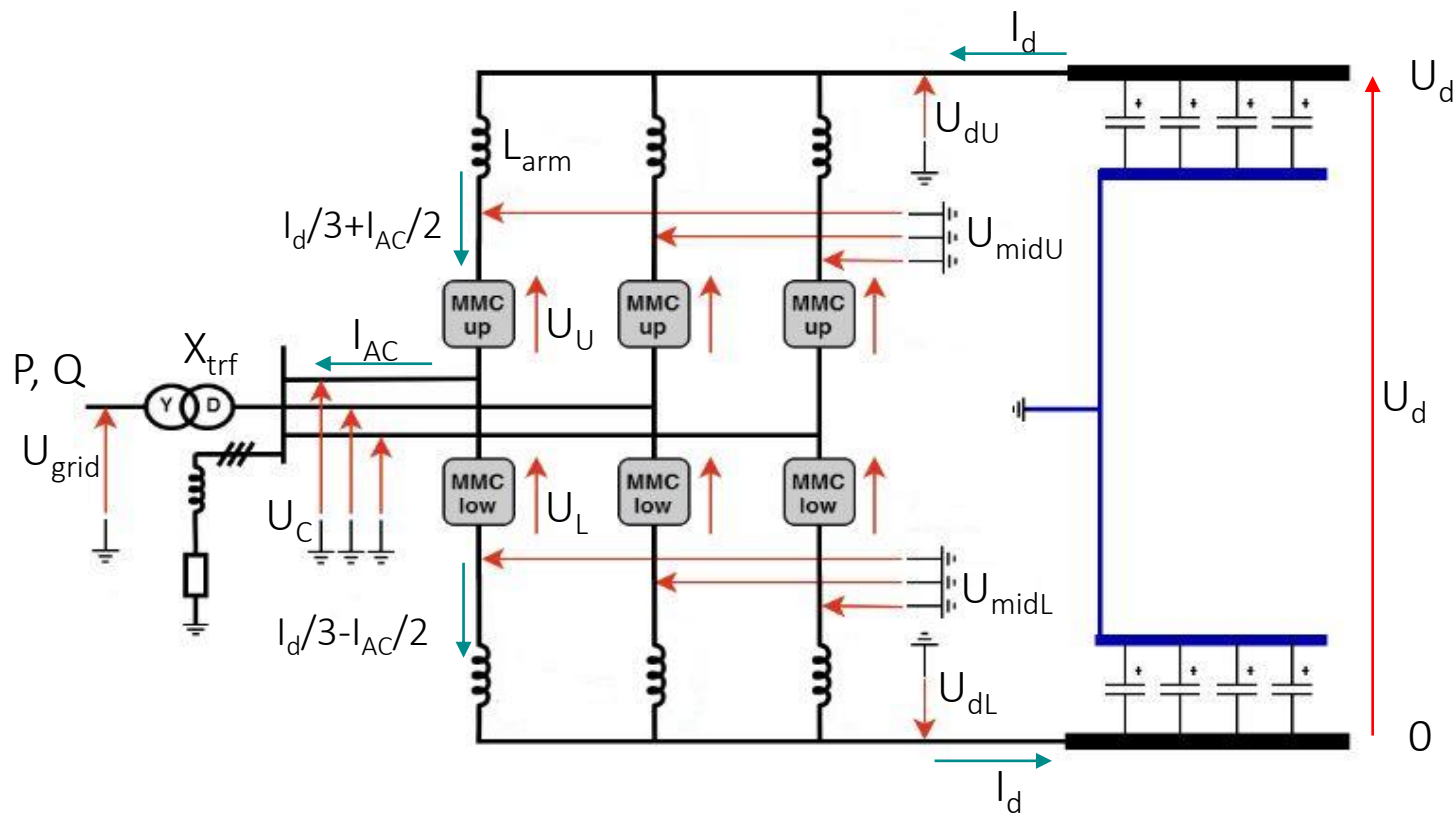
generation 4

VENTILHAL

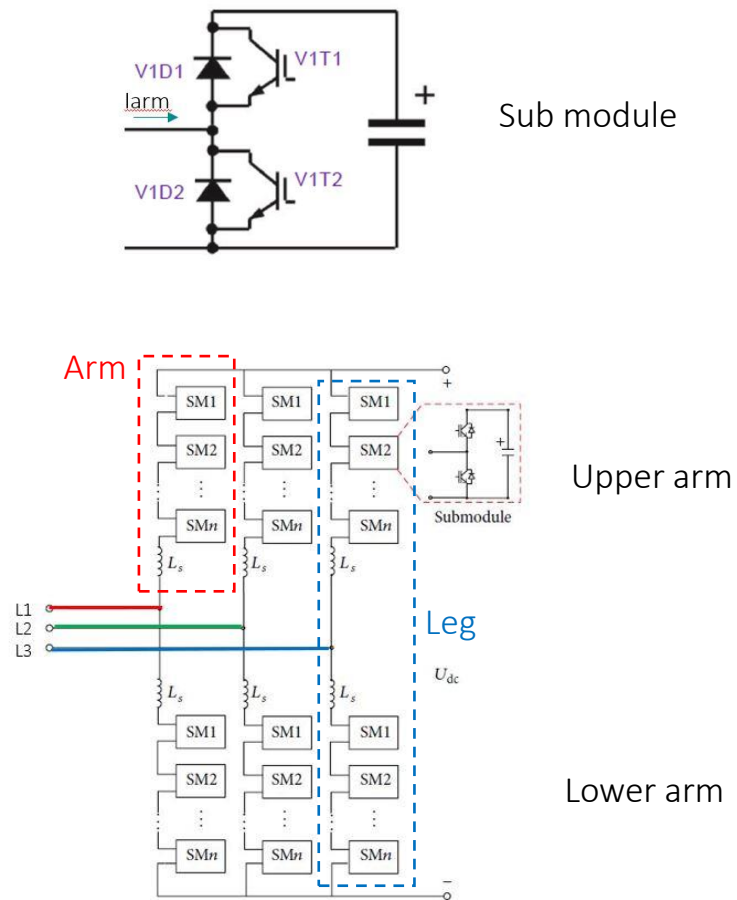
COBRAcable
Siemens Energy
HVDC Plus



VSC MMC KONVERTER

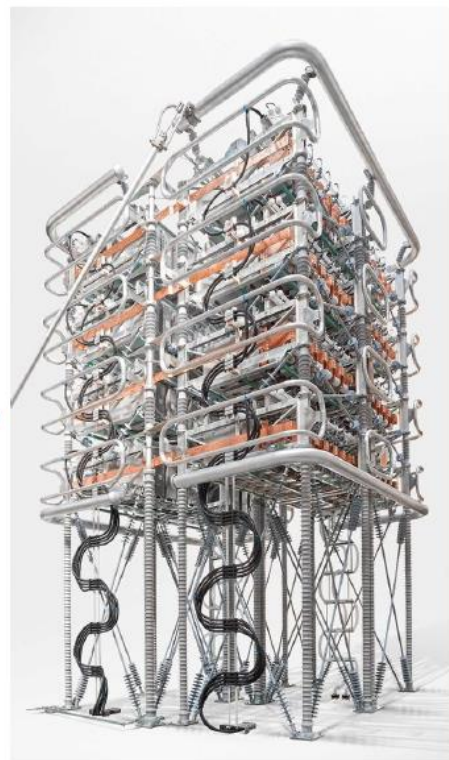
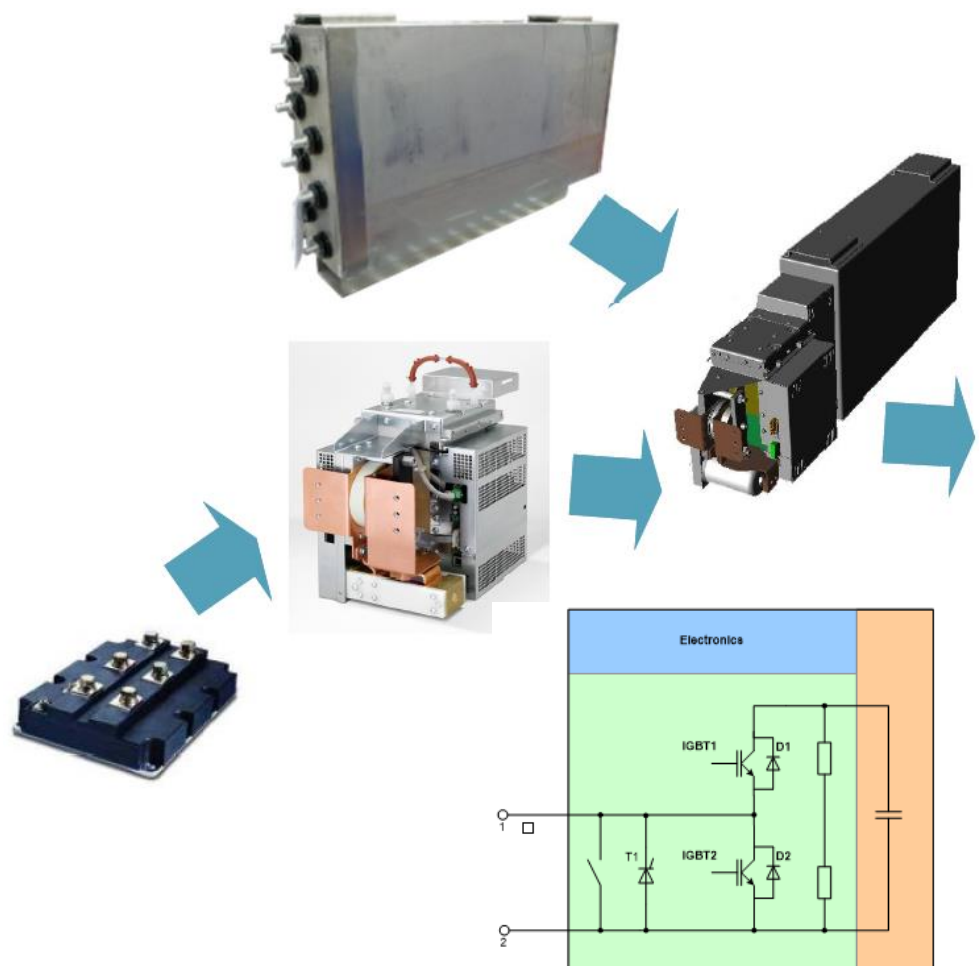


Voltage Source Converter
Modular Multi-level Converter



Viking Link: 232 submodules i hver arm

MMC SUBMODULES



Siemens Energy, HVDC Plus

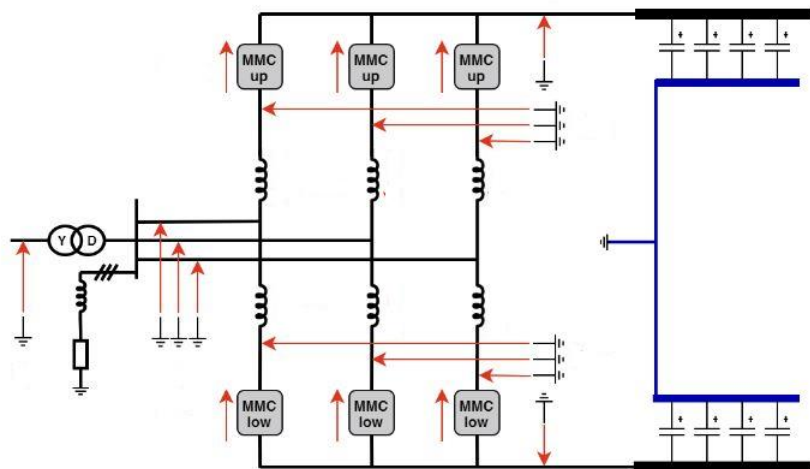
- Standard IGBT'er
- Kondensator
- Bypass tyristor (DC fejl)
- Bypass switch (fejlrant SM)
 - Redundante SM
 - Fejlrante SM udskiftes ved revision



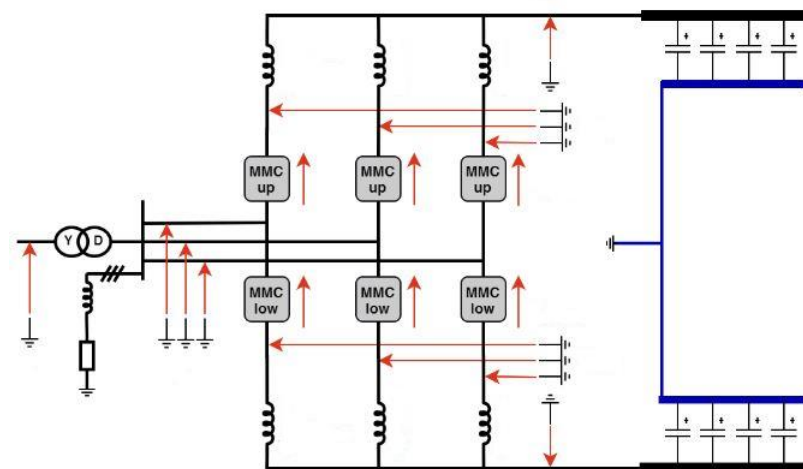
Hitachi
Press-pack
IGBT

Ikke behov for
tyristor

PLACERING AF ARM-REAKTORER



Reaktor på AC-side
(Hitachi, GE)

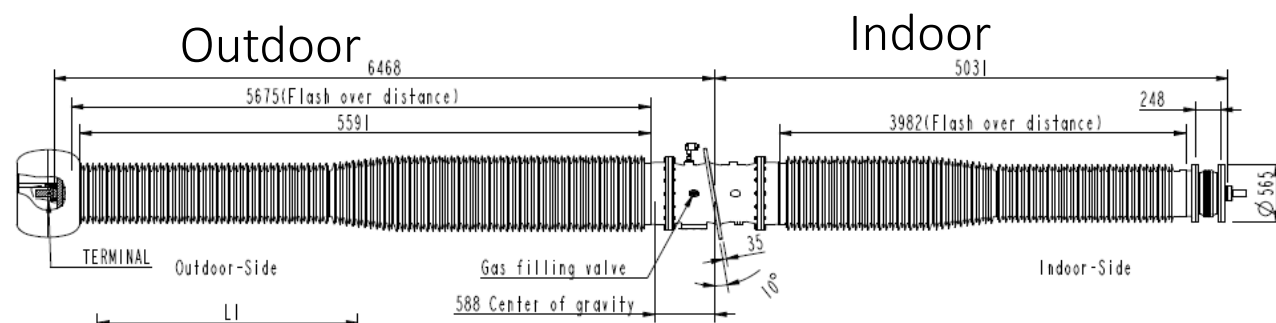


Reaktor på DC-side
(Siemens Energy)

VÆG-GENNEMFØRINGER



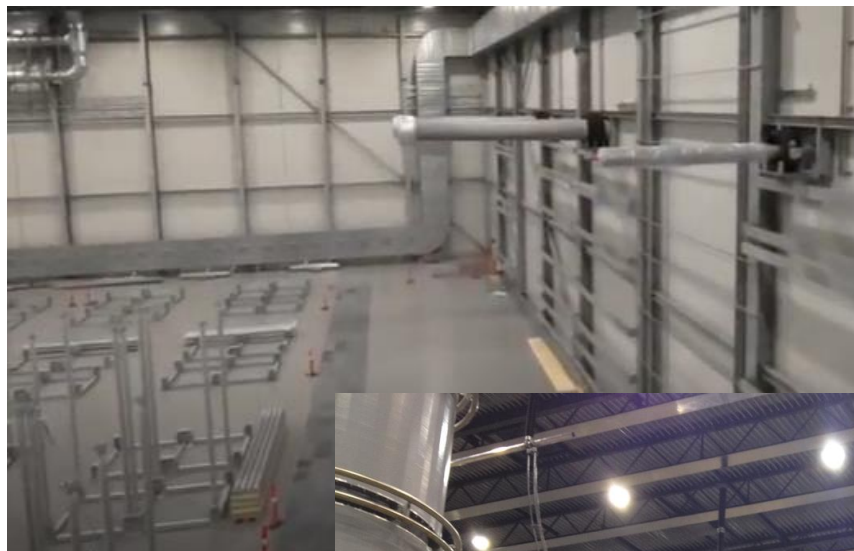
VKL gennemføring ventilhal/reaktorhal
(strømtransformere)



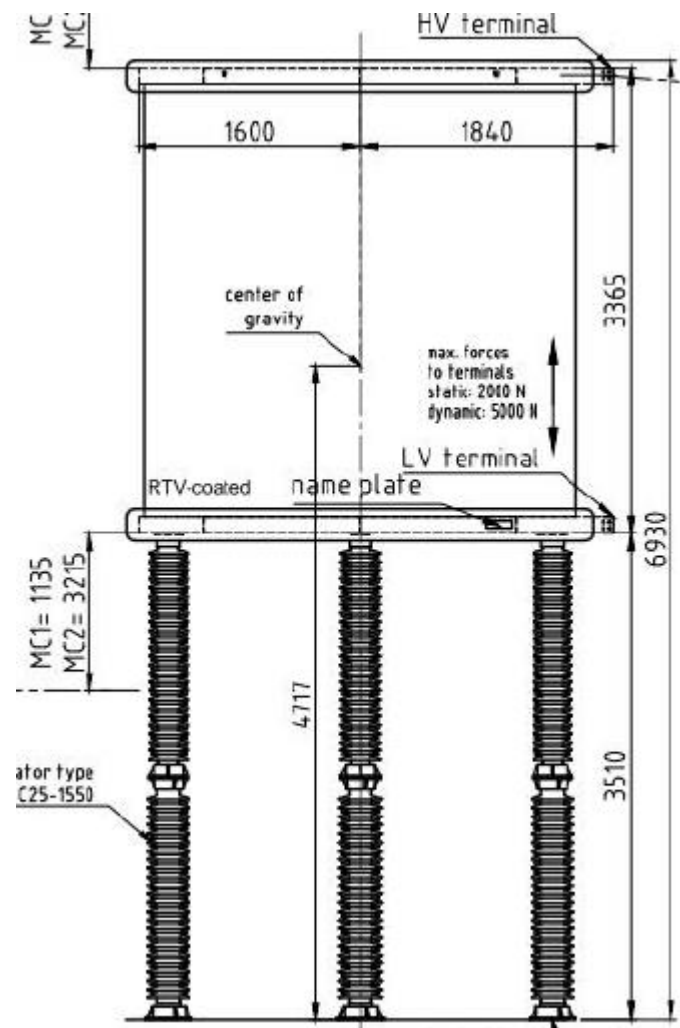
Bushings Data:		
Bushing type	SF6 insulated	
Material	Composite	
Rated Voltage	515	kV _{dc}
Lightning Impulse	1140	kV
Switching Impulse	958	kV
Dry Power Frequency	534	kV _{rms}
DC withstand voltage 2 hours	754	kV _{dc}
Rated Current	3000	A
Polarity Reversal	± 629	kV _{dc}
Min Creepage Distance, Outdoors	25235	mm
Min Creepage Distance, Indoors	14400	mm
Filling Pressure at 20°C	0.57	MPa abs.
Mass at filling density appr.	1505	kg
Mass empty appr.	1430	kg

SK4 DC-gennemføring
ventilhal/udendørs

REAKTORHAL



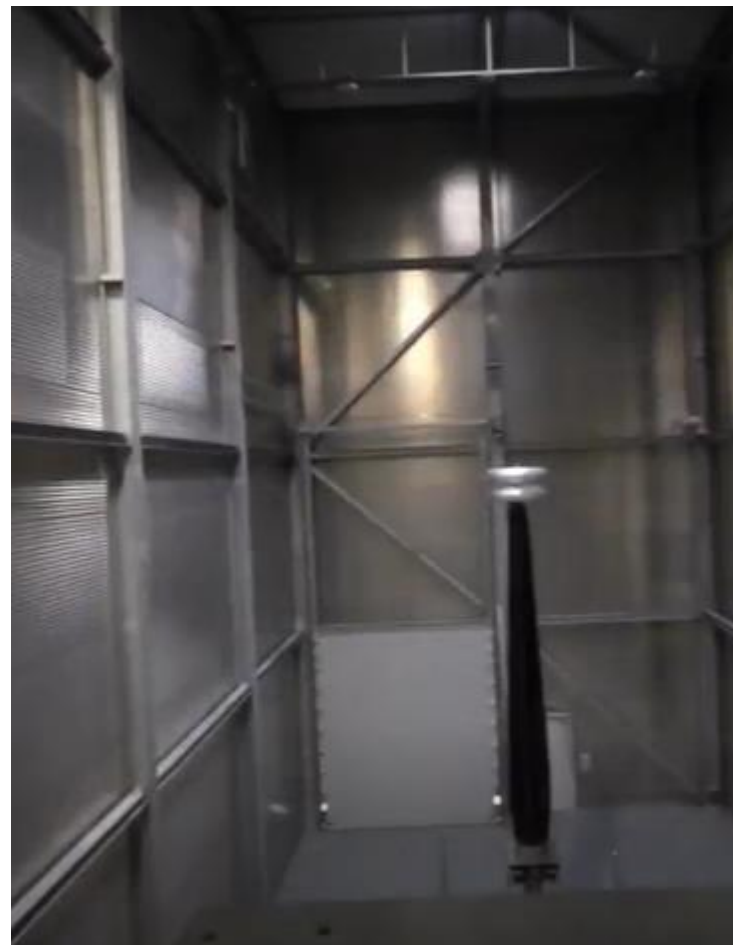
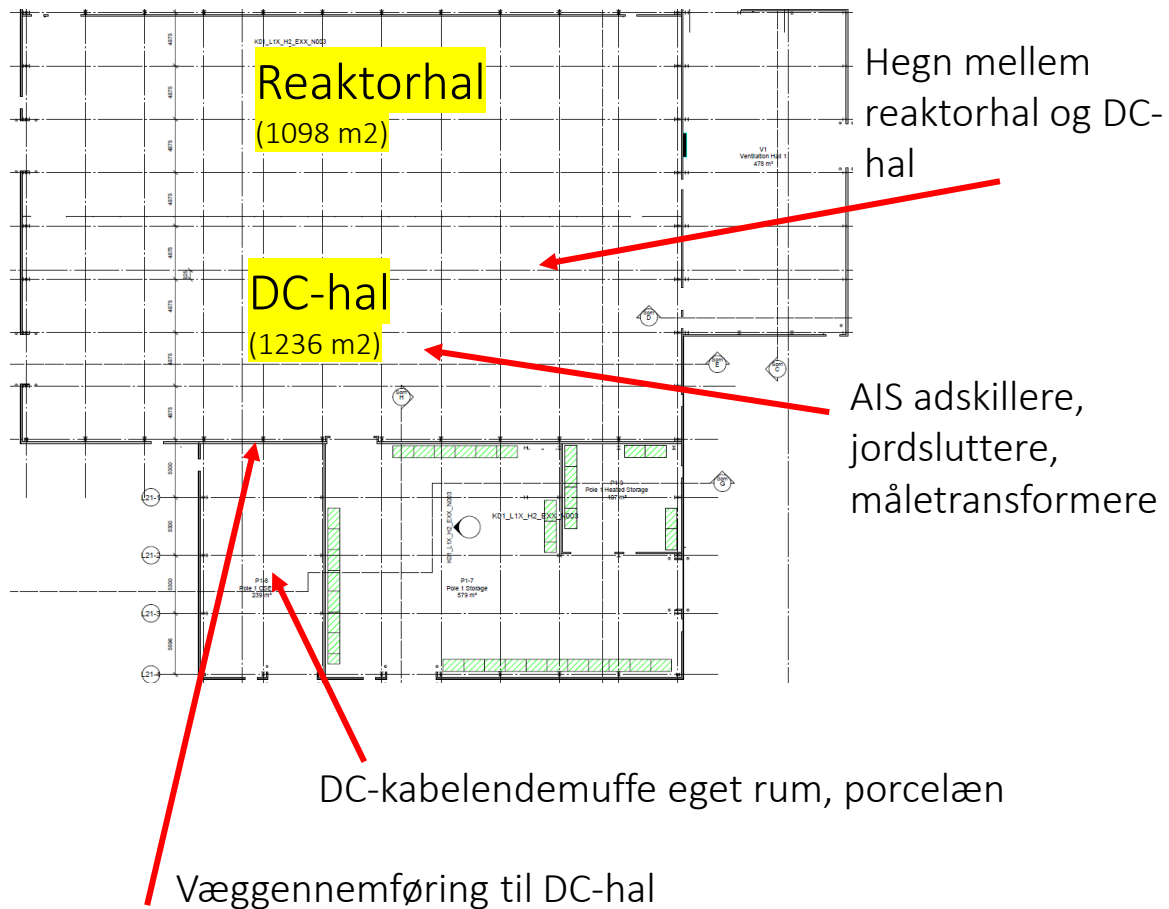
VKL reaktorhal



SK4 reaktorhal



DC-HAL OG KABELNDEMUFFE

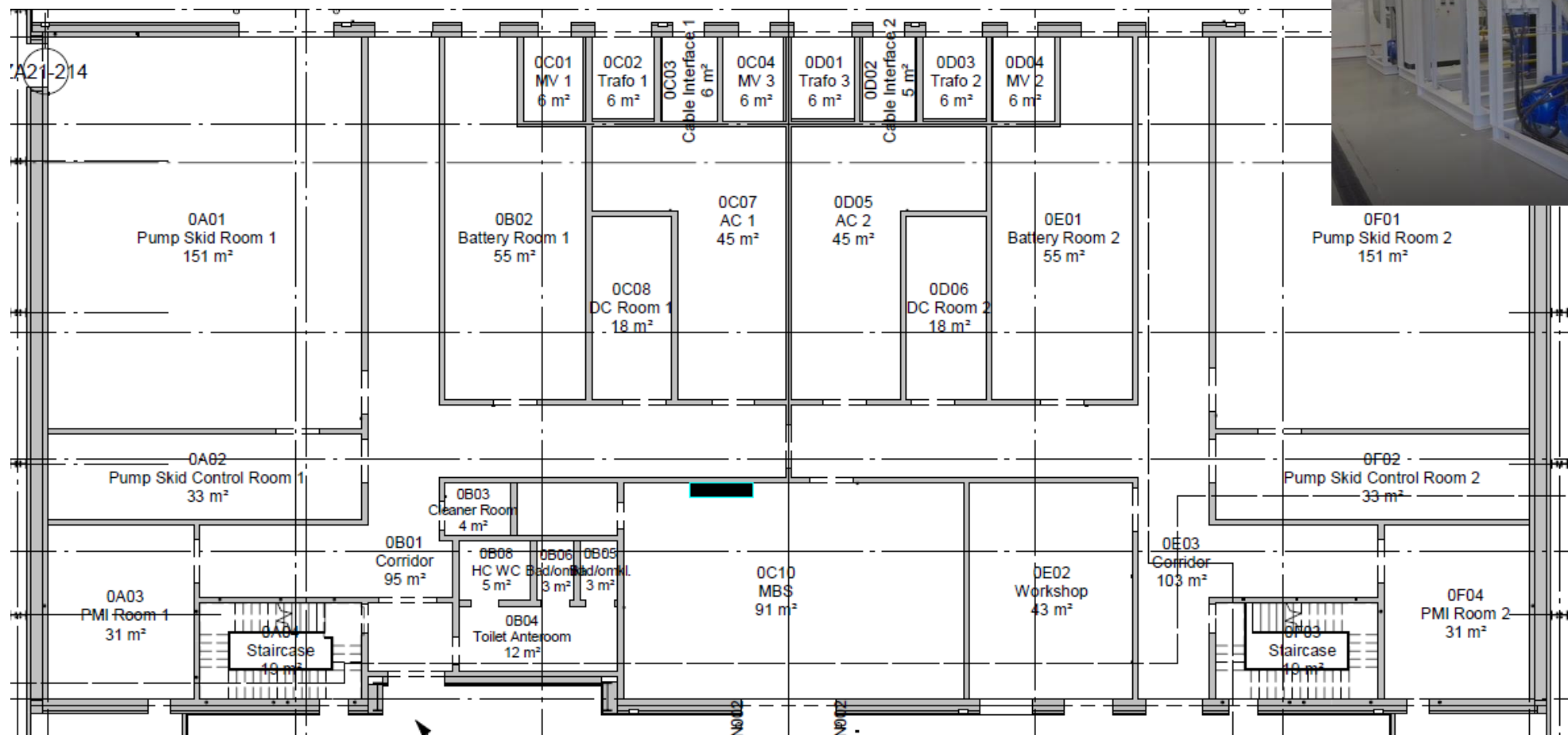


HØJSPÆNDINGS- TEST AF DC-KABEL

Efter installation af DC-kablet skal det testes med høj spænding
Testudstyret kræver meget plads



KONTROLBYGNING, NEDERSTE ETAGE

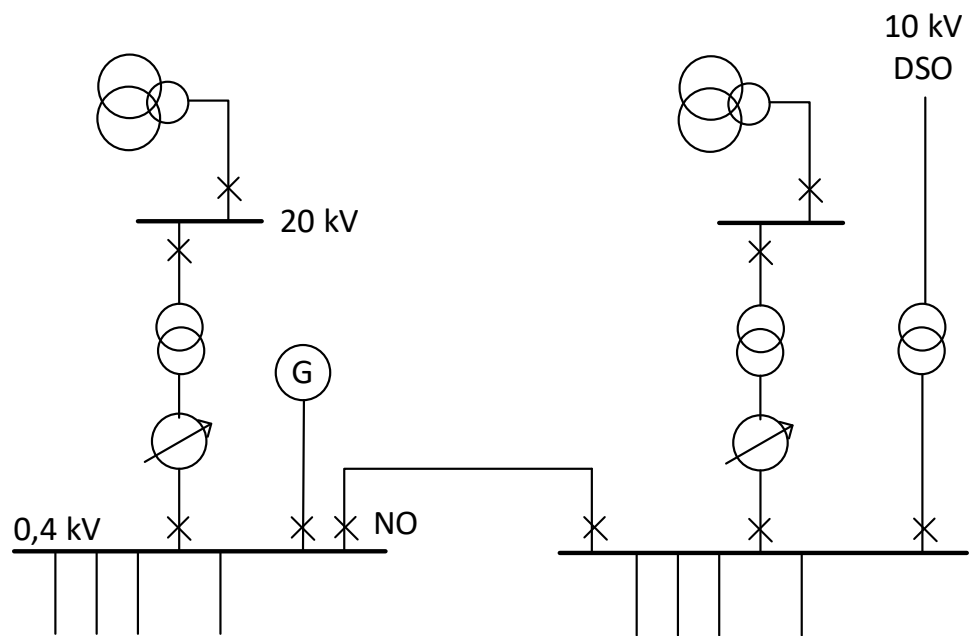


VENTILKØLING



- Submodules i ventilhal er vandkølede med meget rent vand (højspænding).
- Varmevekslere mellem fin- og råvand.
- Udendørs vand/luft kølere
- Mulighed for tilslutning af fjernvarme

EGENFORSYNING



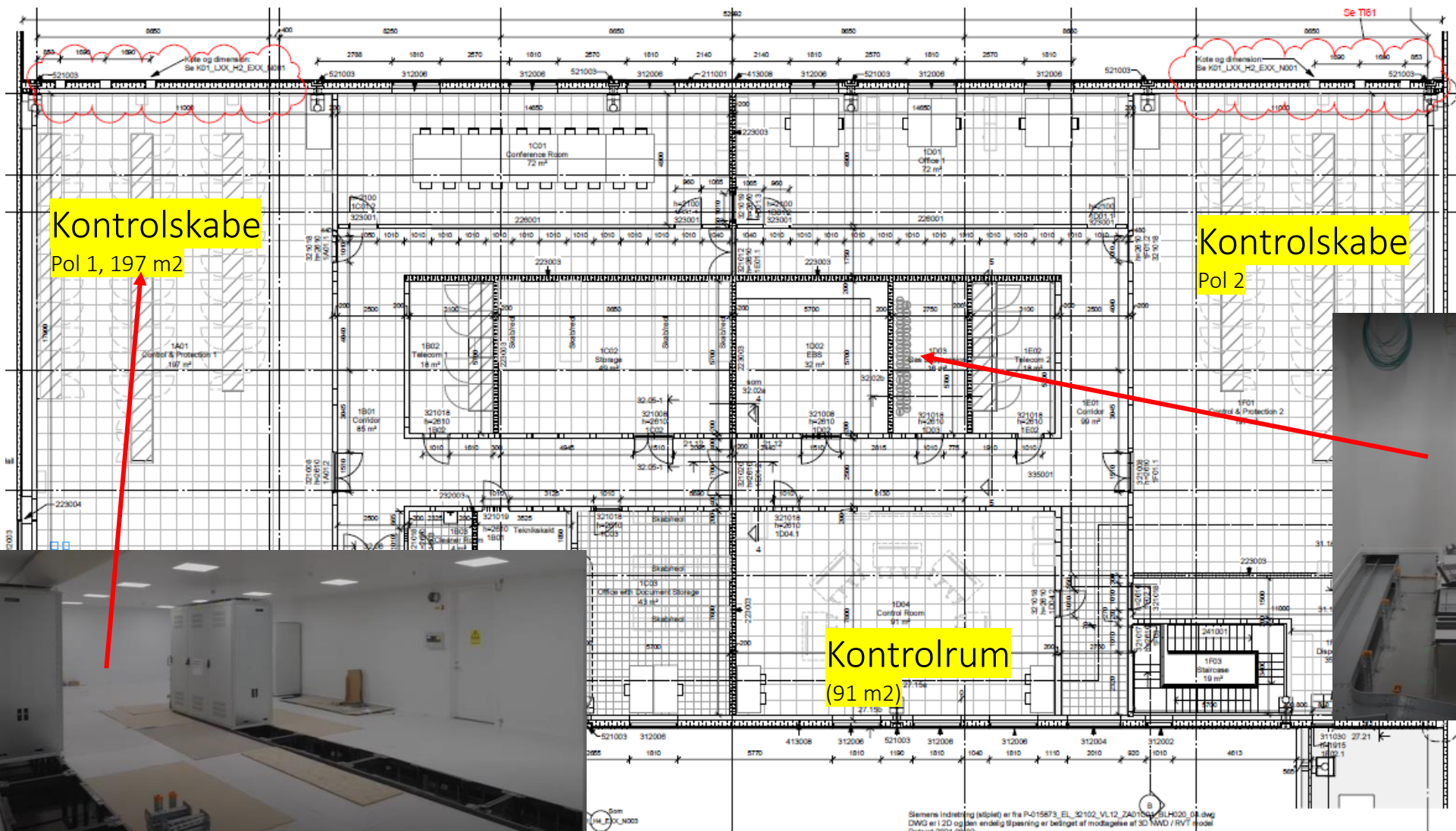
SK4, dieselgenerator



VKL

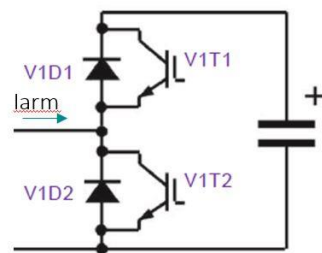
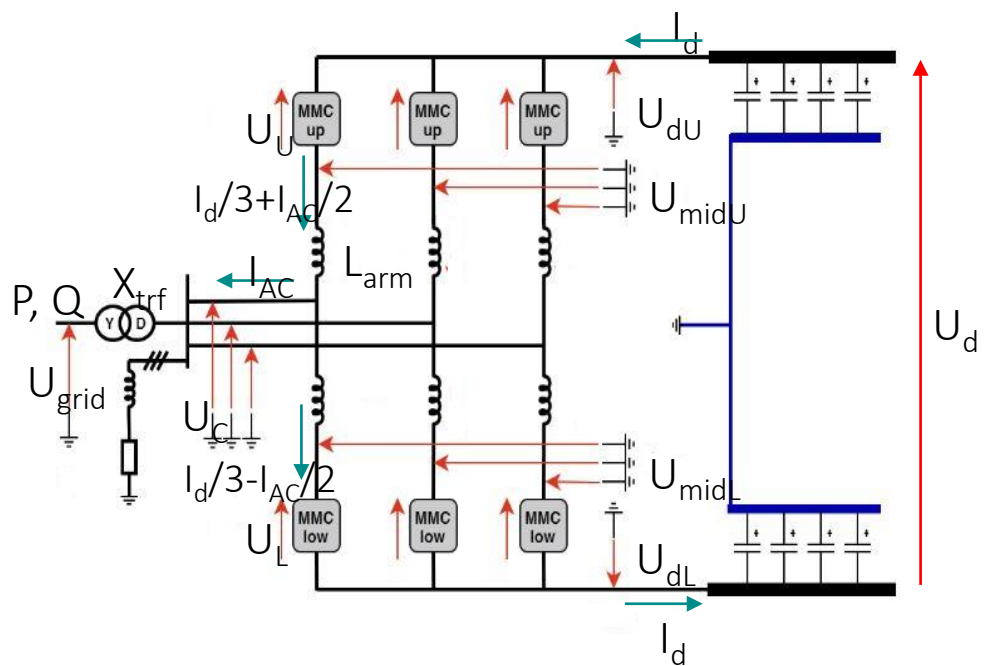


KONTROLBYGNING, 1. SAL



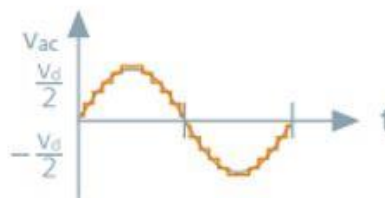
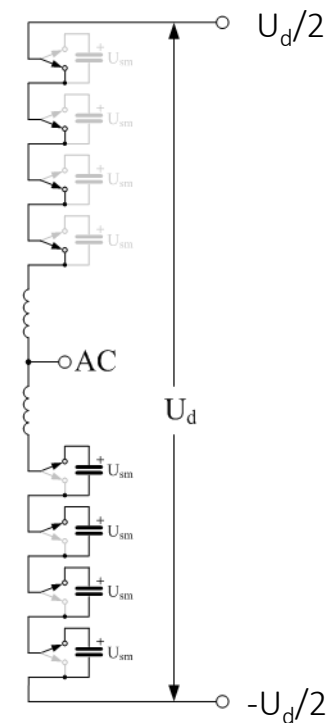
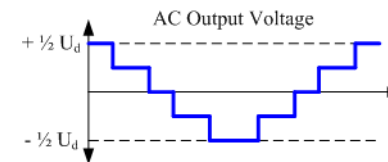
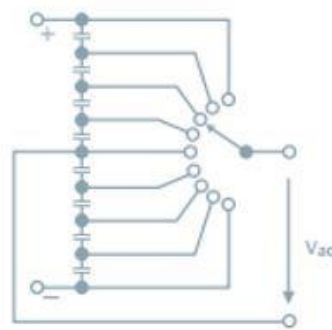
Funktion af VSC

MMC PRINCIP

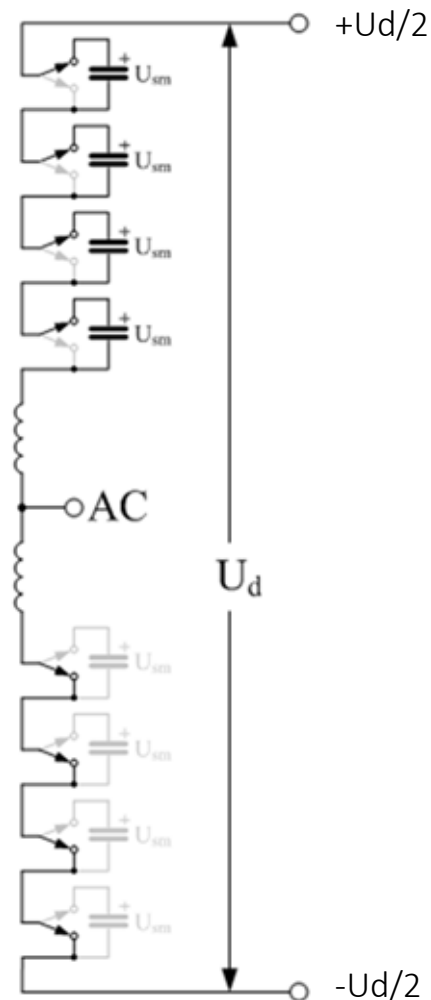
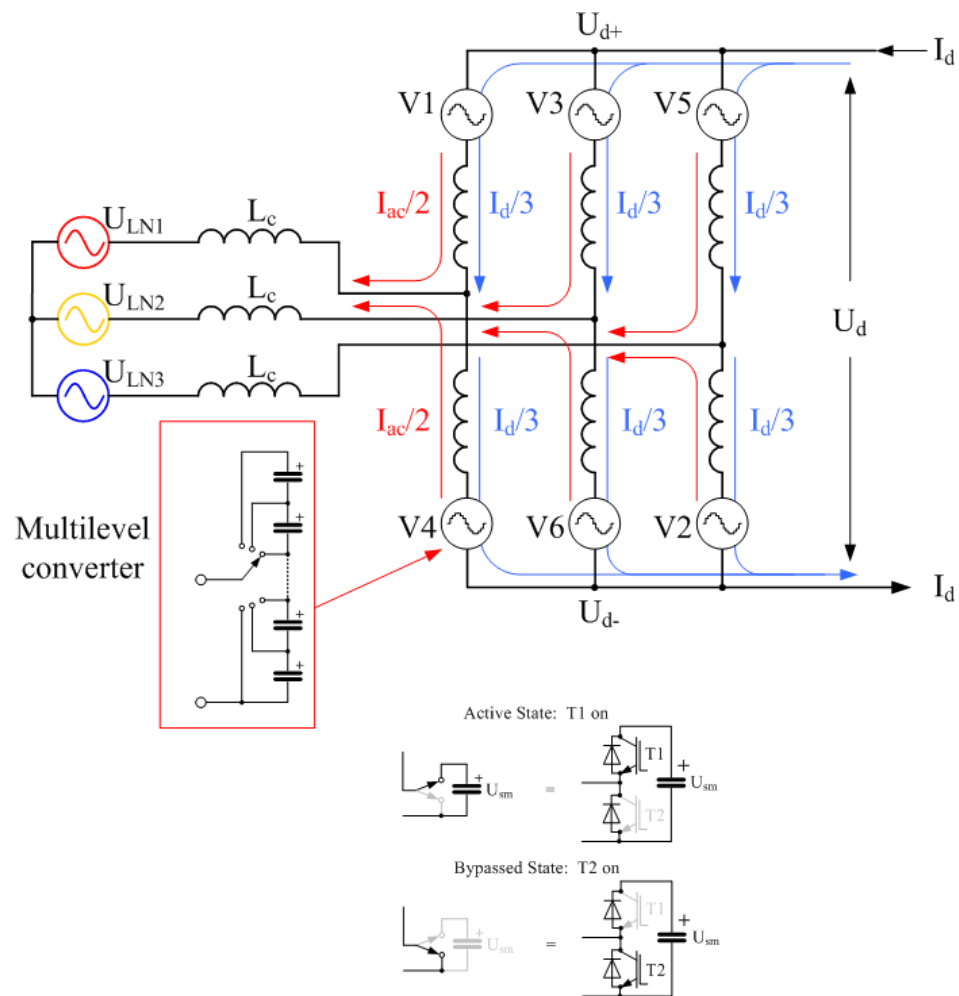


SM opladet til $U_d/4$

Multilevel



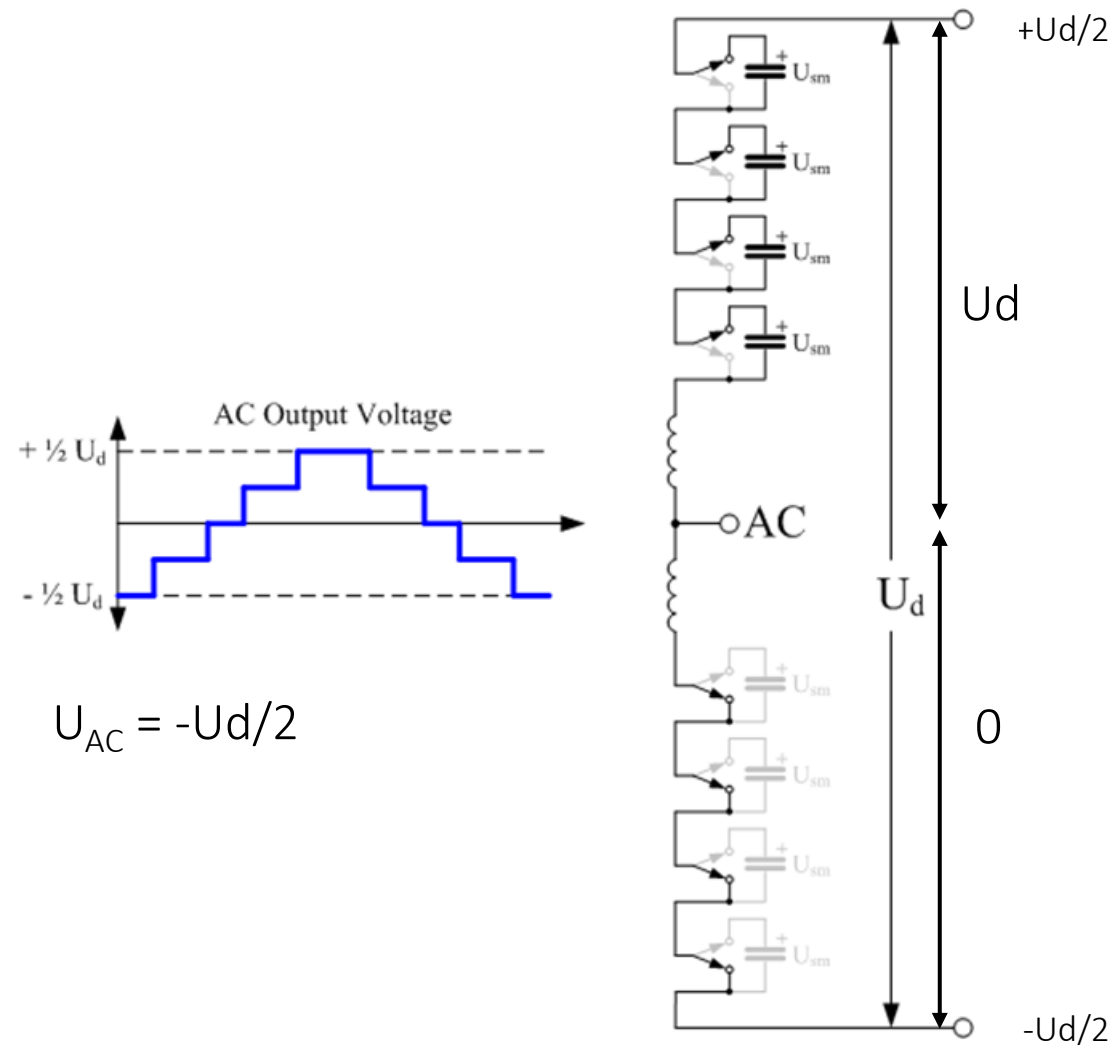
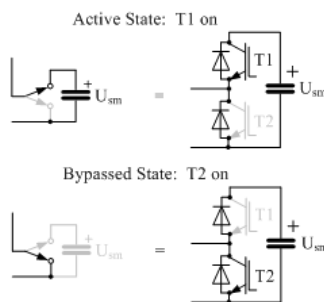
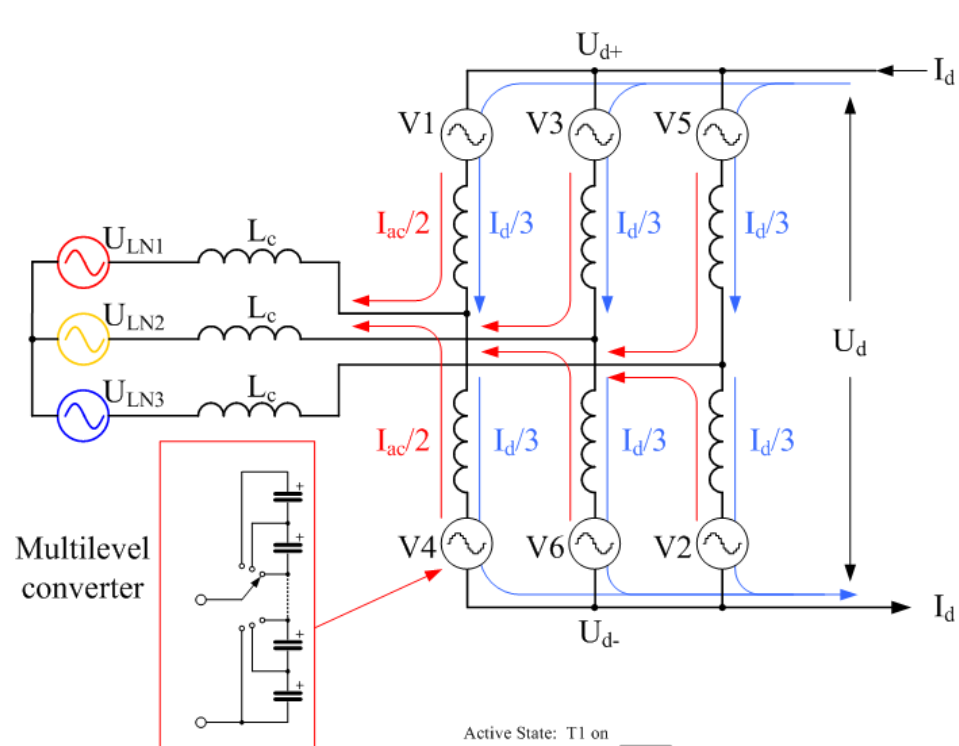
MMC VSC FUNKTION



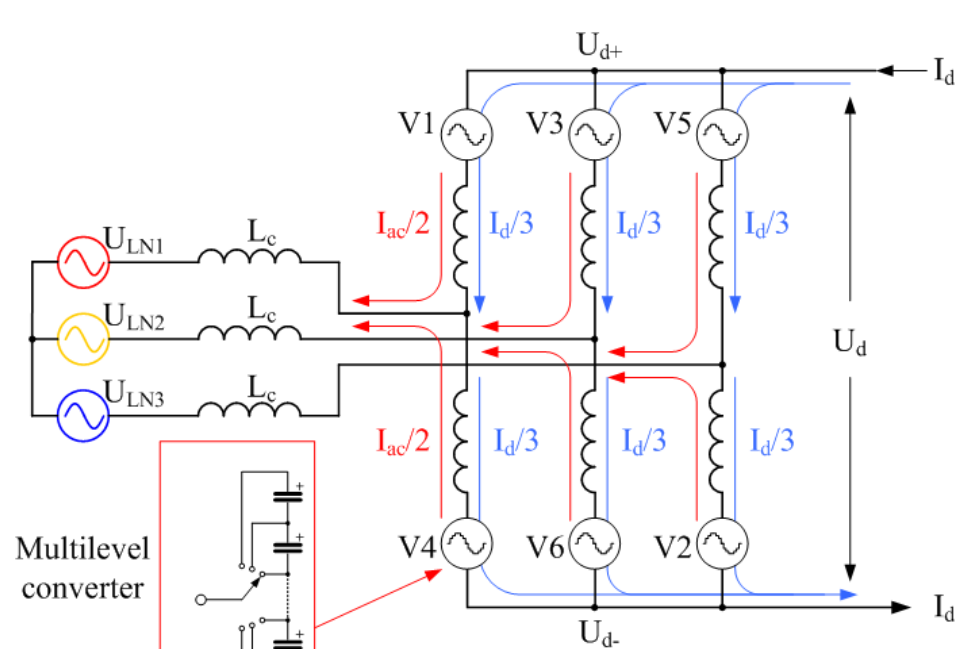
Kondensatorer i alle PM er fuldt opladet til $U_d/4$

Generering af AC-spænding på konverteren ved ind-/udkobling af submodules

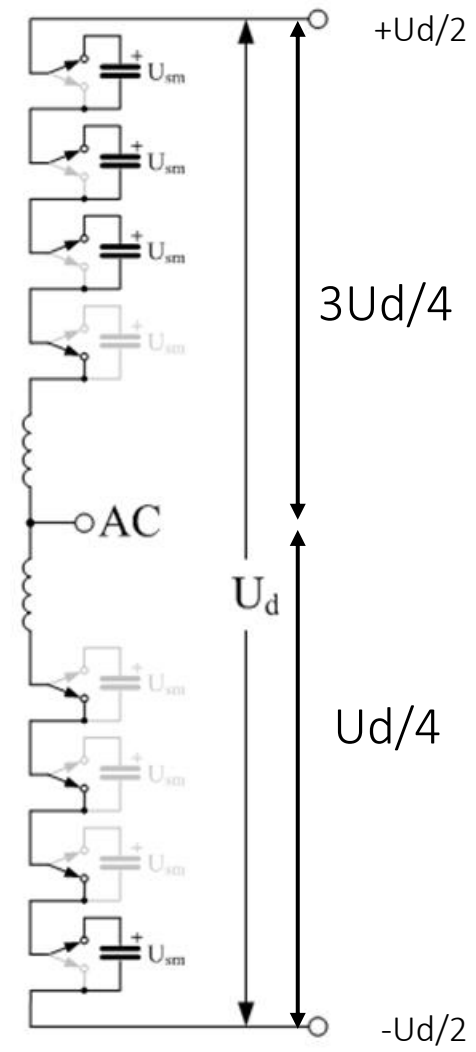
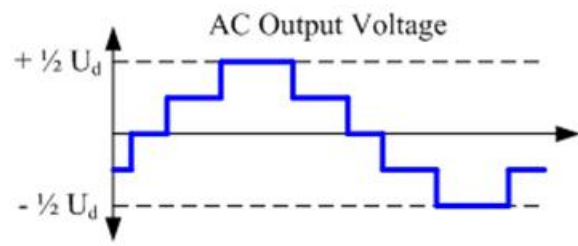
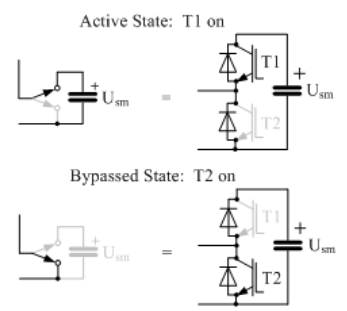
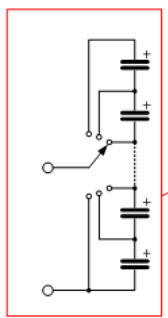
MMC VSC FUNKTION



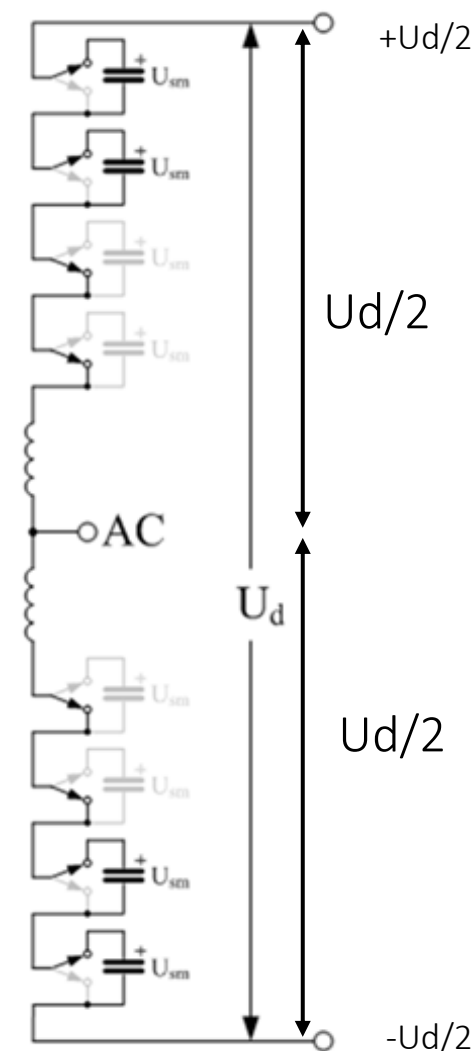
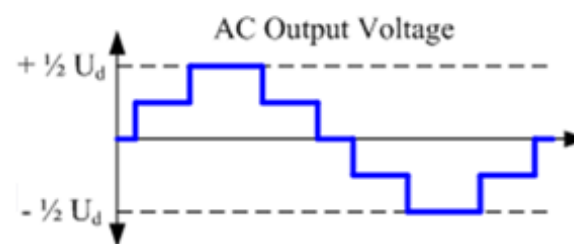
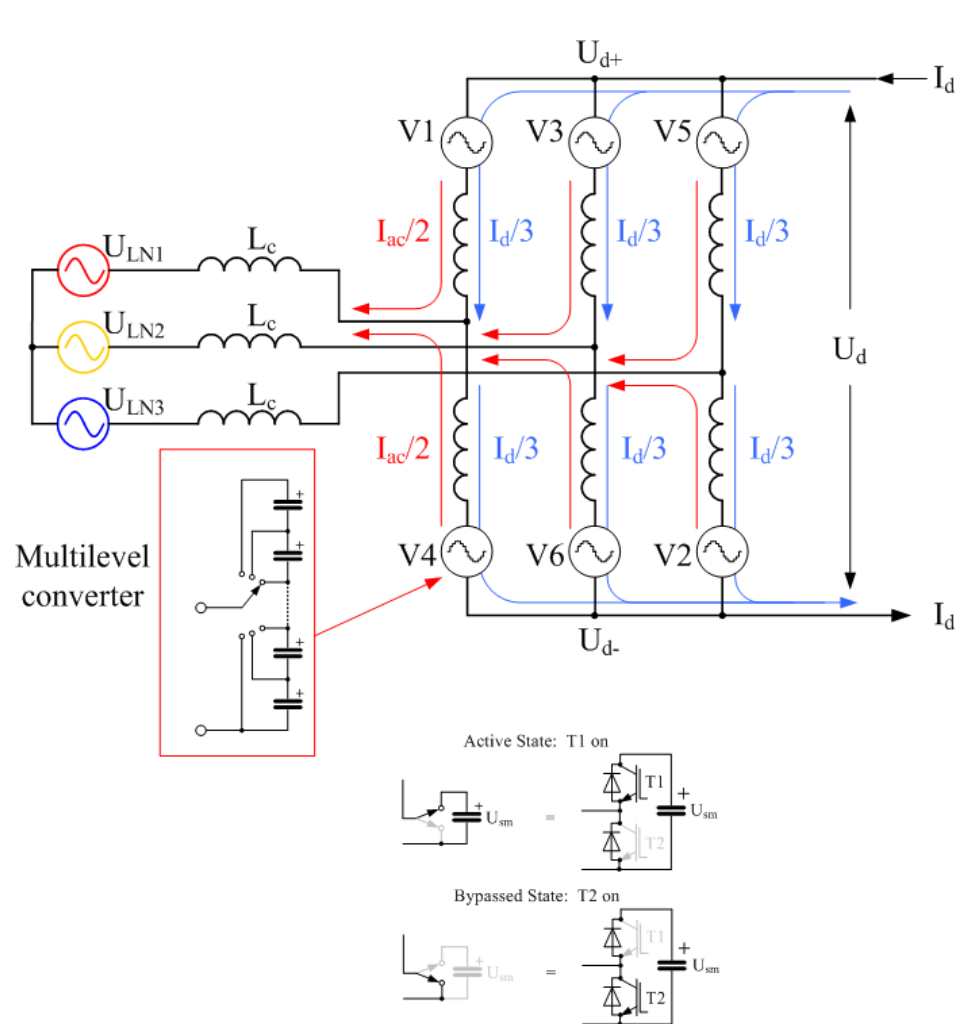
MMC VSC FUNKTION



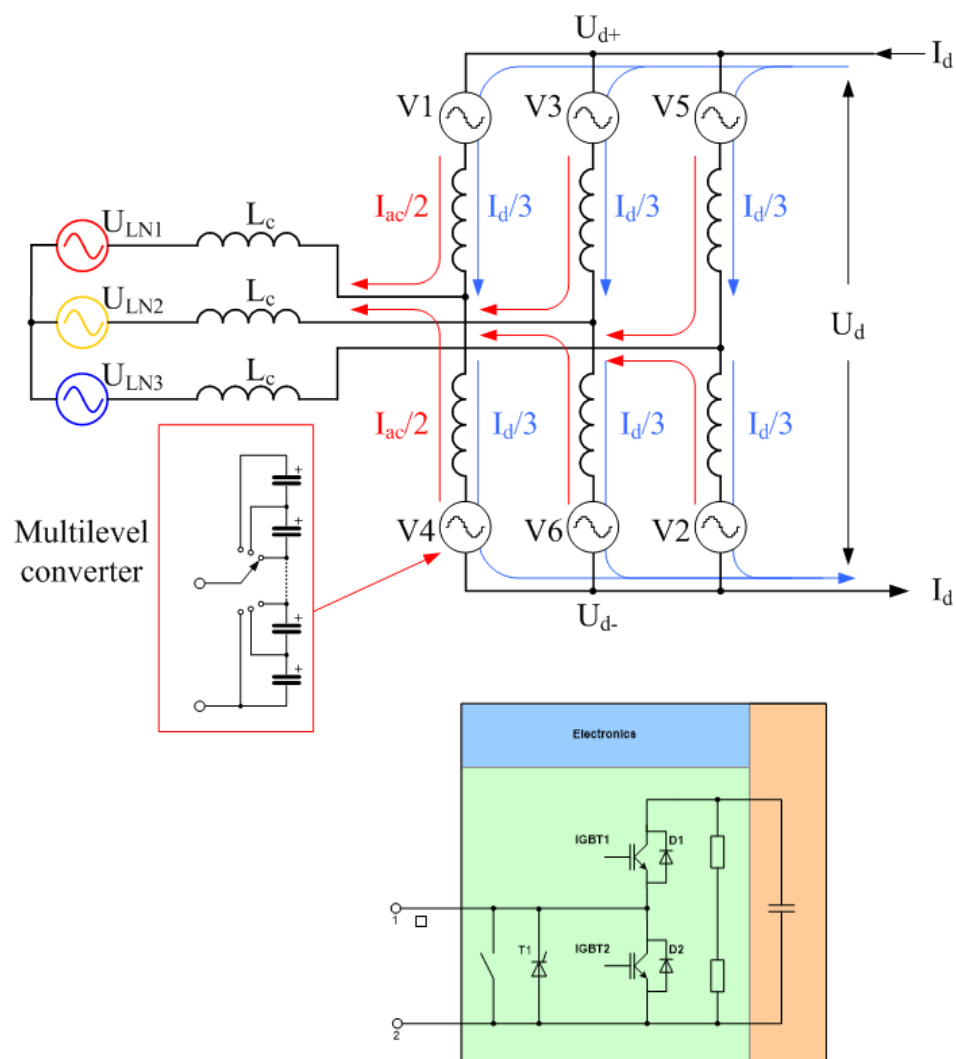
Multilevel converter



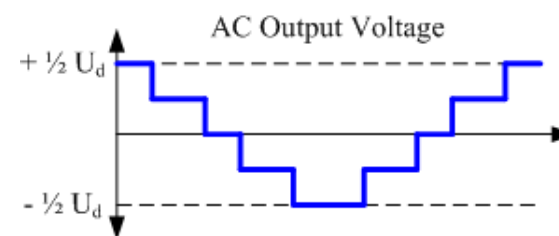
MMC VSC FUNKTION



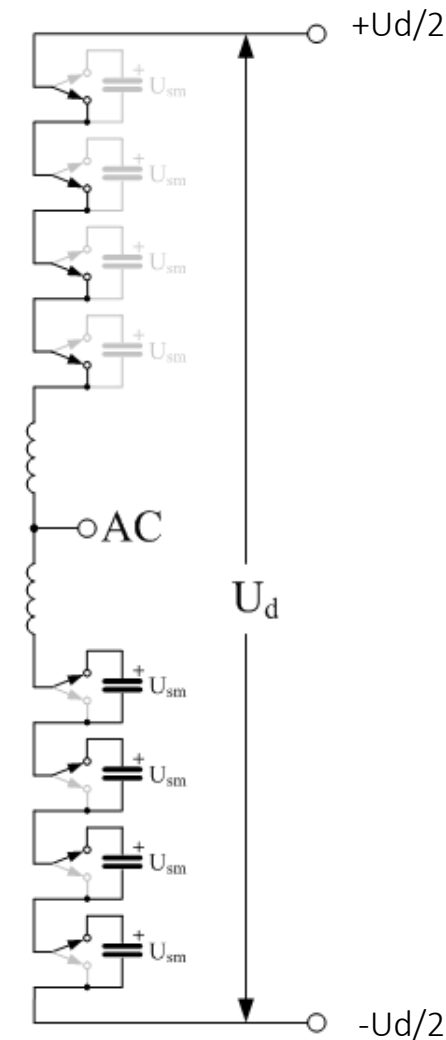
MMC VSC FUNKTION



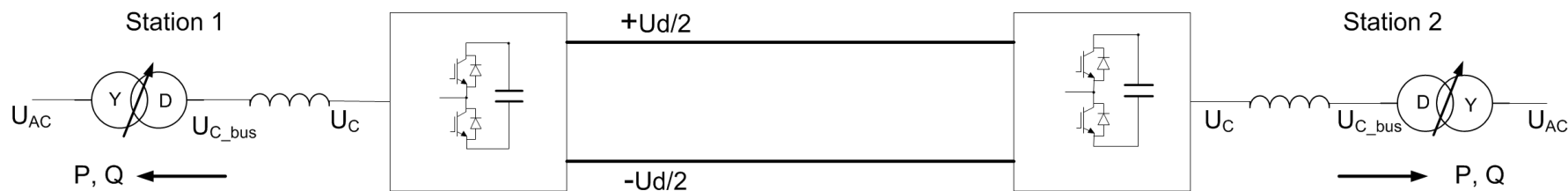
Flere hundrede SM =>
Næsten perfekt sinus kurve
Ikke behov for AC-filtre



Ekstra SM så nogle kan have
fejl uden at påvirke drift af
VSC. (fejlamte SM skal
kortsluttes)



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

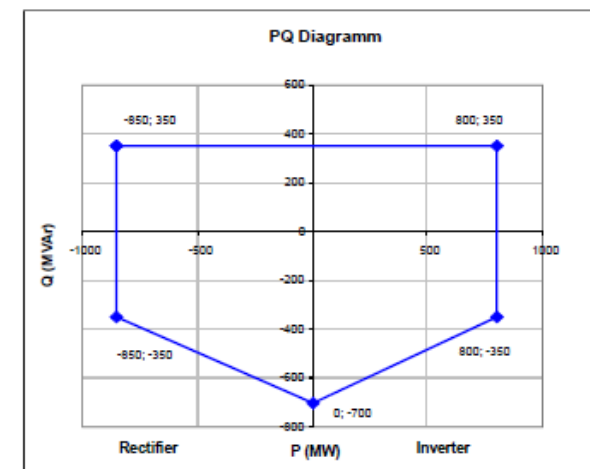
$$P = \frac{U_c \cdot U_{AC} \cdot \sin(\theta)}{X}$$

X : Total reactance in phase reactor and converter transformer

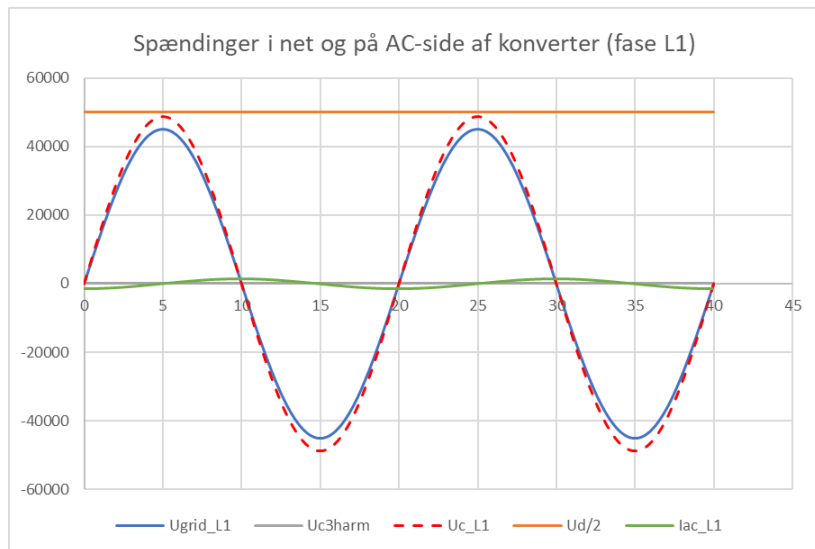
θ : phase angle between U_c and U_{AC}

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

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

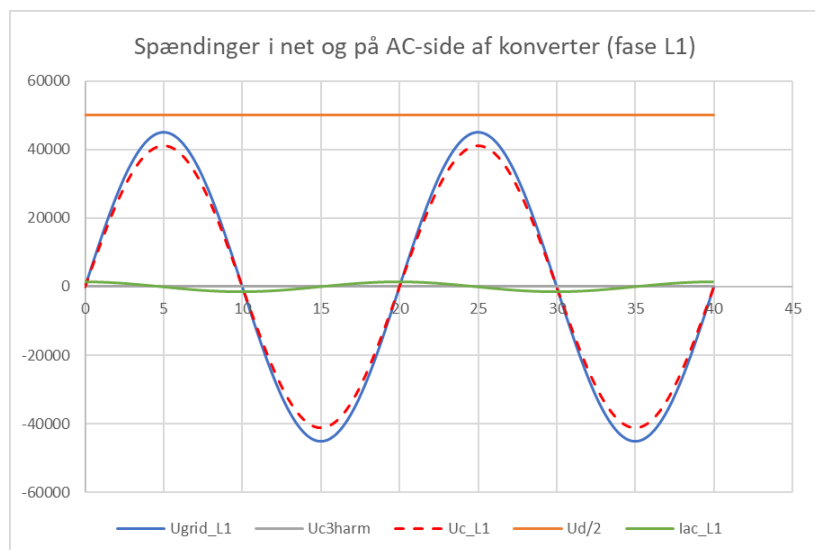


EFFEKTUDVEKSLING MED AC-NET

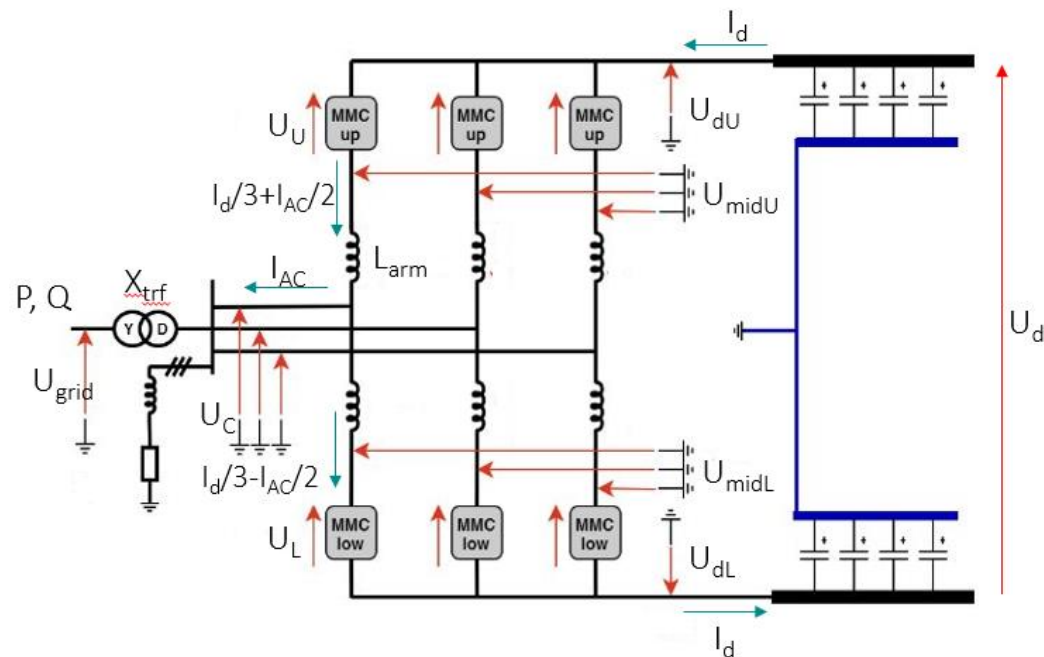


$Q > 0$
 Producerer reaktiv effekt til AC-net
 $U_C > U_{grid}$

Risiko for overmodulation!



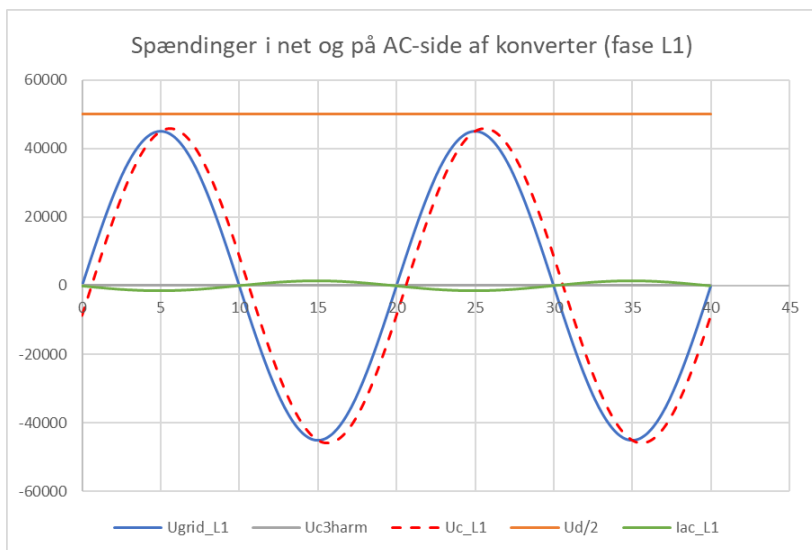
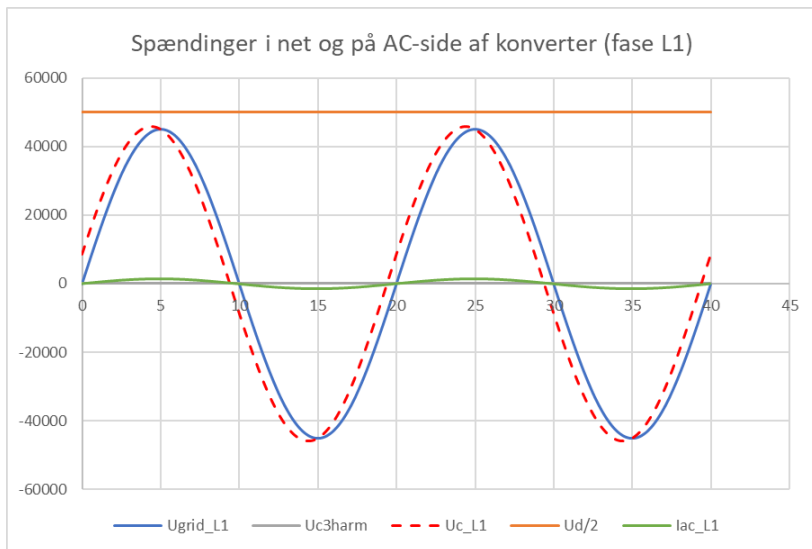
$Q < 0$
 Optager reaktiv effekt fra AC-net
 $U_C < U_{grid}$



Synkrongenerator:

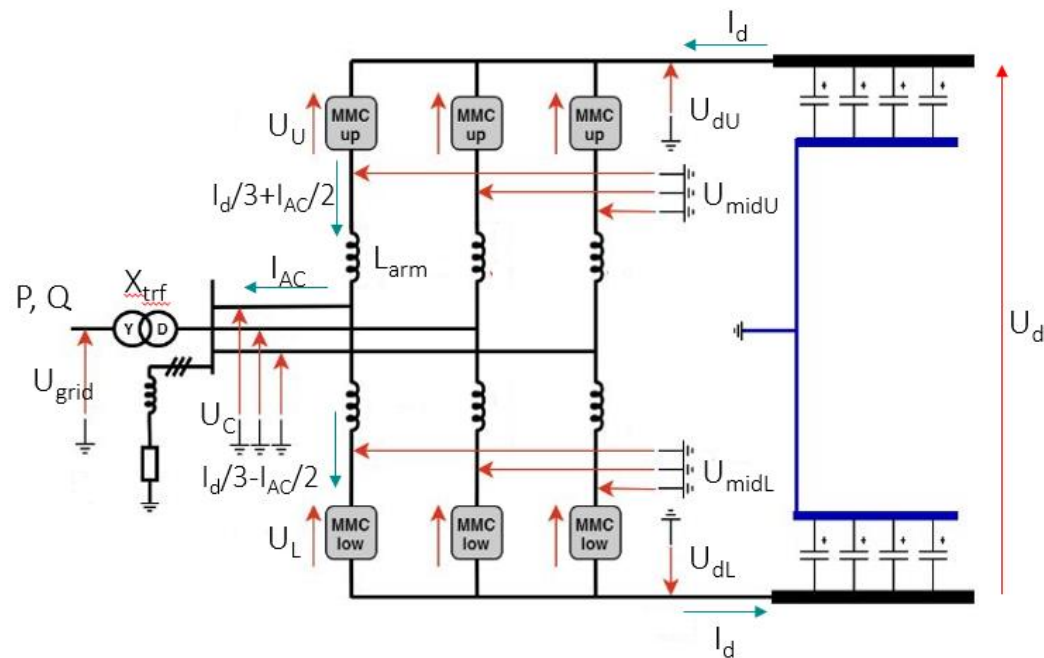
- Overmagnetisering: Producerer reaktiv effekt
- Undermagnetisering: Optager reaktiv effekt

EFFEKTUDVEKSLING MED AC-NET



$P > 0$
 Vekselretter
 Aktiv effekt til
 AC-net
 Vinkeldrejning:
 U_C før U_{grid}

$P < 0$
 Ensretter
 Aktiv effekt fra
 AC-net
 Vinkeldrejning:
 U_C efter U_{grid}



Synkrongenerator:
 - Polhjulsinkel

SPÆNDINGSSÆTNING

Normal opstart af VSC

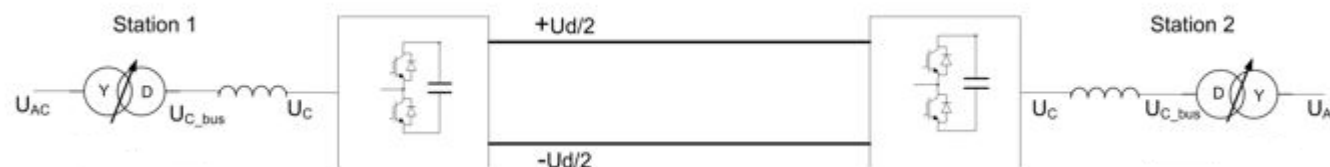
- Spændingssætning fra AC-siden af hver konverter via indkoblingsmodstand

Black net start

- Spændingssætning fra AC-siden af ene konverter samt
- spændingssætning af DC-kabel og
- spændingssætning af den anden konverter fra DC-siden

Spændingssætning/opladning af kondensatorer i submodules

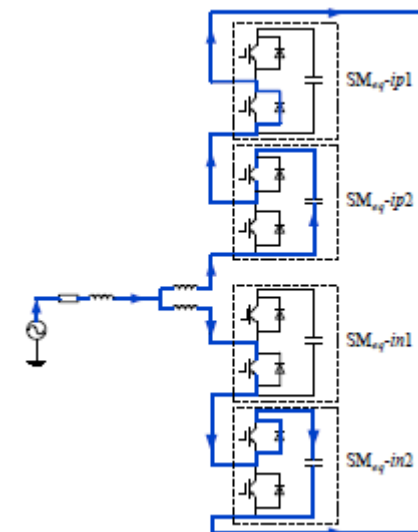
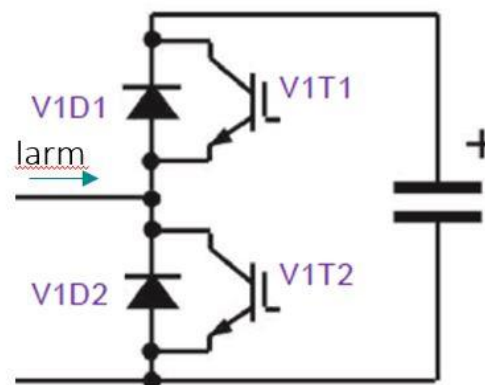
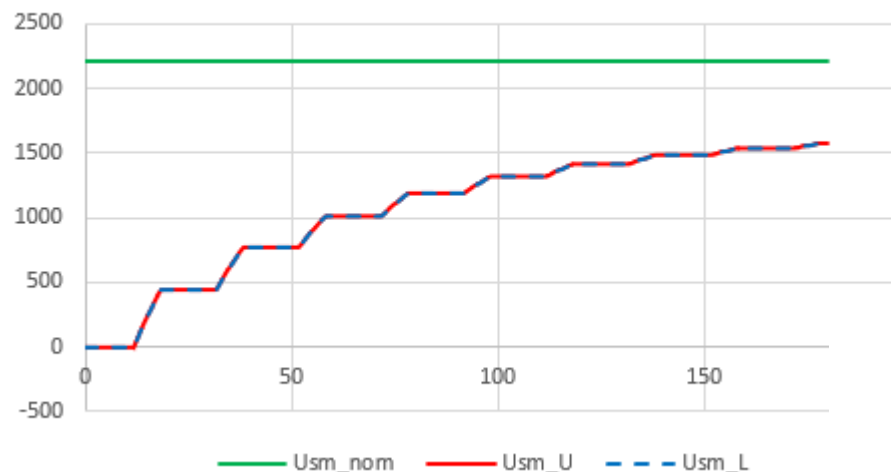
- Passiv opladning
- Aktiv opladning



SPÆNDINGSSÆTNING FRA AC-SIDE

1. Passiv opladning via Pre-Insertion Resistor for at begrænse ladestrømmen.
2. PIR bypasses
3. Aktiv opladning for at opnå fuld spænding på alle sub-modules
 - Nogle SM bypasses (T2 ON) på skift så de øvrige får højere spænding

Spændinger Submodule

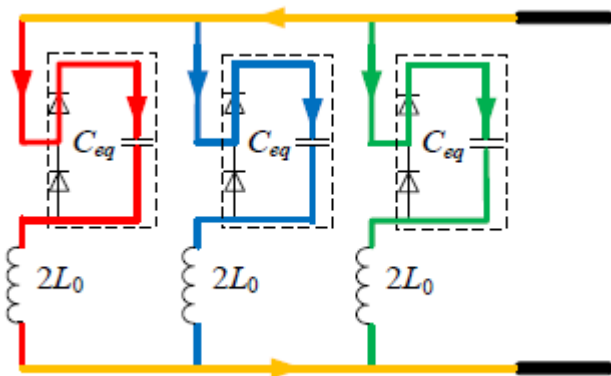


SPÆNDINGSSÆTNING FRA DC-SIDE

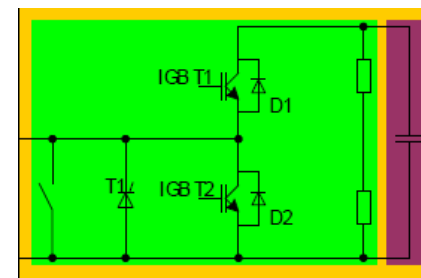
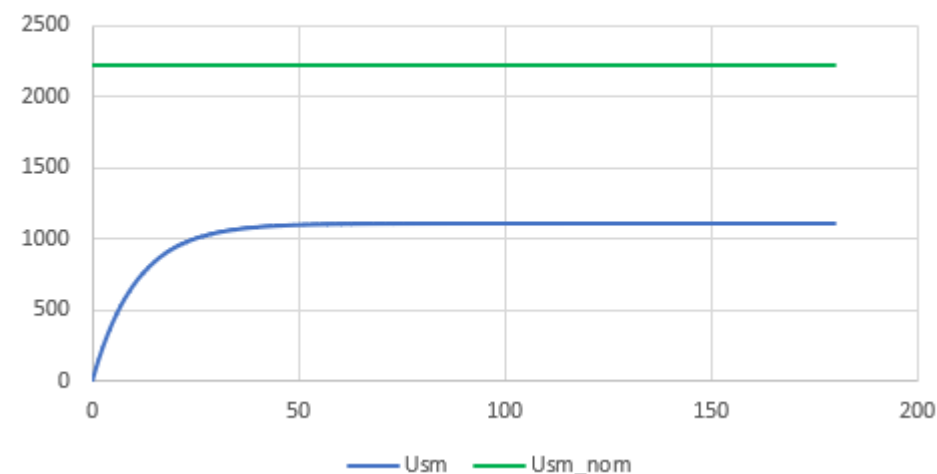
Spændingssætning fra DC-siden anvendes f.eks. ved black-net start

Hver arm oplades til $V_{dc}/2$

Gateunits skal have tilstrækkelig spænding til at aktiv opladning kan startes

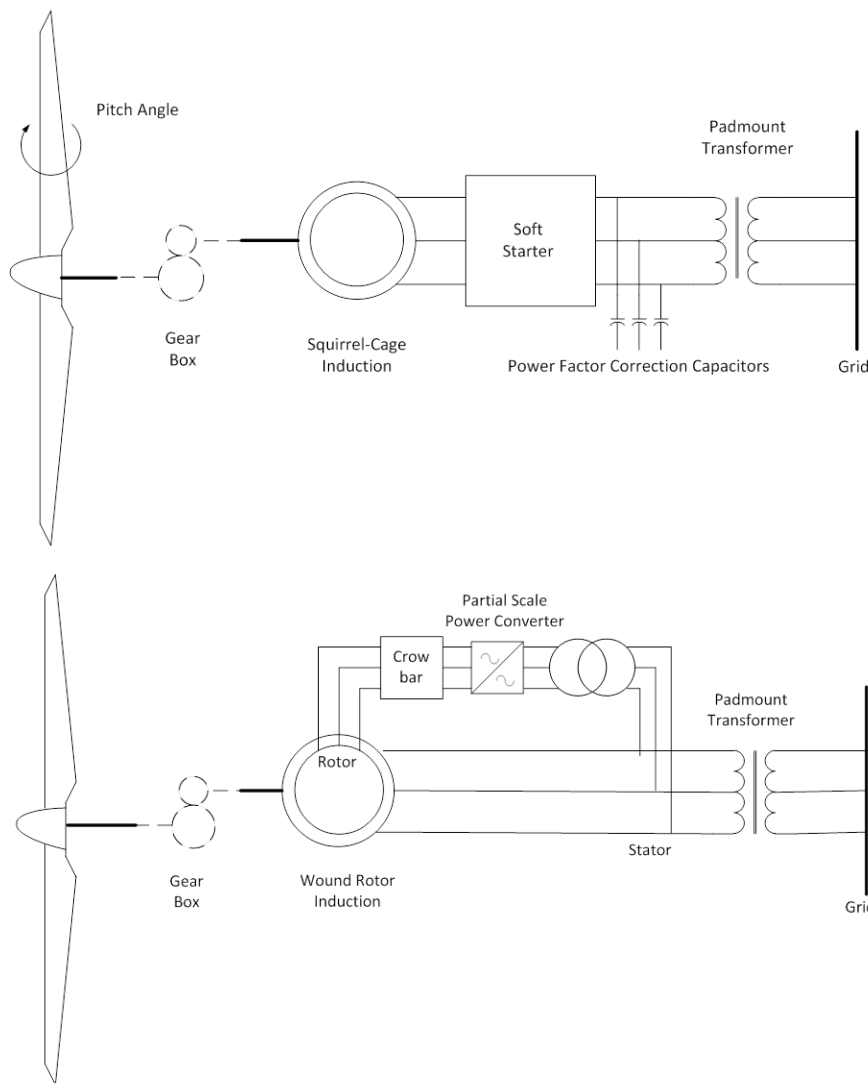


Spændinger i submoduler



Tilslutning af vindmøller

VINDMØLLETYPER



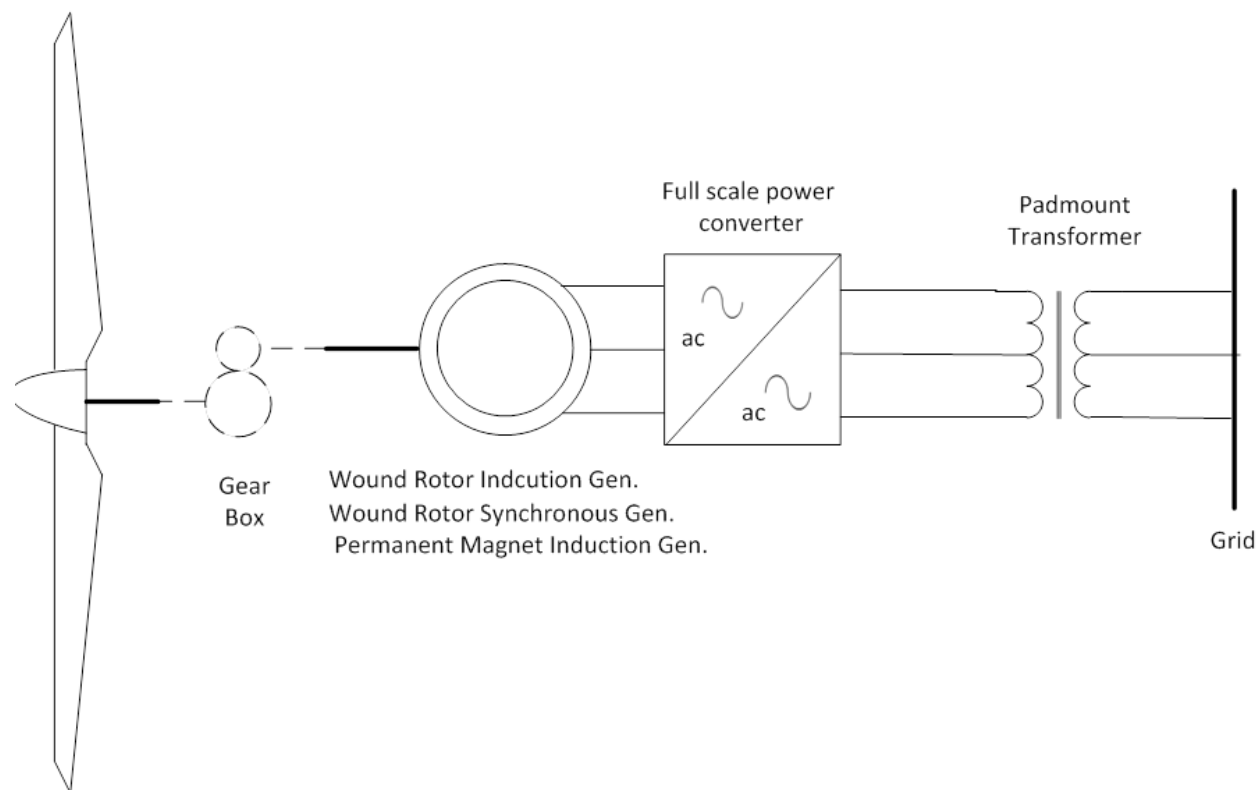
Type 1:

- Direkte tilsluttet asynkrongenerator
- Simpel og solid generatortype
- Konstant omdrejningstal

Type 3:

- DFIG Double Fed Induction Generator
- Mere kompliceret generator med slæberinge
- Variabelt omdrejningstal
- Mindre effekt i konverter tilsluttet rotorkredsen
 - Typisk 20-30% af nominel effekt

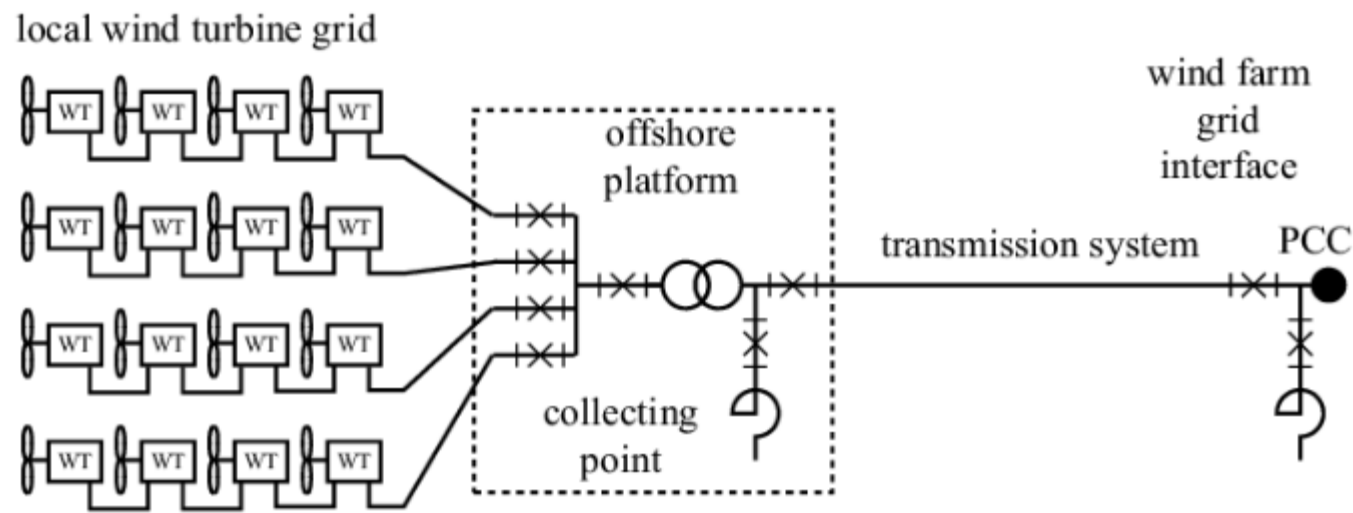
VINDMØLLETYPER



Type 4:

- Full inverter, hele effekten igennem konverteren
- Variabelt omløbstal

ILANDFØRINGSANLÆG - HVAC

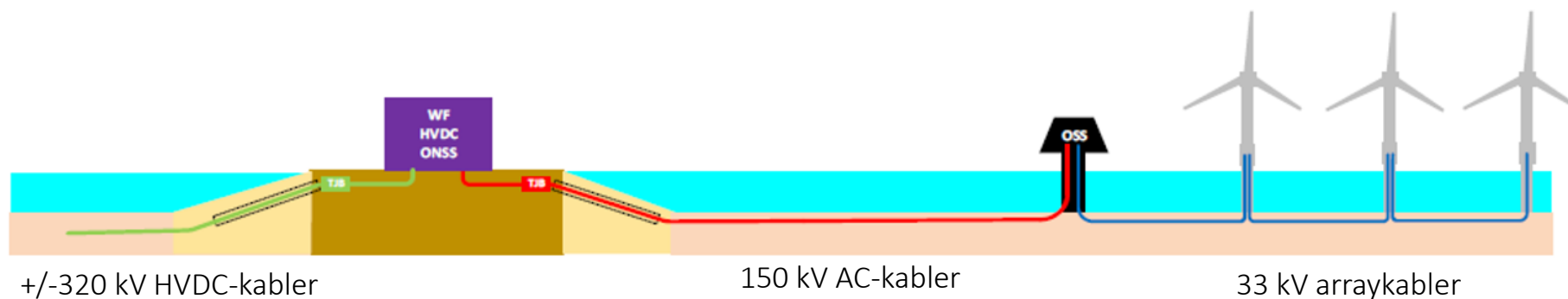


HVAC ilandføringsanlæg anvendes hvis havmølleparken ikke er for langt fra land.

Længere offshore => HVDC optimal løsning

- Opsamlingsnet fra vindmøller
 - Normalt radialer
 - 33 eller 66 kV
- AC-ilandføringsanlæg
 - Offshore transformerplatform
 - Ilandføringskabel
 - 132-220 kV
- Point Of Connection:
 - 33/66 kV offshore
 - 220 kV onshore

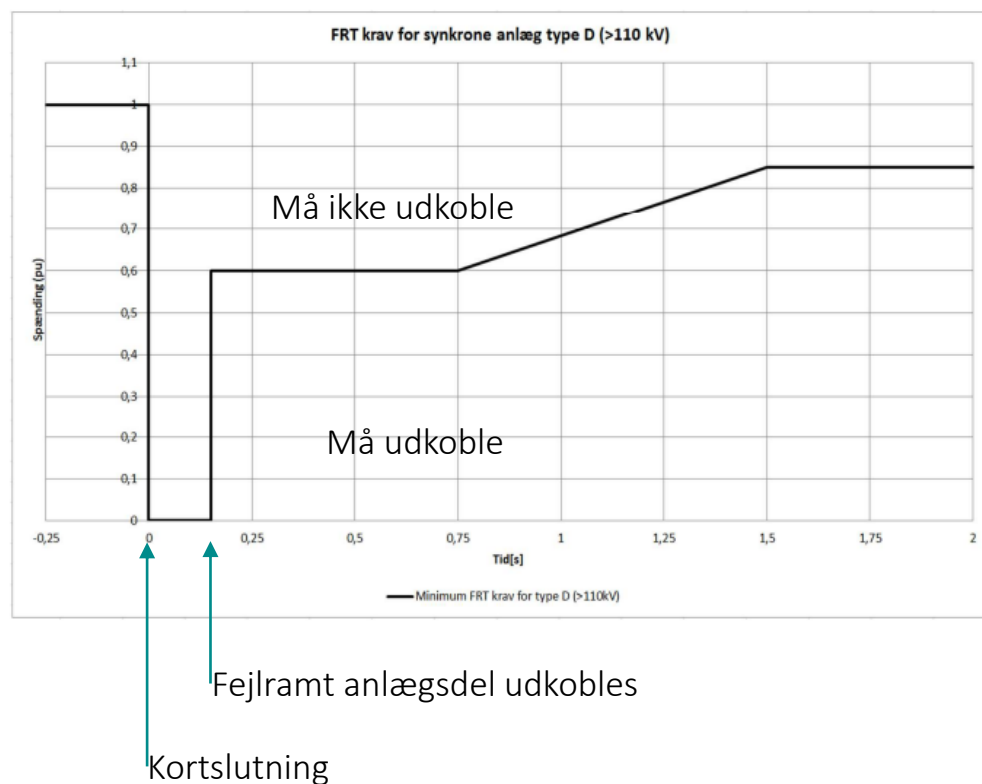
ILANDFØRINGSANLÆG - HVDC



- TenneT idriftværende HVDC projekter i Tyskland:
 - En/flere offshore transformerplatforme 33 til 150 kV
 - HVDC platform
 - Symmetrisk monopol, +/-320 kV
 - Op til 900 MW

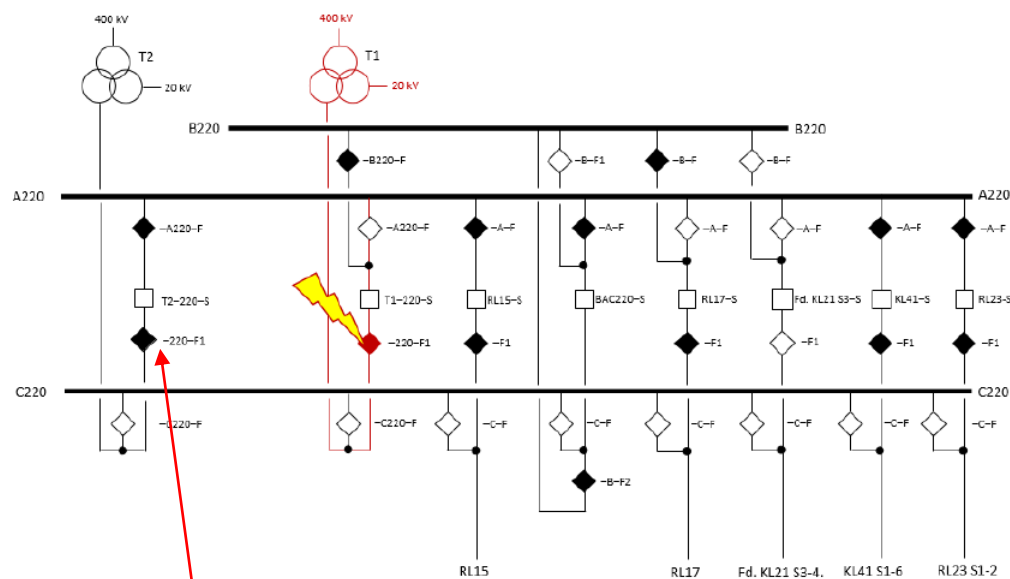
FAULT RIDE THROUGH

Reaktion ved kortslutninger i AC-nettet



- Kortslutninger i AC-nettet medfører et spændingsfald
- Tilslutningsbetingelser fastsætter en spændingskurve, og så længe den aktuelle spænding er over denne spændingskurve, må produktionsanlæg IKKE koble fra nettet
- Vindmøllernes “barndom”:
 - Udkoble vindmøller ved fejl i AC-nettet
 - Ikke den store effekt fra vindmøller
 - Asynkrongeneratorer optager reaktiv effekt fra nettet => langsommere retablering af spændingen i AC-nettet efter fejl

DRIFTSFORSTYRELSE I SVERIGE 2023-04-26

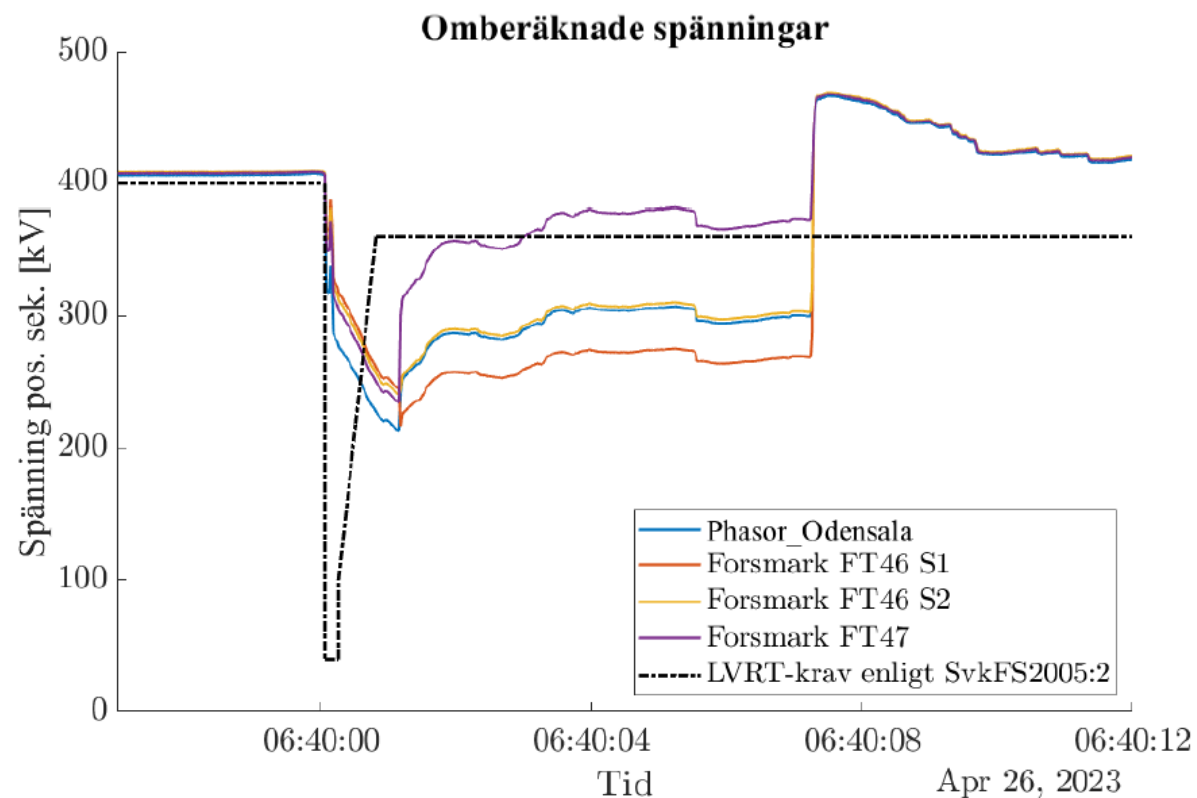


Denne adskiller
skulle have været
åbnet

Aflåsning skal
forhindre
fejlkoblinger

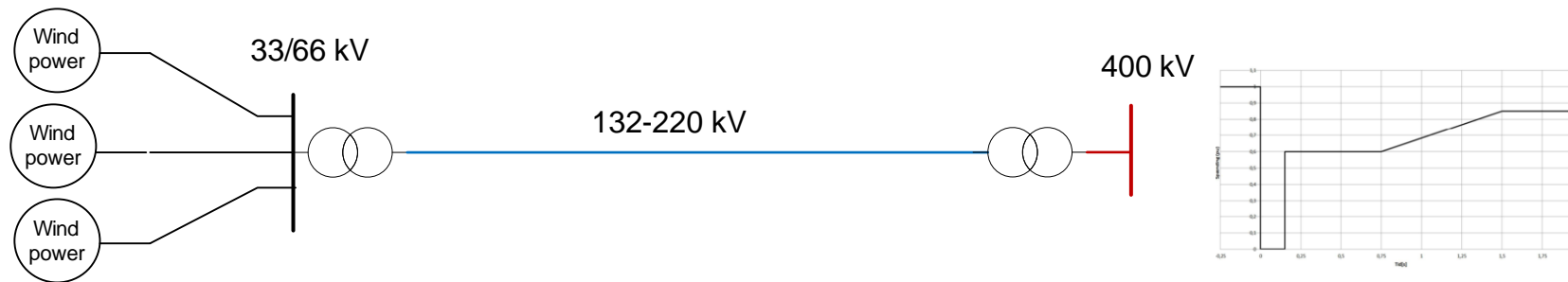
Forsmark 1 og 2 koblede ud pga. lav
spænding i for lang tid. >2100 MW

Forsmark 3 måtte nok også godt have koblet
ud i henhold til FRT-kravene



FAULT RIDE THROUGH

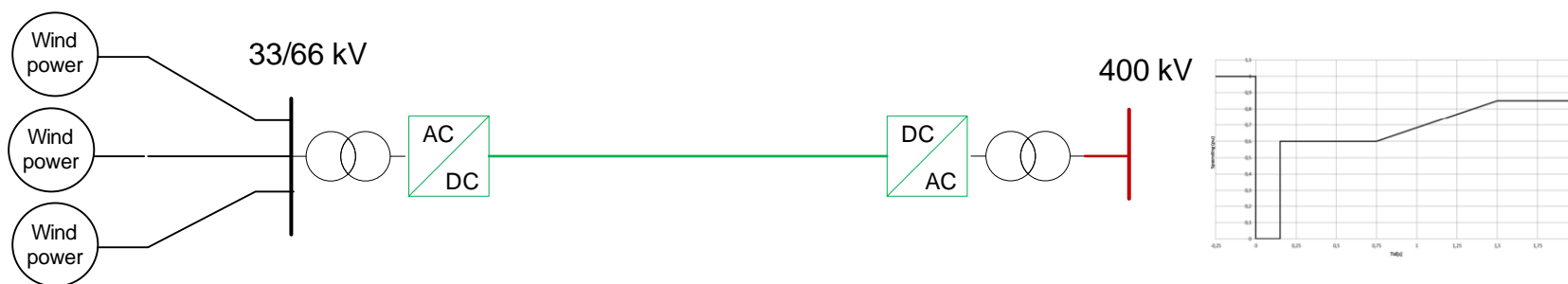
Reaktion ved kortslutninger i AC-nettet



- Havvindmøller tilsluttet via AC-forbindelse til land
 - Vindmøller “ser” spændingdyk i onshore AC-net
 - Aktiverer FRT i enkelte vindmølle

FAULT RIDE THROUGH

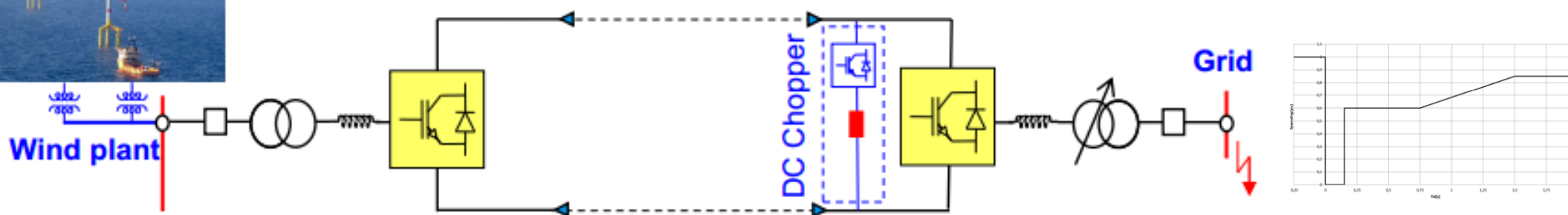
Reaktion ved kortslutninger i AC-nettet



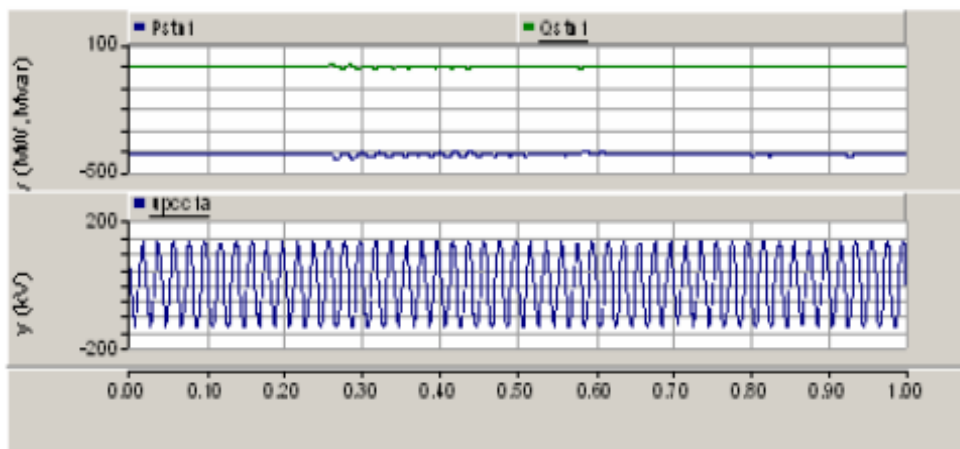
- Havvindmøller tilsluttet via HVDC-forbindelse til land
 - Vindmøller “ser ikke” spændingdyk i onshore AC-net
 - Fortsætter uændret produktion
 - Onshore konverter kan ikke levere effekt til AC-nettet
 - DC-spænding i HVDC-forbindelsen stiger
 - Aktivering af DC-chopper i onshore station (DBS Dynamic Break System)
 - Overskydende effekt afsættes i en modstand
- DC-chopper i onshore station anvendes i alle PtP ilandføringer i Tyskland
- Typisk dimensioneret til fuld effekt i 2 sekunder

FAULT RIDE THROUGH

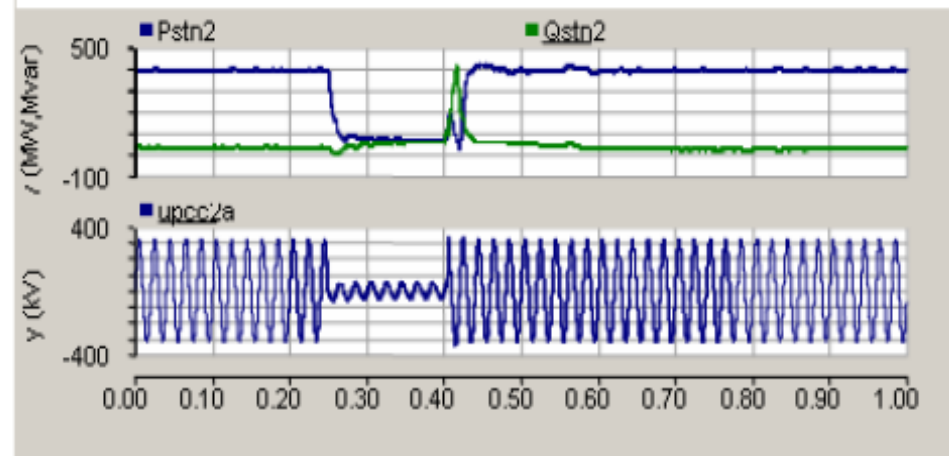
Reaktion ved kortslutninger i AC-nettet



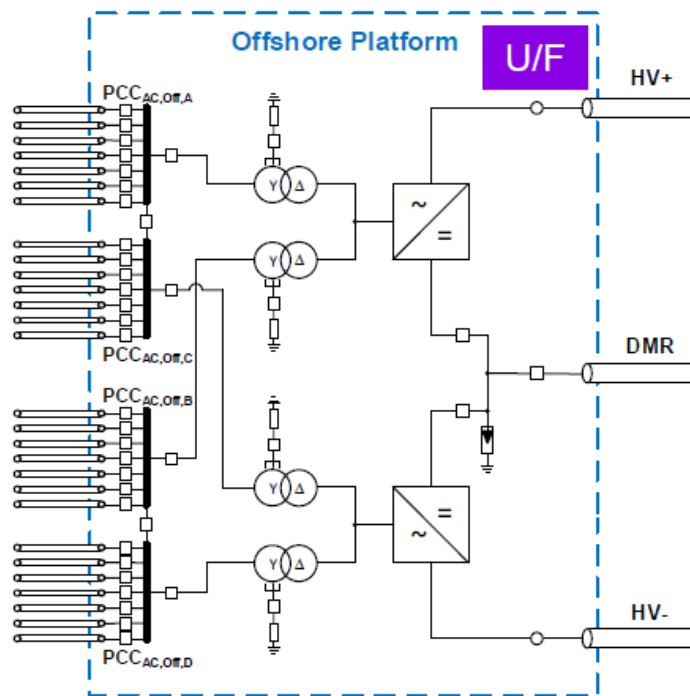
Wind plant



AC network



TENNET'S 2 GW PLATFORM

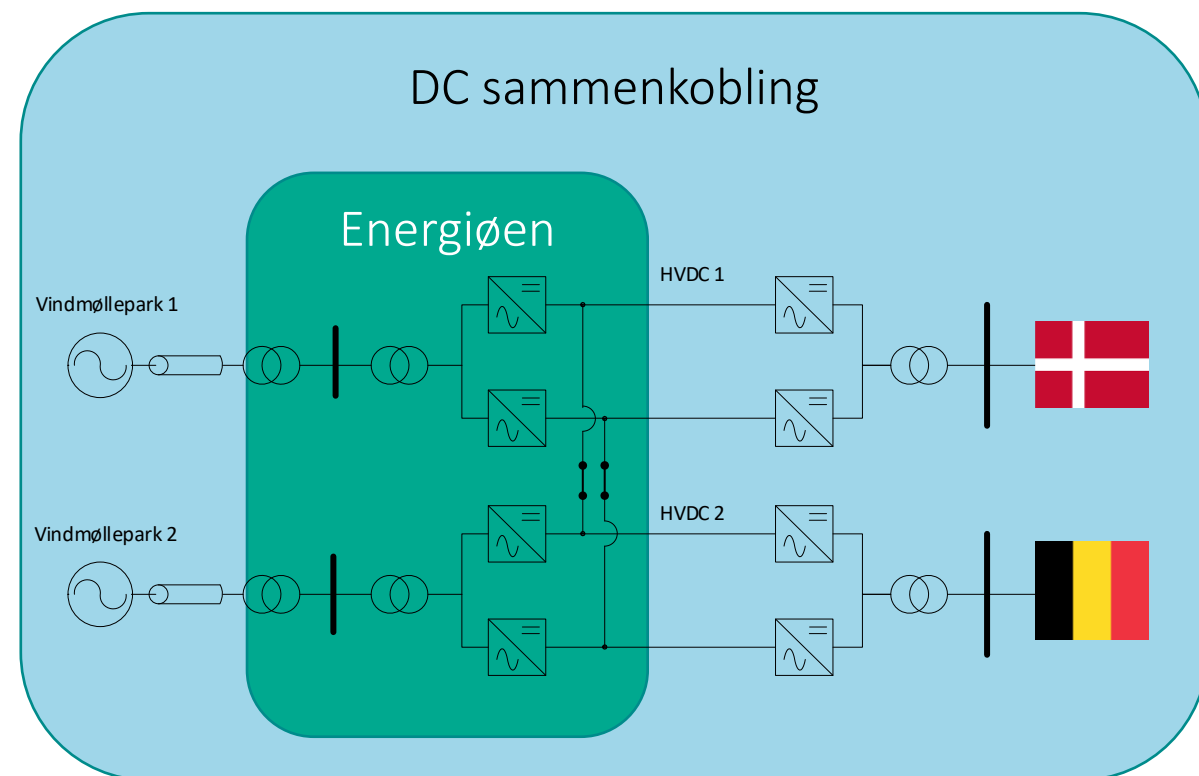
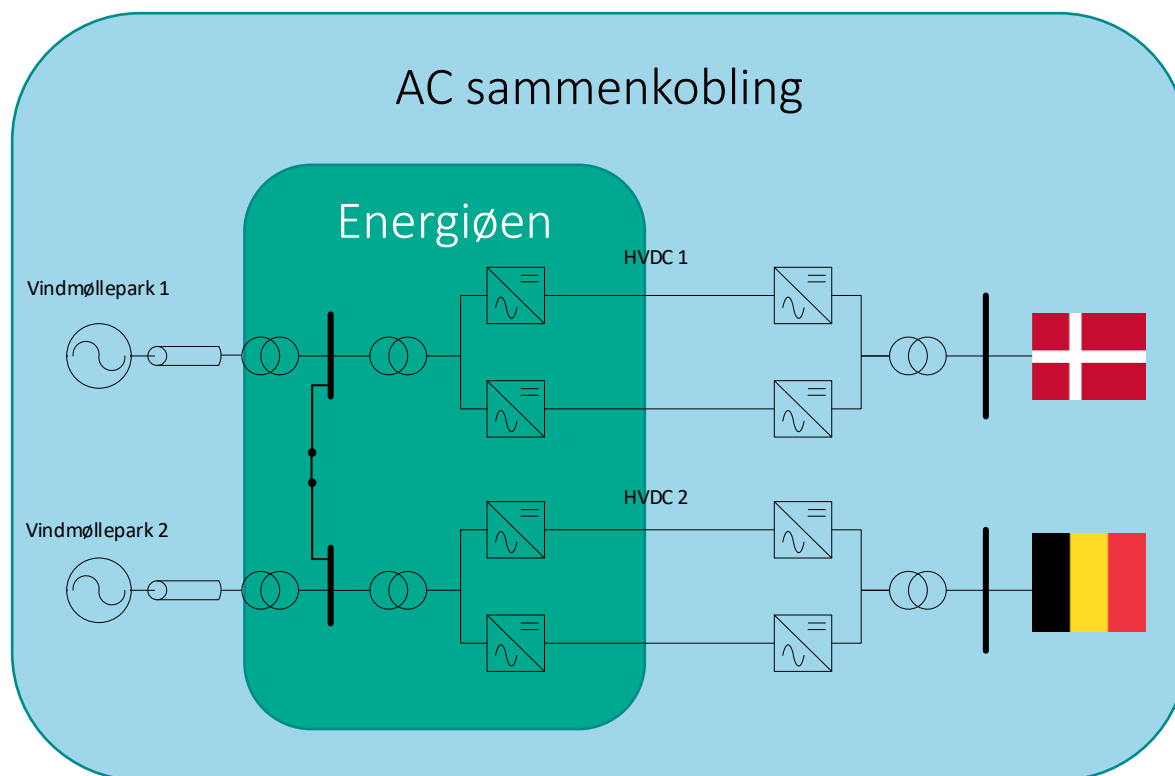


- HVDC platform
 - 66 kV arraykabler
 - 66 kV koblingsanlæg
 - 2 GW
 - Bipol HVDC
 - +/-525 kV DC
 - Metallisk returleder
 - To parallelle konvertertransformere pr. pol (66/300 kV)

TenneT har ordret 14 stk. 2 GW HVDC-forbindelser og 7000 km 525 kV DC-kabel

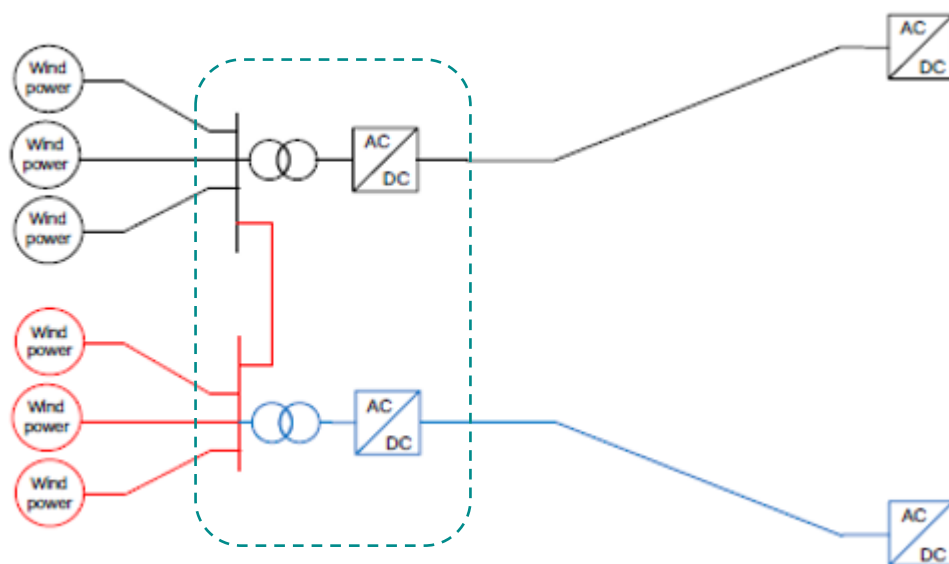
Multi-terminal AC-/DC-sammenkobling

SAMMENKOBLING: UDNYTTELSE AF TRANSMISSIONSKAPACITET

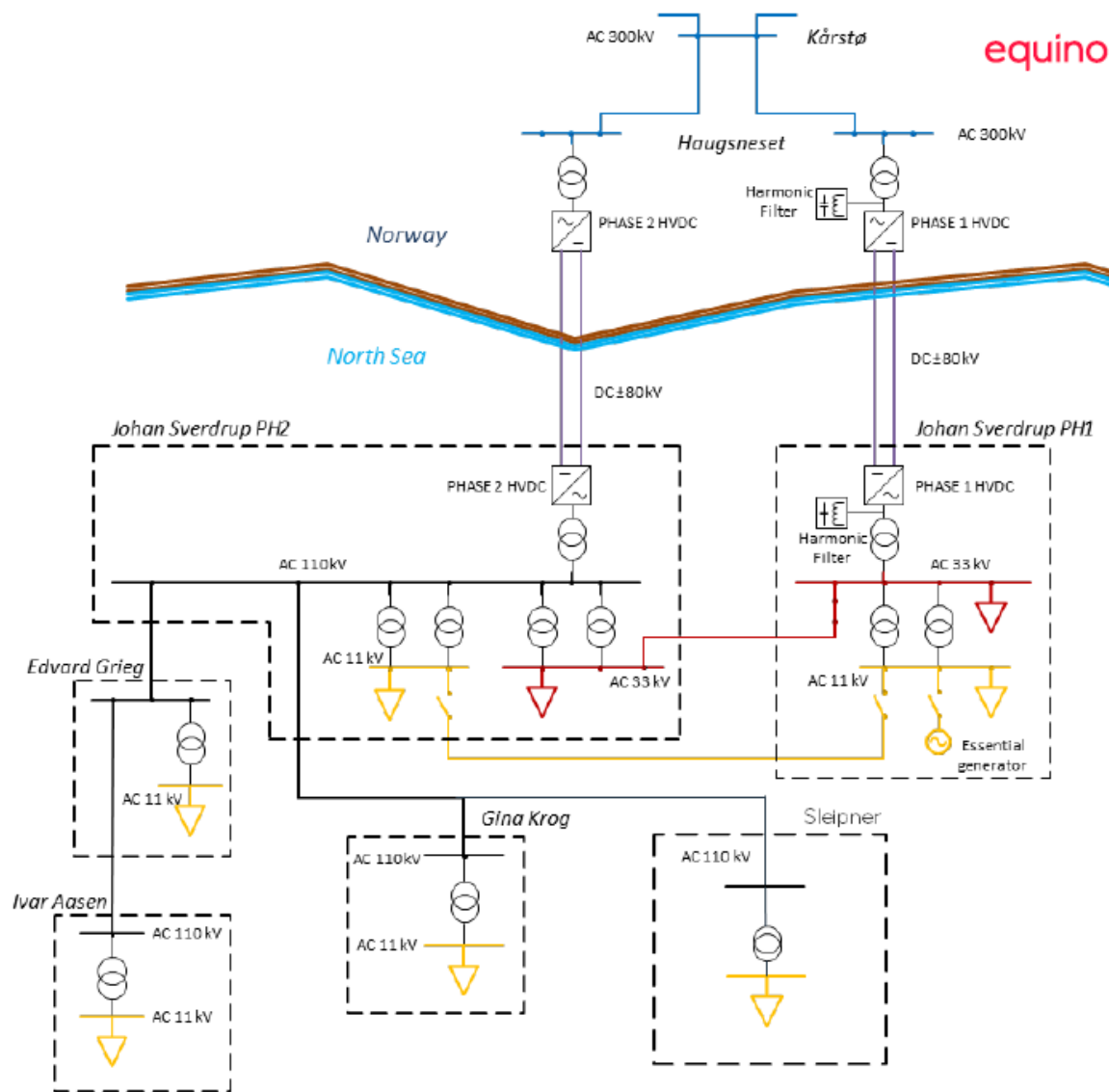


AC-SAMMENKOBLING

Fordele og ulemper



- Fordele
 - Velkendte komponenter og teknologi
 - Punkt-til-punkt HVDC forbindelser
- Ulemper
 - Større tab ved transit mellem lande
 - Udvidelse med ekstra forbindelse kræver ekstra konverter
 - Komplexitet på AC-siden:
 - Mange vindmøller tilsluttet meget svagt AC-net
 - Flere HVDC forbindelser fælles om Grid Forming Control af AC-nettet
 - Ingen erfaringer med AC-sammenkobling og tilslutning af vindmøller



JOHAN SVERDRUP

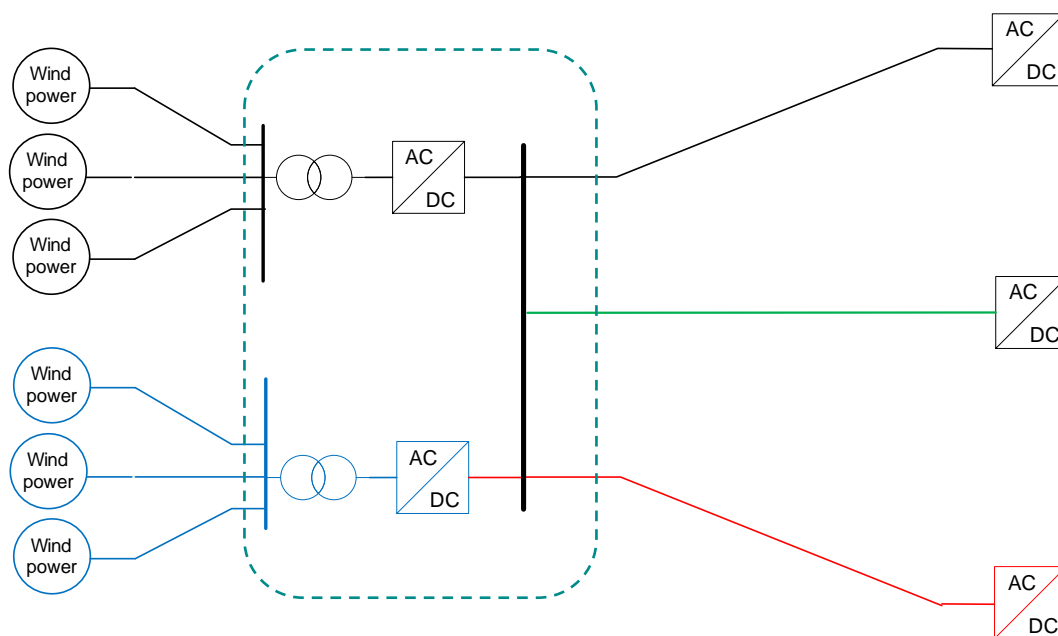
Første projekt med sammenkobling af to HVDC-forbindelser på AC-siden

- Forsyning af pumper på en olieplatform
- Fase 1: HVDC fra ABB/Hitachi
- Fase 2: HVDC fra Siemens Energy
- EMT- og realtidssimuleringer i mere end et år for at teste interoperabilitet mellem de to HVDC-forbindelser
 - RTE konsulent
 - Kræver C&P replikaer

Meget simple at forsyne nogle store pumper end tilslutte mange vindmøller, som alle har egen konverter

DC-SAMMENKOBLING

Fordele og ulemper



- Fordele
 - MTDC er fremtiden for store offshore net
 - Mindre tab ved transit mellem lande
 - Mindre kompleksitet i interface mod vindmøller
 - Udbygning med ekstra interconnector kræver ingen ekstra konverter på energiøen
- Ulemper
 - Meget få erfaringer med MTDC
 - Kompleksitet på DC-siden
 - Stort DC-net kræver DC-afbrydere

DC-afbrydere

MULTI-TERMINAL HVDC

DC-afbrydere

- Stort DC-net:
 - En fejl må ikke medføre udkobling af hele nettet
- Fejlstrømme i DC net:
 - Vokser meget hurtigt (reaktorer reducerer di/dt)
 - Skal afbrydes indenfor 3-7 ms (inkl. relætid)
 - Ingen naturlig nulgennemgang
- Krav/ønsker til DC-afbrydere:
 - Afbryde fejlstrøm på 2-3 ms
 - Fysisk lille, billig i indkøb og drift
- Tilgængelig på markedet, men ingen driftserfaringer i Europa!



KORTSLUTNINGSSTRØM I DC-NET

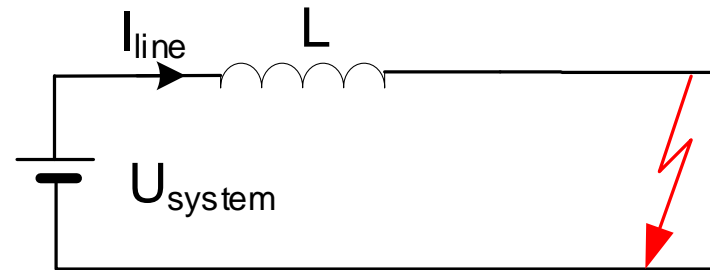
Ved kortslutning i DC-net stiger strømmen ekstremt hurtigt

For at reducere stigningen indsættes reaktorer i hver ende af HVDC-kablerne

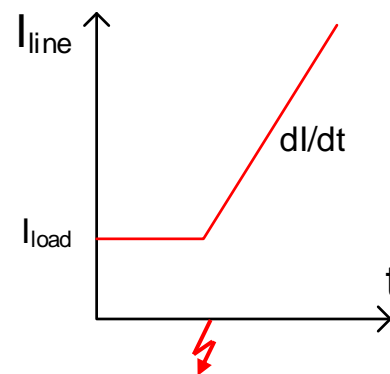
Reaktorerne indeholder energi:
 $\frac{1}{2} * L * I_{line}^2$

Energien skal optages af DC-afbryderen

DC-afbrydere skal fungere indenfor få ms



$$\frac{dI_{line}}{dt} = \frac{U_{system} - 0}{L} = \frac{U_{system}}{L}$$



Eksempel:

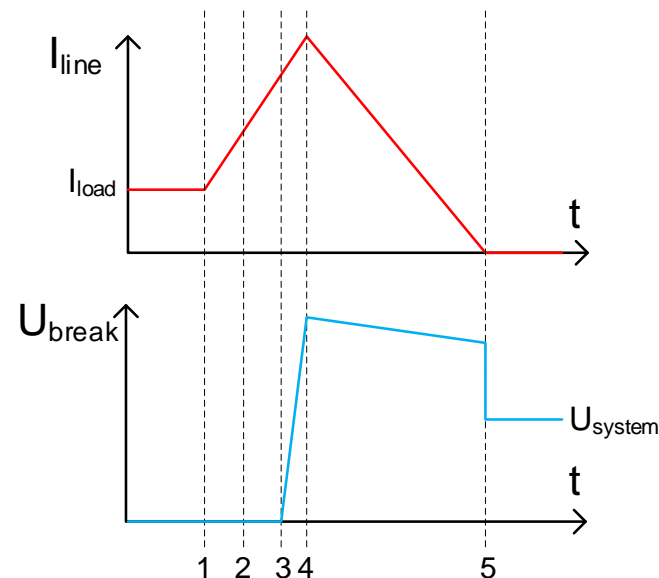
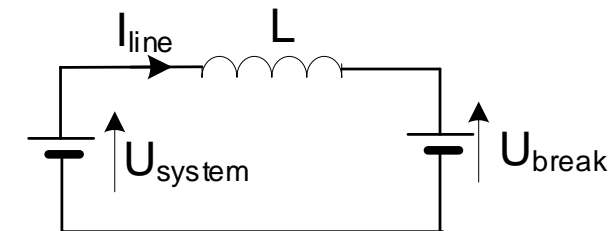
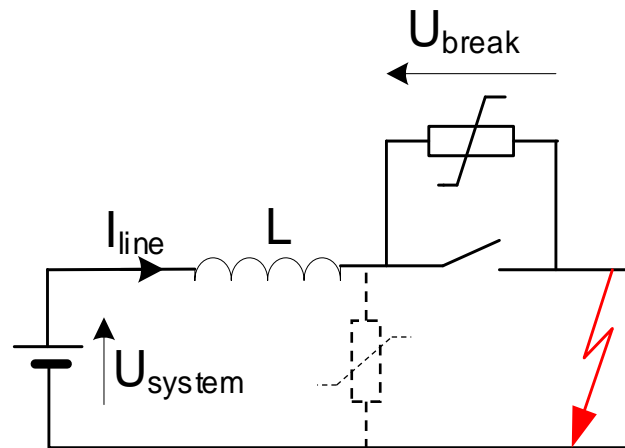
- $U_{system} = 525 \text{ kV}$
- $L = 150 \text{ mH}$
- $dI/dt = 525/150 = 3.5 \text{ kA/ms}$
- Energi i reaktor ved 12 kA = 11 MJ
- 30 tons lastvogn 100 km/h
- Stoppes på få ms

DC-AFBRYDERE

- Ingen naturlige nulpunkter i strømmen
- DC-afbryder skal skabe en modspænding større end systemspændingen U_{system} (ca. 1,5 gange), så DC-strømmen reduceres
 - men lavere end tændspændingen for afledere til overspændingsbeskyttelse
- Energi i reaktorer skal optages i overspændingsafledere
- Operationstid: Få millisekunder afhængig af type af DC-afbryder

$$\frac{dI_{line}}{dt} = \frac{U_{system} - U_{break}}{L} = \frac{U_{system} - 1.5 * U_{system}}{L} = \frac{-U_{system}}{2 * L}$$

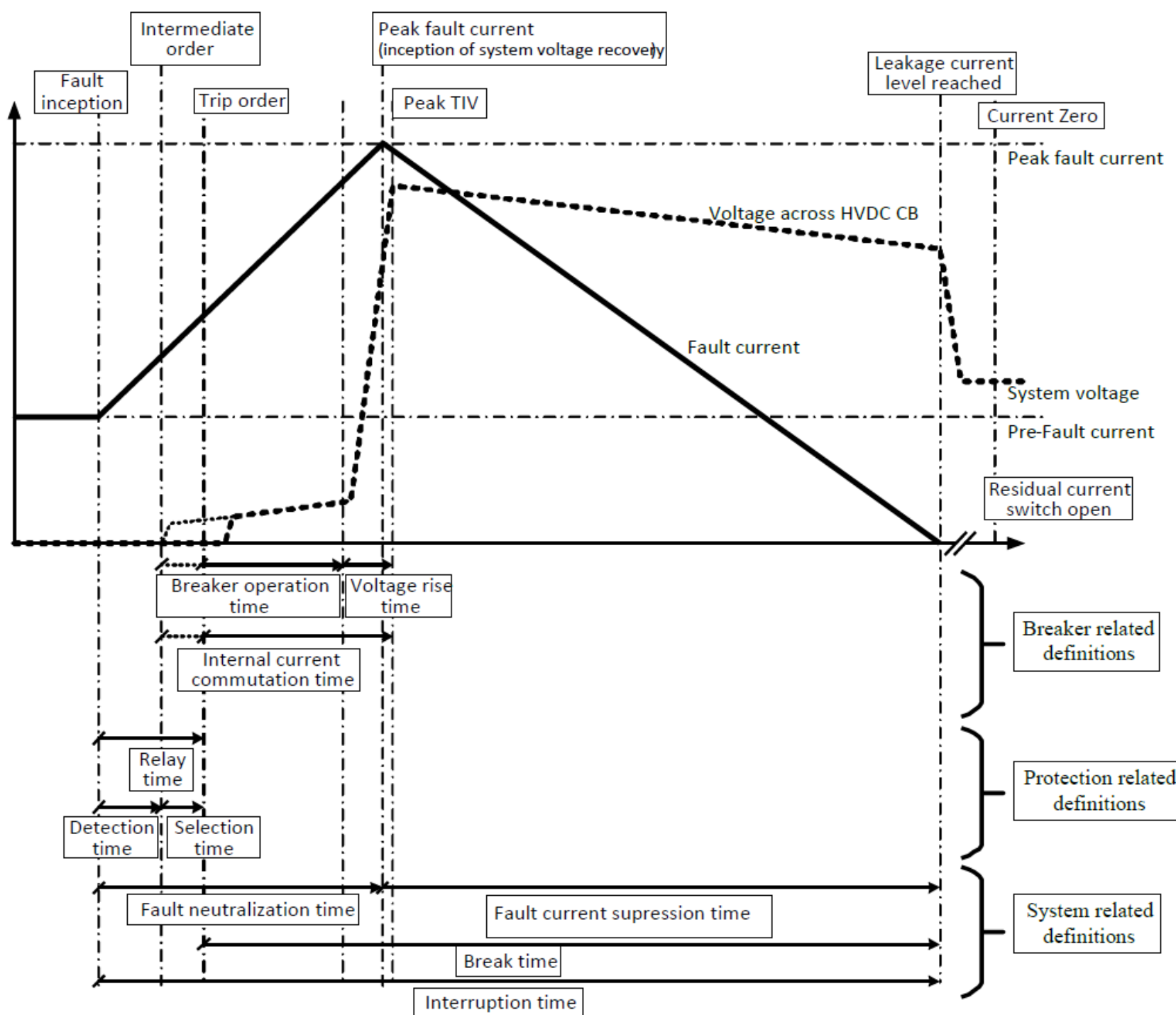
Efter overspændingsafleder er tændt, aftager strømmen med ca. halve hastighed i forhold til øgning efter kortslutningen



1. Fault inception
2. Trip order to DCCB
3. Start voltage rise time
4. Peak fault current, peak TIV
5. Current extinguished

DCCB operation time:
 $t_4 - t_2$

TIV = Transient
Interruption Voltage



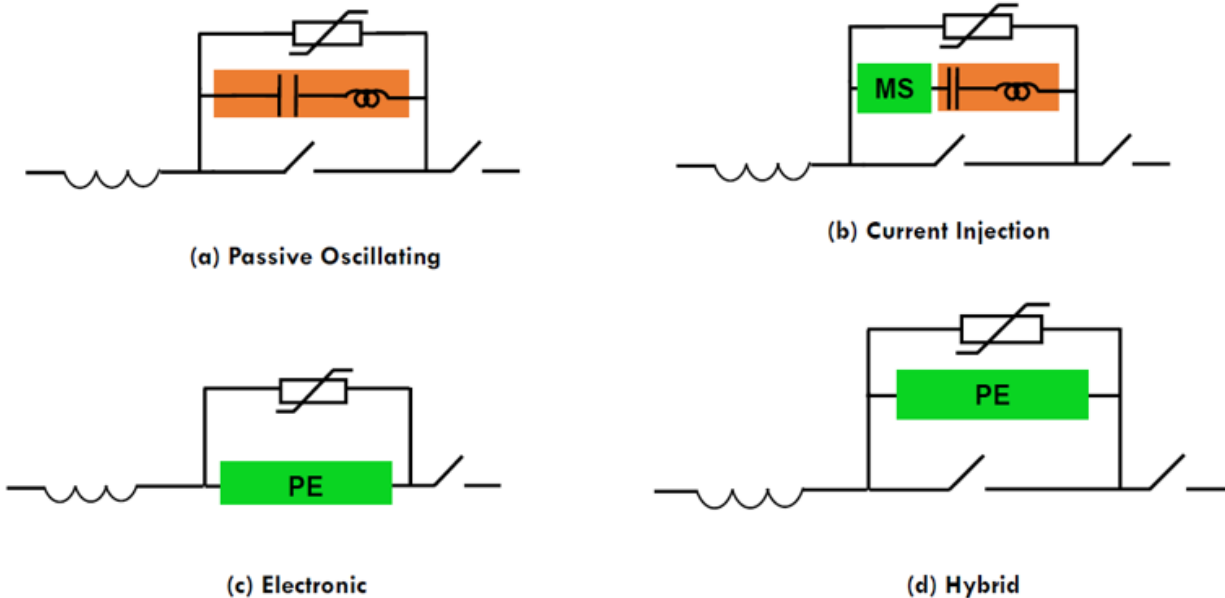
DC-AFBRYDERE, DEFINITIONER

CIGRE TB 683

State-of-the art HVDC switching equipment

DC-AFBRYDERE

Forskellige typer



Alle typer af DC-afbrydere indeholder en overspændingsafleder.

Høj spænding: Isolator → modstand

Hvordan tændes
overspændingsaflederen
hurtigst muligt?



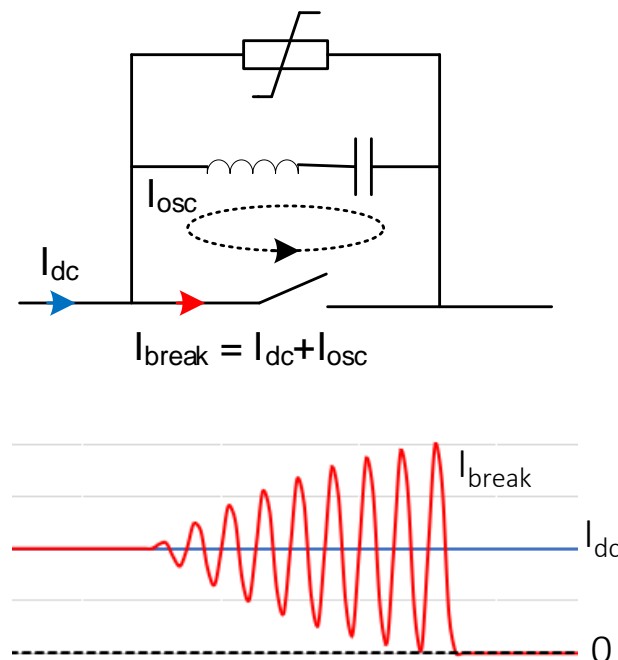
Andre krav/ønsker:

- Små elektriske tab under normal drift
- Lille i fysisk størrelse
- Billig i indkøb og drift

Type	Passive oscillation	Current injection	Electronic	Hybrid
Maks strøm der kan afbrydes [kA]	2 - 4	2 - 16	19	7 - 16
Operationstid [ms]	12 - 14	4 - 8	0.4	2 - 3
Tab under normal drift	Negligible	Negligible	High	Low

PASSIVE OSCILLATION

- Åbne afbryder => lysbue tændes
- Oscillerende strøm i LC-svingningskreds og gennem afbryderen
- Sum af DC-strøm og oscillerende strøm gennem afbryderen får et nulpunkt => lysbue slukkes
- DC-strømmen oplader kondensatoren indtil overspændingsaflederen bliver tændt
- DC-strømmen reduceres pga. den høje spænding over overspændingsaflederen
- Anvendes som NBS i HVDC bipoler, f.eks. Konti-Skan og Skagerrak



Neutral Bus Switch

Lav spænding (få kV)

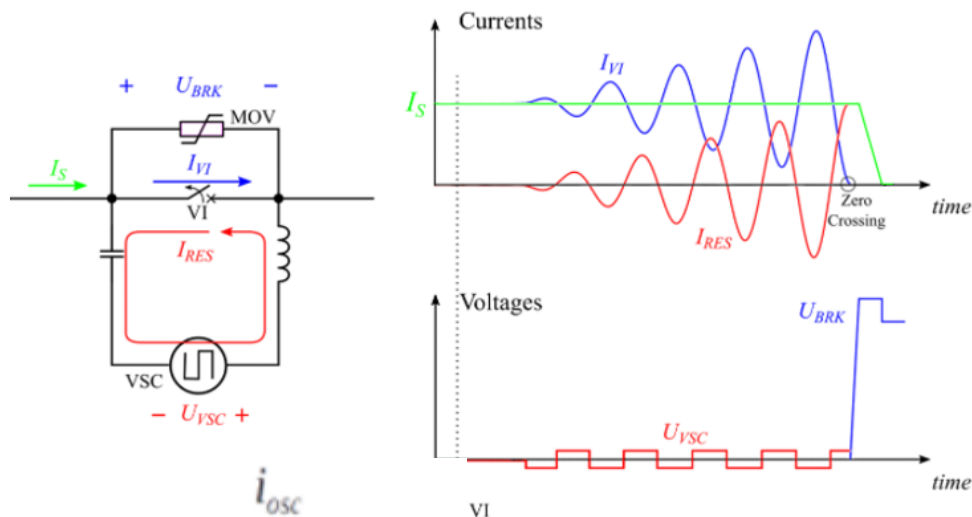
Kommutere strømmen over i neutralen



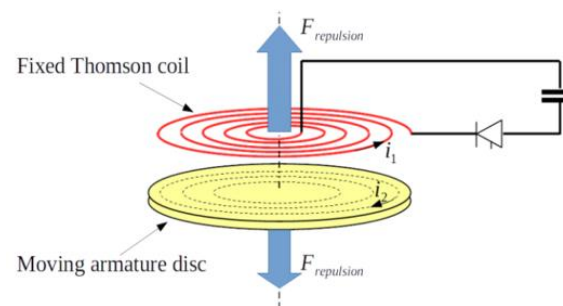
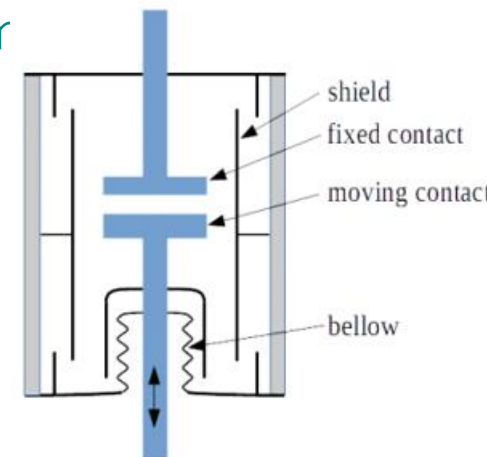
Type	Passive oscillation	Current injection	Electronic	Hybrid
Maks strøm der kan afbrydes [kA]	2 - 4	2 - 16	19	7 - 16
Operationstid [ms]	12 - 14	4 - 8	0.4	2 - 3
Tab under normal drift	Negligible	Negligible	High	Low

OSCILLATING WITH CURRENT INJECTION

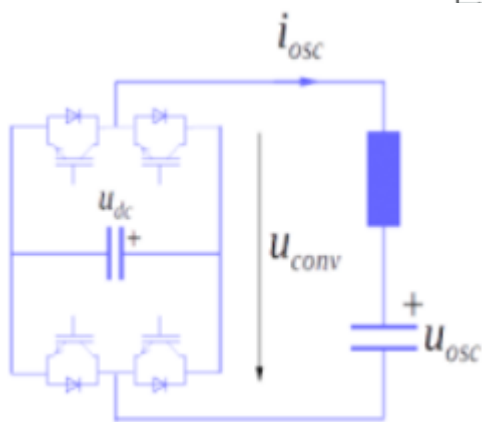
SCiBreak - VARC DC-afbryder med lille VSC til at generere oscillerende strøm



Vakuumafbrydere har meget høj isolationsstyrke, så kontaktafstanden behøver ikke være ret stor

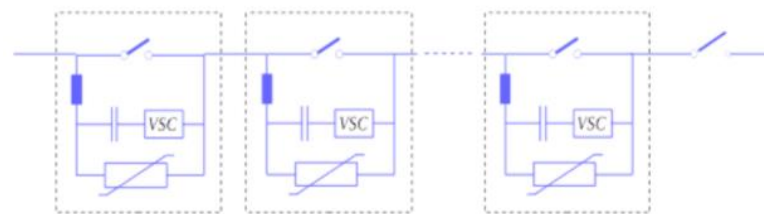


For meget hurtig åbning af vakuumafbryderen anvendes en Thomson Coil aktuator



Ved at skifte polaritet på VSC med høj frekvens kan amplitude på den oscillerende strøm meget hurtigt øges, så der kommer nulpunkt i strømmen gennem vakuumafbryderen

Operationstid 1,2 ms, max brydestrøm 16 kA

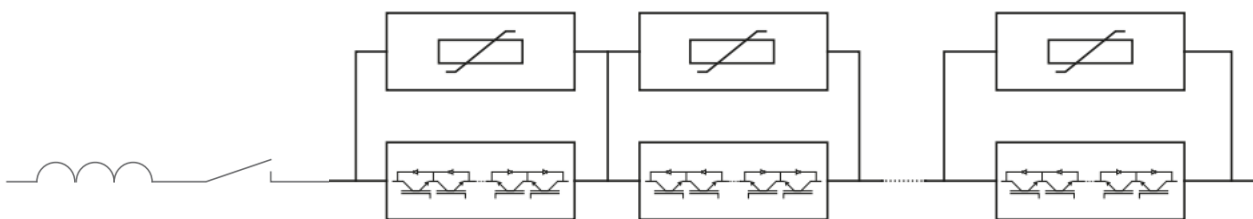


VARC – VSC Assisted Resonant Circuit

Seriekobling af flere moduler (40 kV TIV):

- Tilpasse til DC-spænding
- Redundans
- Undgå overspændinger ved udkobling af fejlfri DC ledning

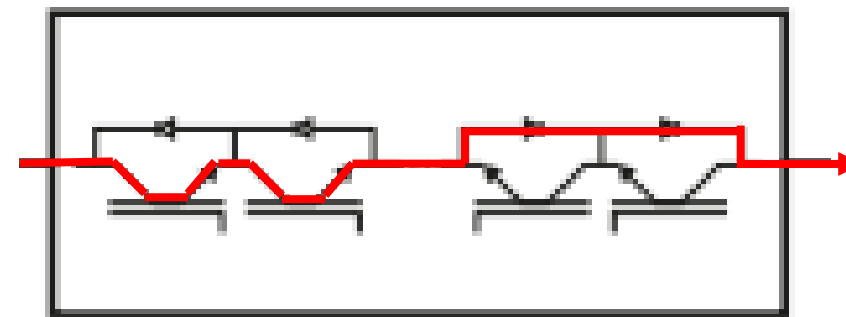
ELECTRONIC



- Normal drift: DC-strøm løber igennem mange IGBT'er (BIGT'er) => høje tab
- IGBT'er blokeres => høj spænding så overspændingsafledere tændes
- Ekstrem hurtig operationstid (< 0,5 ms)

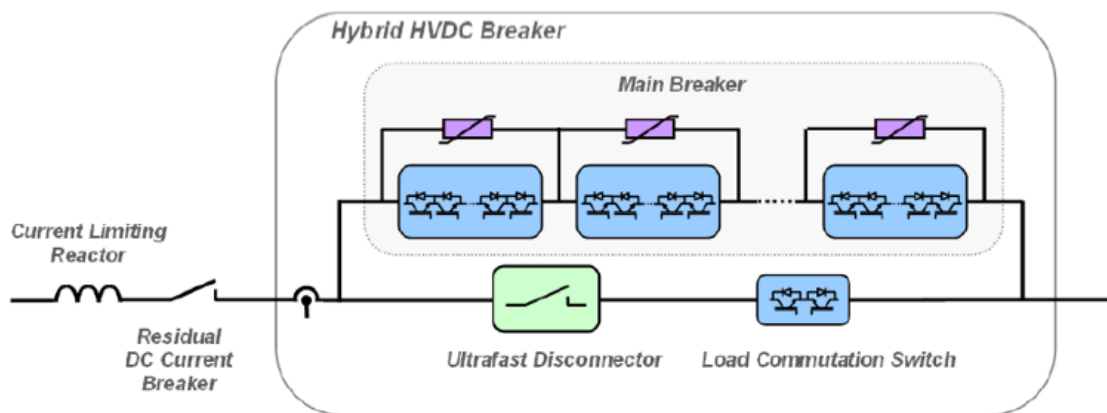
Type	Passive oscillation	Current injection	Electronic	Hybrid
Maks strøm der kan afbrydes [kA]	2 - 4	2 - 16	19	7 - 16
Operationstid [ms]	12 - 14	4 - 8	0.4	2 - 3
Tab under normal drift	Negligible	Negligible	High	Low

Halvdelen af IGBT'er vender i den ene retning og den anden halvdel i modsatte retning for at DC-afbryderen kan virke uanset strømretningen



HYBRID DC-AFBRYDER

Hitachi Energy



- Normal drift: DC-strøm løber igennem nederste gren med en ultra-hurtig adskiller og nogle få IGBT'er => tab meget mindre end for den elektroniske DC-afbryder
- IGBT'er i nederste gren blokeres, hvorved strømmen kommuteres over i de mange seriekoblede IGBT'er.
- Den ultra-hurtige adskiller åbnes (1-2 ms), og funktionen er nu som den elektroniske DC-afbryder (anvender Thomson Coil aktuator)
- IGBT'er blokeres => høj spænding så overspændingsafledere tændes



Type	Passive oscillation	Current injection	Electronic	Hybrid
Maks strøm der kan afbrydes [kA]	2 - 4	2 - 16	19	7 - 16
Operationstid [ms]	12 - 14	4 - 8	0.4	2 - 3
Tab under normal drift	Negligible	Negligible	High	Low

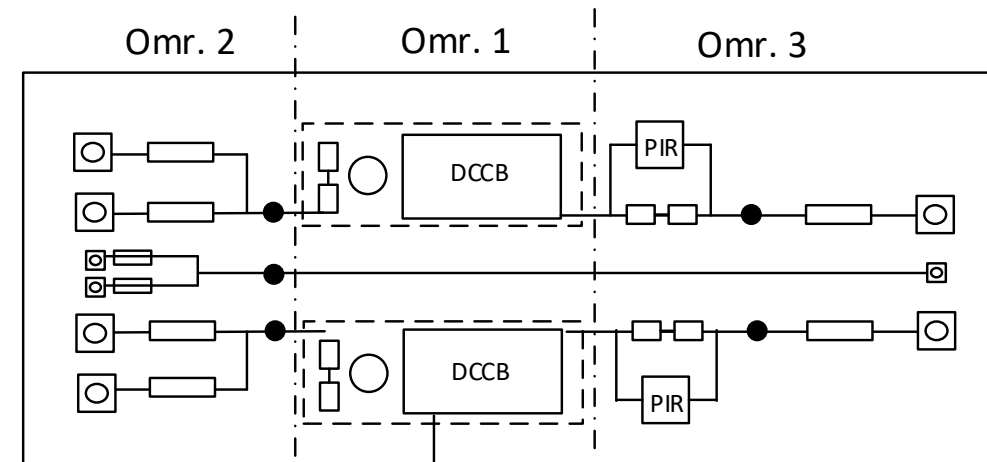
KAN DC-AFBRYDERE KØBES?

- Flere leverandører har DC-afbrydere, de er klar til at sælge
- Ingen erfaringer med DC-afbrydere for høje spændinger i Europa
- Nogle få DC-afbrydere er i drift i Kina
- Fire forskellige fabrikater/typer blev testet i det EU-støttede PROMOTioN projekt
 - Hitachi Energy hybrid breaker
 - SCiBreak VARC breaker (injected current)
 - SCiBreak opkøbt af Mitsubishi i 2023
 - NR Electric hybrid breaker
 - Mitsubishi injected current mechanical breaker

Hvad koster de?
Hvor store er de?

DC-AFBRYDER

- 525 kV DC-afbryder, luftisoleret
 - Optil 155 m² og 16 m høj
 - Isolationsafstand ca. 5 m til vægge/loft
- Udover selve DC-afbryderen skal der være
 - Reaktorspole (ca. 4 m diameter)
 - High-speed switch (f.eks. 800 kV AC-afbryder)
 - Adskillere/jordsluttere på begge sider
 - Spændings-/strømtransducere
 - Overspændingsafledere
 - Evt. indkoblingsmodstand
 - Kabelendemuffer
 - Evt. GIL-rør



Selve DCCB er AIS og skal være i klimakontrolleret rum

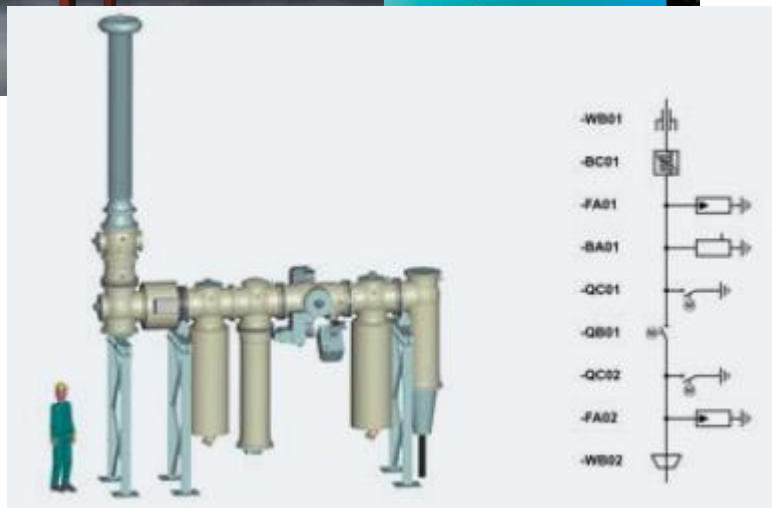
Adskillere mv. kan være AIS eller DC-GIS

PIR kan måske kun være AIS

DC-GIS



Siemens Energy har DC-GIS til 525 kV (SF₆-gas)

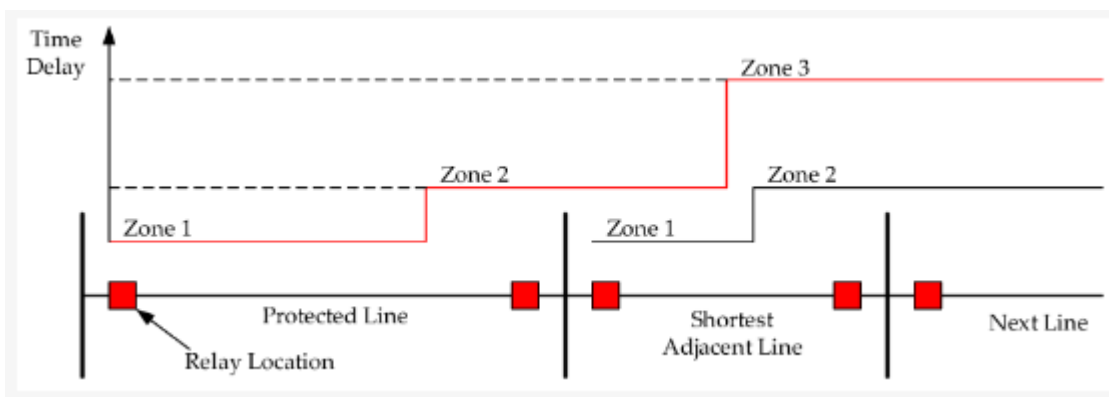


Hitachi testet 350 kV DC-GIS i PROMOTioN

BESKYTTELSE I AC-NET

- Krav til relæbeskyttelse i AC-net:
 - Hurtig reaktion (typisk 20-30 ms)
 - Selektiv
 - Udkoble ved fejl på "egen" forbindelse
 - **Ikke** udkoble ved fejl på andre forbindelser

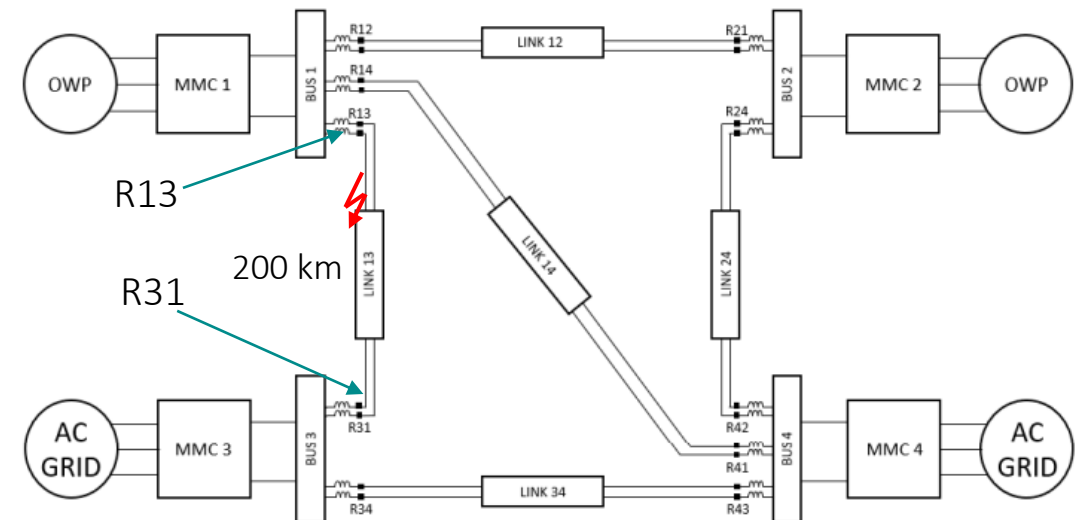
- Afstandsrelæer:
 - Selektivitet, hurtig reaktion
 - Flere zoner
 - Relæsammenkobling
 - Backup beskyttelse
 - Fejl på næste forbindelses relæ eller afbryder



BESKYTTELSE I DC-NET

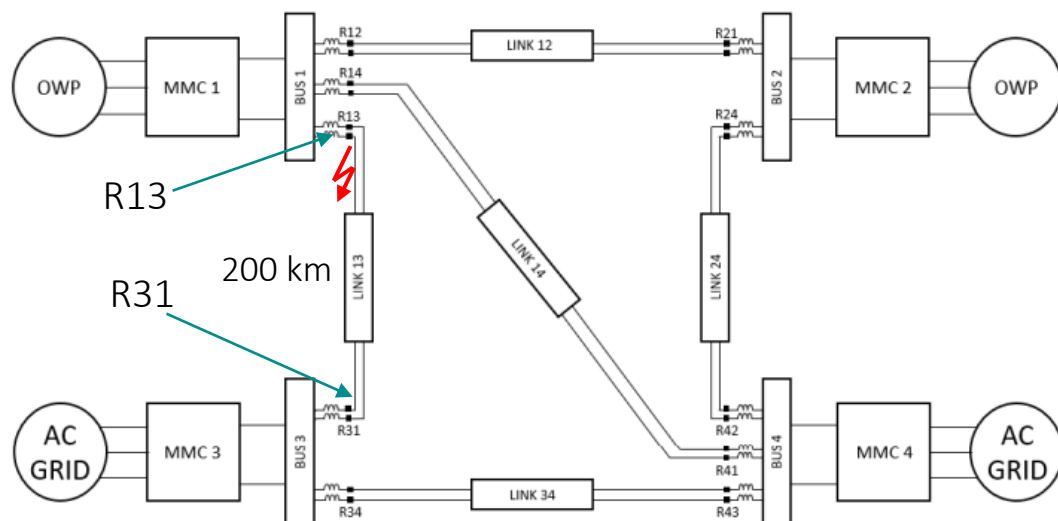
Ekstreme krav til hastighed for beskyttelse i DC-net

- Krav til relæbeskyttelse i DC-net:
 - Ekstrem hurtig reaktion (0,5 – 1 ms)
 - Kan ikke baseres på kommunikation
 - Selektiv
 - Udkoble ved fejl på “egen” forbindelse
 - **Ikke** udkoble ved fejl på andre forbindelser



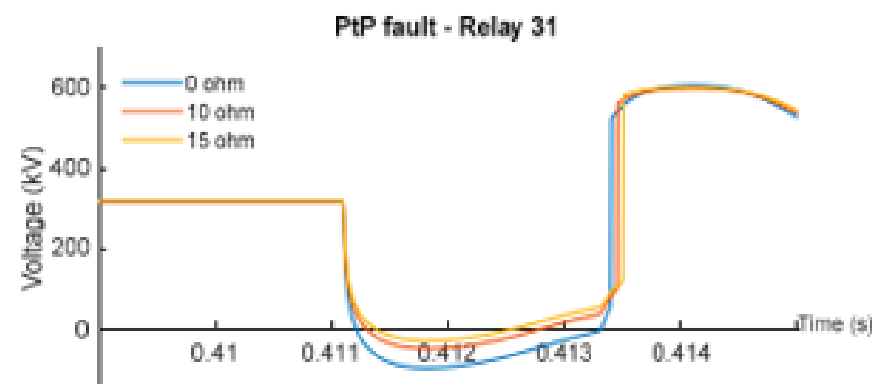
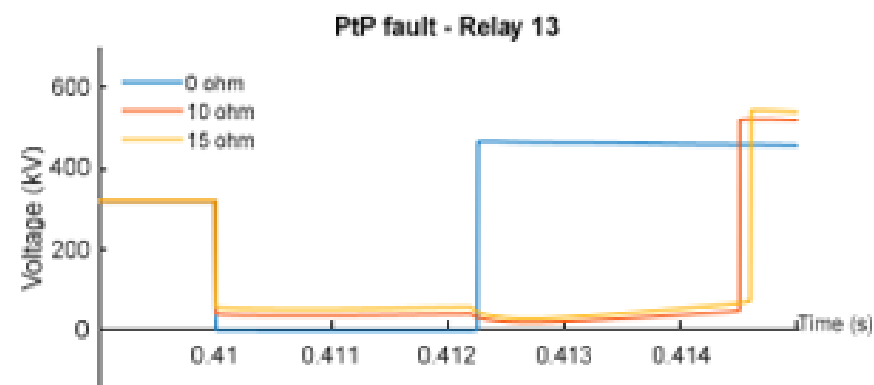
FEJLDETEKTERING I DC-NET

Også fejldelekteringen skal være ekstrem hurtig for at undgå for store fejlstrømme



- ROCOV kan anvendes som kriterie til fejldelektering
 - $\frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} < ROCOV_{th}$ (f.eks. $ROCOV_{th} = -200$ kV/ms)
- 10 kHz sampling => ny måling hver 0,1 ms
- 200 km kabel => relæ 3.1 ser først fejlen efter ca. 1 ms (vandrebølgers hastighed i kabler er ca. 2/3 af lysets hastighed)

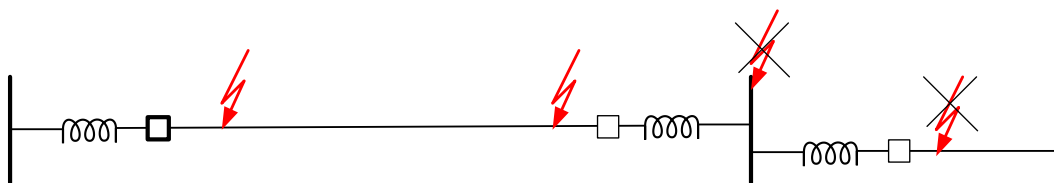
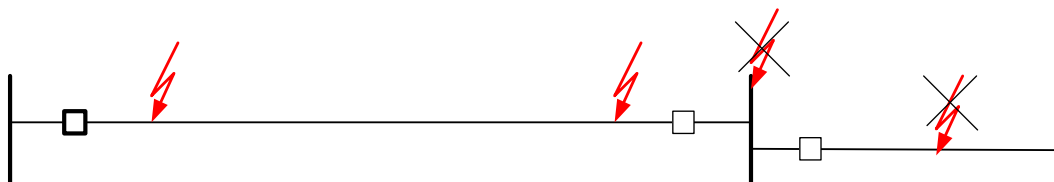
ROCOV = Rate of change of voltage



Selektiv beskyttelse?

SELEKTIVITET I DC-NET

Fejldetektering baseret på vandrebølger

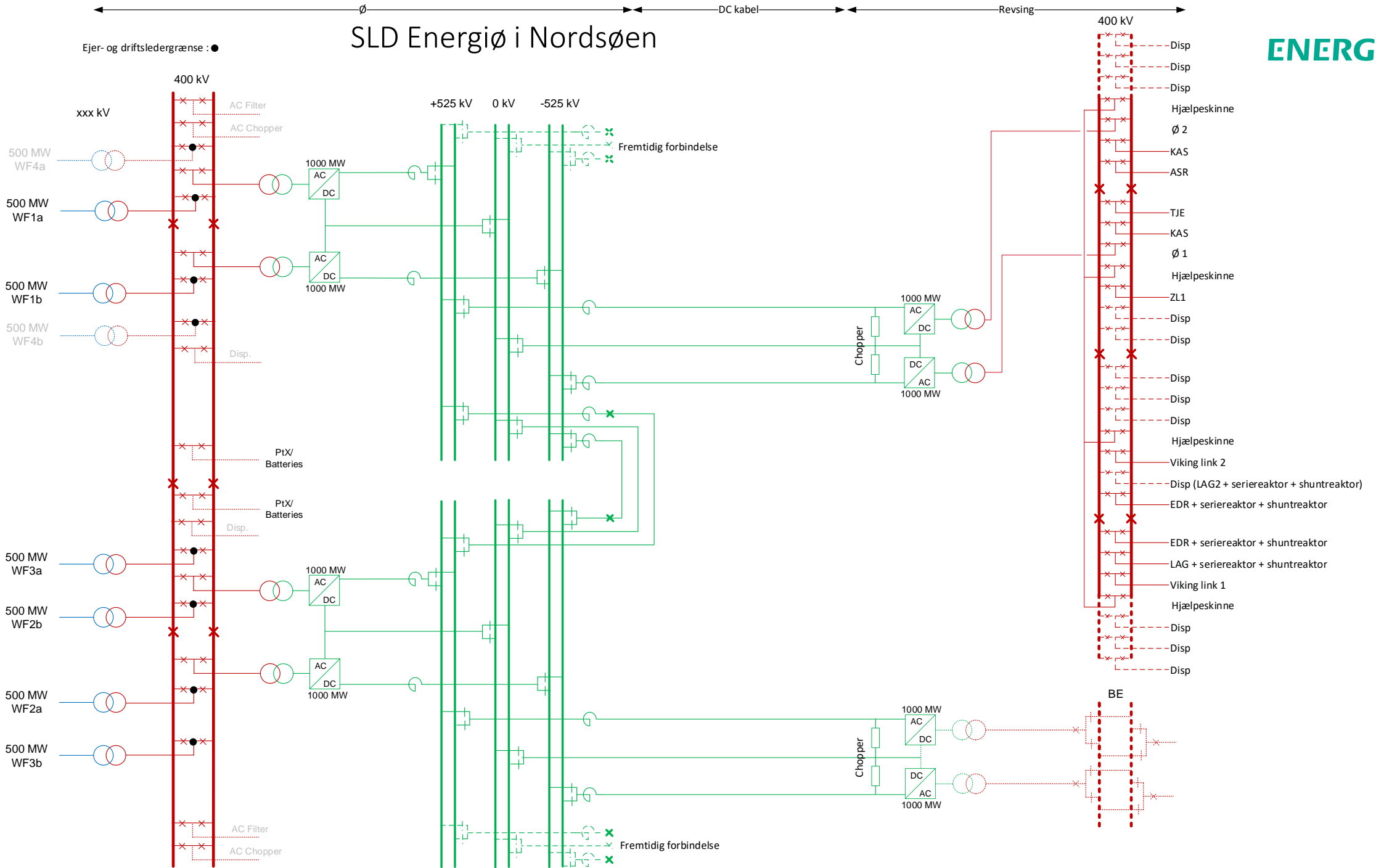


- Hvordan skal relæet skelne mellem fejl på “egen” forbindelse og fejl udenfor?
- Reaktorer virker i første øjeblik som en åben ende
 - Reflektion af vandrebølge:
 - Dobbelt spænding
 - Nul strøm
- Relæet på nabolinjen ser en DC-strøm, der “langsomt” vokser op

Udstyr på energiø i Nordsøen

SLD Energiø i Nordsøen

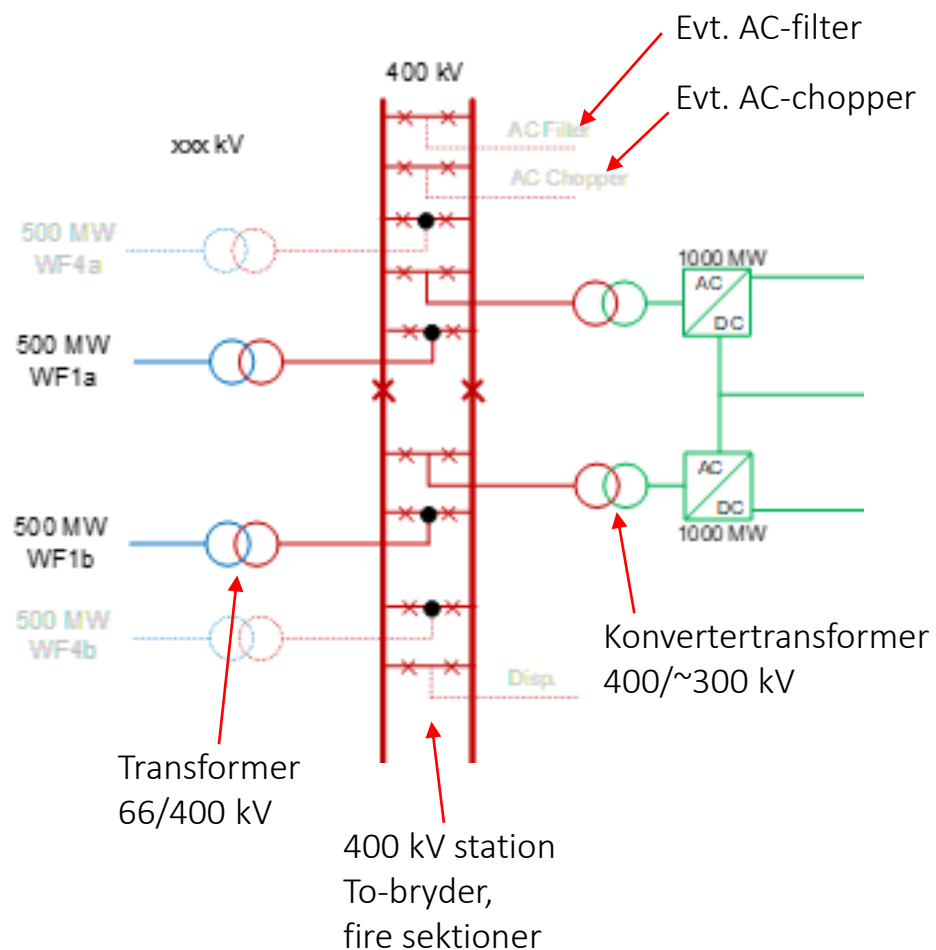
Ejer- og driftsledergrænse : ●



- 400 kV
- Disp
- Disp
- Disp
- Hjælpekinne
- Ø 2
- KAS
- ASR
- TJE
- KAS
- Ø 1
- Hjælpekinne
- ZL1
- Disp
- Disp
- Disp
- Disp
- Disp
- Hjælpekinne
- Viking link 2
- Disp (LAG2 + seriereaktor + shuntreaktor)
- EDR + seriereaktor + shuntreaktor
- EDR + seriereaktor + shuntreaktor
- LAG + seriereaktor + shuntreaktor
- Viking link 1
- Hjælpekinne
- Disp
- Disp
- Disp

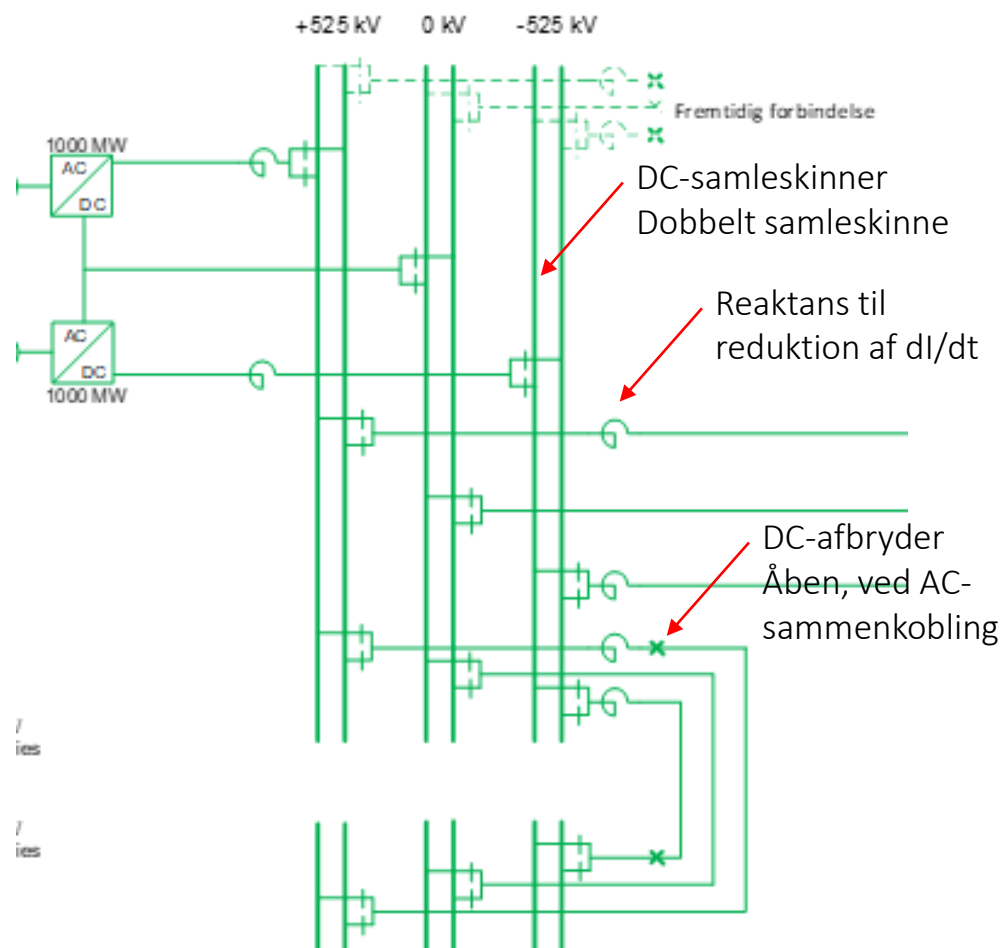
BE

NEA - 400 KV-ANLÆG

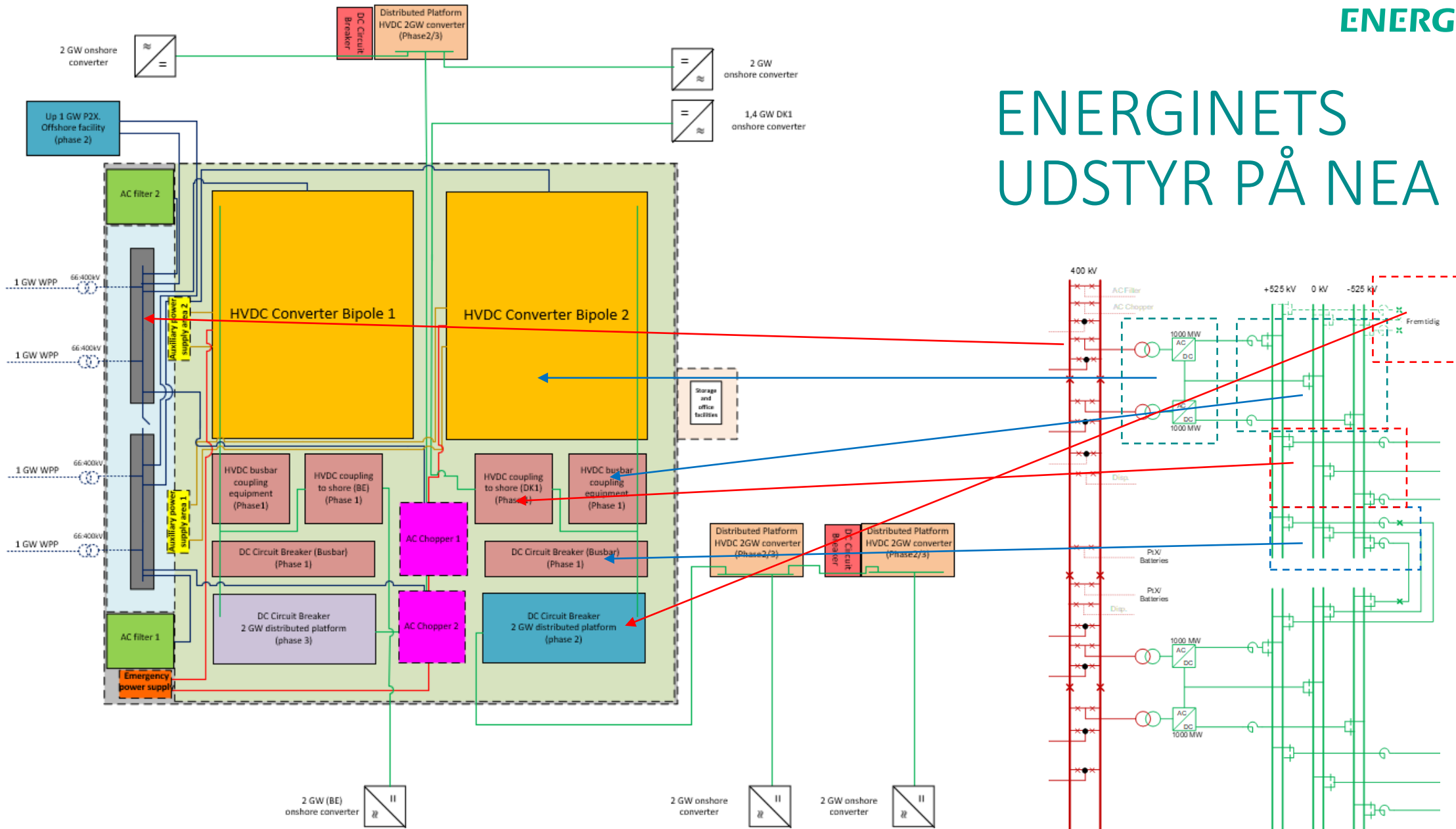


- 400 kV samleskinner opdelt i fire sektioner
- AC-sammenkobling
 - Alle AC-sektioner er sammenkoblet.
 - DC-siden er opdelt
- DC-sammenkobling
 - AC-sektioner adskilt
 - DC-siden sammenkoblet

NEA – DC-ANLÆG

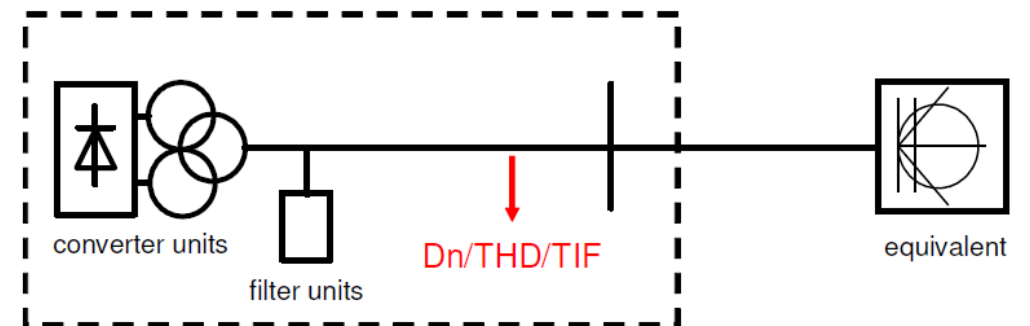
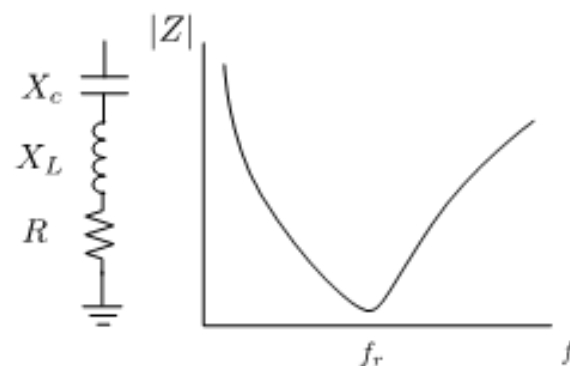
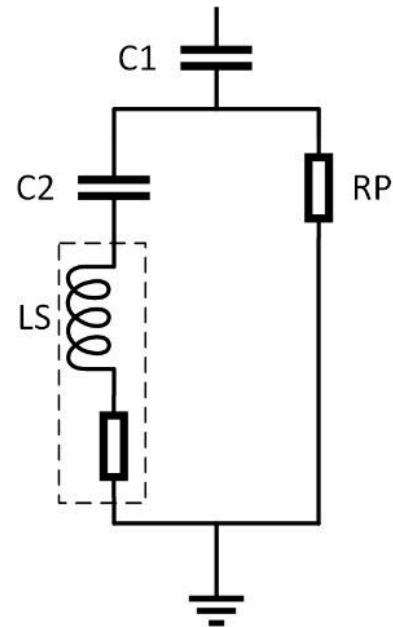


ENERGINETS UDSTYR PÅ NEA



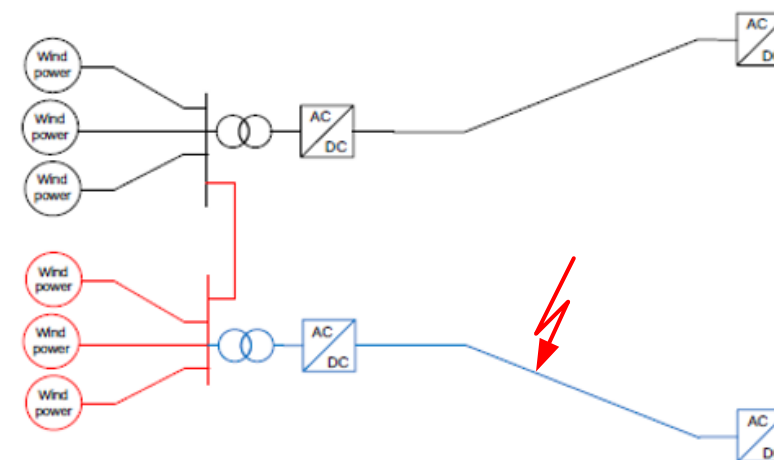
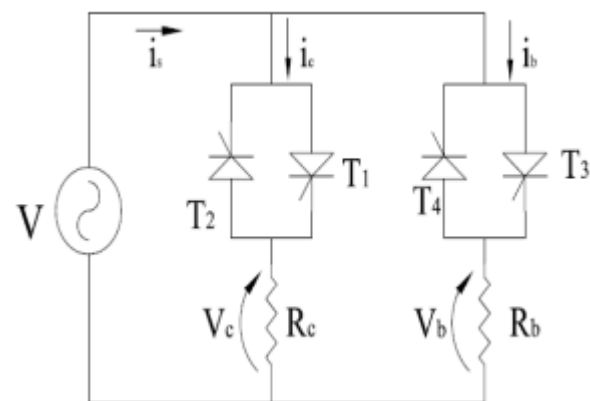
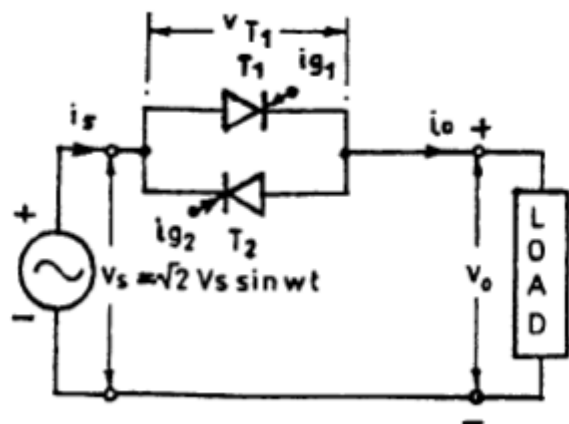
AC-FILTER

- AC-filter er afstemt til en eller flere frekvenser
- Består af passive komponenter (R, L, C)
- Lav impedans ved den/de frekvenser det er afstemt til
- “kortsletter” disse frekvenser, så de ikke sendes ud i nettet
- Impedansen i nettet stor betydning.
 - Varierer med koblingstilstand
 - Worst case ud fra impedansareal (R-X)



AC-CHOPPER

Kun behov ved AC-sammenkobling



- Fejl på ene HVDC-forbindelse
 - Momentant overskud af effekt på AC-samleskinnen
 - AC-chopper kortvarigt optage overskydende effekt indtil vindmøller kan blive nedreguleret
- Flere små AC-choppere tilsluttes en transformer
- AC-choppere optager et ret stort areal
- Forsøger at undgå AC-choppere

InterOPERA

Fælles Europæisk projekt støttet med 55 mio. € fra den europæiske kommission

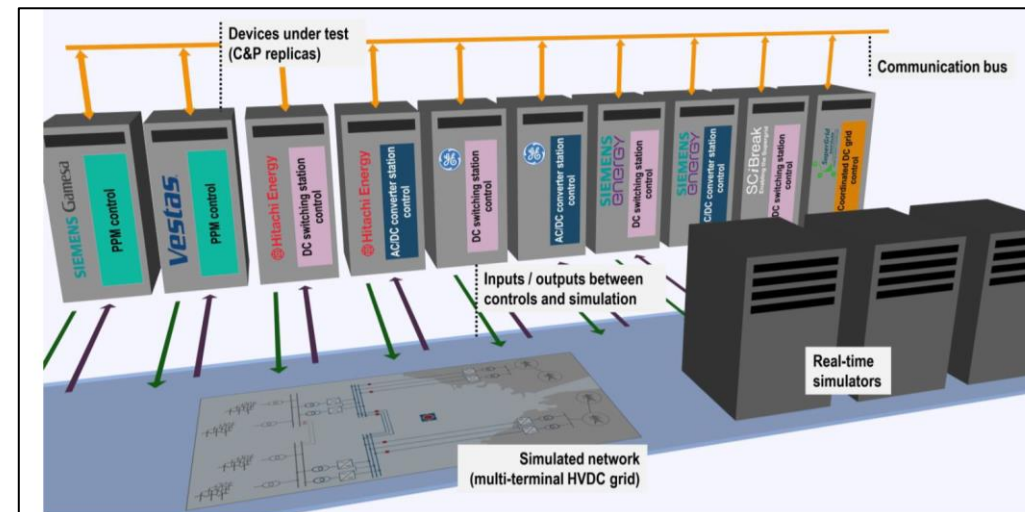
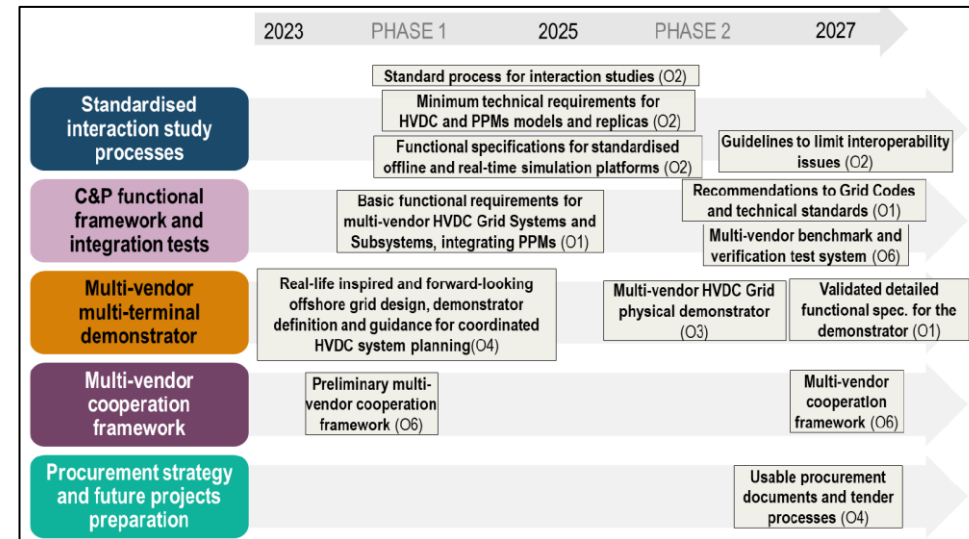
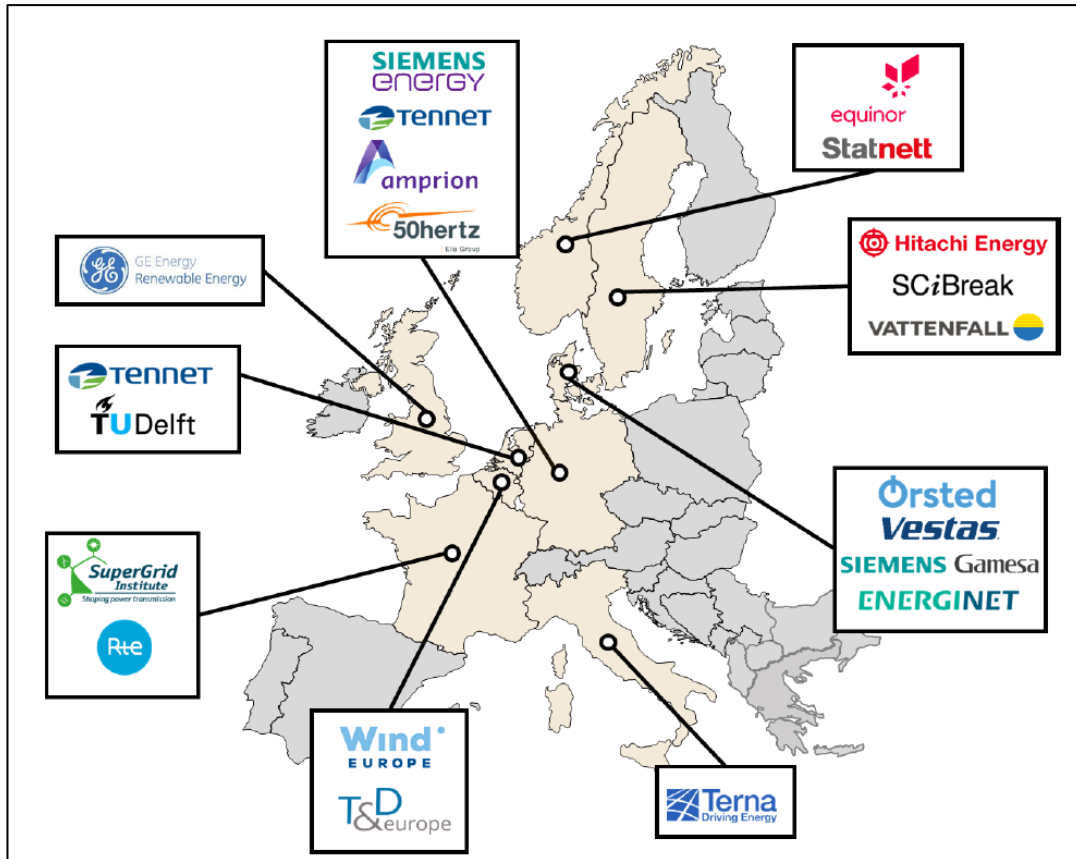


Figure 1.2-B: Real-time physical demonstrator including replicas from InterOPERA's partners

Afsluttende spørgsmål?

jpk@energinet.dk