

VEDLEGG V1 – SKISSEUTREDNING LIKESTRØMSFORBINDELSE

V1-1	BAKGRUNN	1
V1-2	SYSTEMTEKNISK BESKRIVELSE VEKSELSTRØM OG LIKESTRØM	1
V1-3	TEKNISKE LØSNINGER	5
V1-3.1	OMFORMERPRINSIPPER.....	5
VI-3.1.1	<i>Nettkommuterte omformere</i>	5
VI-3.1.2	<i>Tvangskommuterte omformere</i>	7
V1-3.2	OMFORMERSTASJONER.....	7
V1-3.3	KABELTEKNIKK	10
V1-3.4	NETTINNVIRKNINGER.....	11
V1-4	KONKRET VURDERING SIMA – SAMNANGER	11
V1-4.1	DIMENSJONERING.....	11
V1-4.2	TEKNISKE LØSNINGER	12
V1-4.3	MILJØPÅVIRKNING	12
V1-5	KOSTNADER	13

V1-1

BAKGRUNN

Ut fra erfaring var Statnett relativt sikker på at en likestrøms kabeloverføring ikke kunne konkurrere med en vekselstrømsløsning med de overføringsavstander som er aktuelle i dette prosjektet. Som en kvalitetssikring av denne antagelsen ble det besluttet at Multiconsult skulle sjekke dette gjennom en skissemessig utredning av mulige likestrømsalternativer.

V1-2

SYSTEMTEKNISK BESKRIVELSE VEKSELSTRØM OG LIKESTRØM

Vekselstrøm

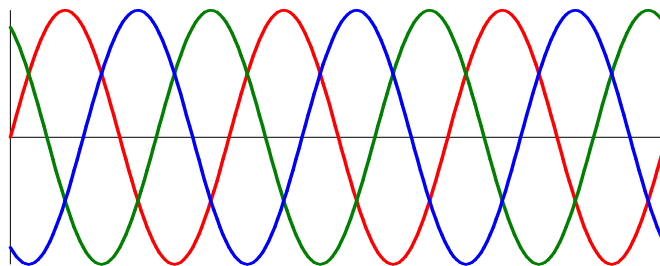
Vekselstrøm (AC: for "Alternating Current") innebærer at strøm og spenning varierer i størrelse og retning. Endringen skjer 50 ganger i sekundet, dvs. med en frekvens på 50 Hz. En karakteristisk egenskap ved vekselstrøm er muligheten til enkelt å transformere strøm og spenning mellom forskjellige spenningsnivå (Figur 1) og på denne måten tilpasse systemene til transmisjons- og distribusjonsformål. Samtidig er det enklere å konstruere brytere for vekselstrøm. I transmisjonssystemer med spenninger fra 66 kV og oppover benytter en ofte termen HVAC (High Voltage Alternating Current)



Figur 1 Vekselstrømsoverføring med transformatorer

Trefase

I trefase vekselstrømsanlegg er spenning og strøm i de tre fasene faseforskjøvet 120° i forhold til hverandre. Det innebærer at sum av strømmene og sum av spenningene til et hvert tidspunkt er lik null, se figur.2.



Figur.2 Trefase vekselstrøm (Fase RST)

Likestrøm

Ved likestrøm (DC for "Direct Current") er strøm og spenning "konstant" mht. størrelse og retning, selv om enkelte variasjoner (reguleringer) skjer over tid.

Likestrøm benyttes ikke i den allmenne fordeling av kraft. Dette primært fordi det ikke er enkle og billige måter å tilpasse spenningsnivået ved likestrøm til bruksområdet (spesielt til

distribusjon av elektrisk kraft). I vår sammenheng benyttes ofte uttrykket HVDC: dvs. "High Voltage Direct Current" som i prinsippet er transmisjonsanlegg med spenninger over ca 60 kV.

Skal likestrøm benyttes må det monteres store, kostbare og kompliserte omformerstasjoner i begge ender for omforming fra veksel- til likestrøm (likeretteranlegg) og for tilbakeføring fra like- til vekselstrøm (vekselretteranlegg)

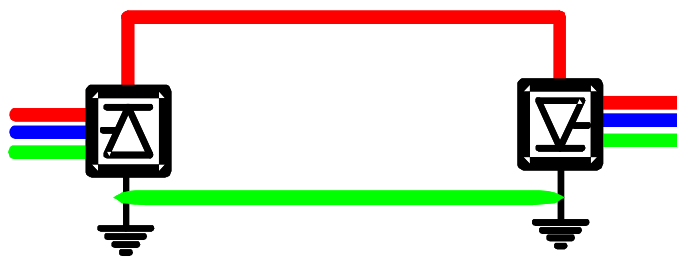
Fordeler	Dersom likestrøm benyttes i kabelforbindelsene er reaktiv effekttransport ikke noe tema og kabelens overføringsevne er praktisk talt ikke avhengig av lengde, kun av tverrsnitt og spenning. Dette er ofte grunnen til at HVDC er den eneste mulige løsningen for litt lenger sjøkabeloverføringer. Likestrøm krever bare to kabler (bruk av elektrodeanlegg med sjø eller jord som returleder aksepteres ikke lenger) mens vekselstrøm krever tre.
Ledninger	Prinsipielt er det ikke noe i veien for å benytte luftledninger men dette er bare konkurransedyktig ved overføring av svært store effekter over meget lange ledninger.
Begrensninger	<p>På grunn av de store kostnadene i begge ender egner likestrømsforbindelser seg best for lange overføringer der</p> <ul style="list-style-type: none">(a) kostnadene med omformerstasjonene kompenseres ved besparelser i kabelkostnader <p>eller</p> <ul style="list-style-type: none">(b) problematikken med reaktiv effekt er uhåndterlig. <p>Som nevnt nedenfor er i tillegg likestrømsforbindelser nødvendige dersom usynkrone nett skal kobles sammen.</p>
Effektretning	De fleste forbindelsene bygges slik at omformeranleggene i begge ender kan drives både i likeretterdrift og i vekselretterdrift. Da kan effekten overføres i begge retninger.
Monopol/bipol	Avhengig av oppbygging av en likestrømsforbindelse snakker man om monopol- eller bipolanlegg.
Monopol	Ved monopol bygges det et omformeranlegg bestående av en eller flere like-/vekselretterbroer i hver ende. Disse broene kobles mellom fase og jord. De første HVDC anleggene ble bygget på denne måten og man benyttet sjø og jord som returleder ved å plassere elektroder på havbunnen. Derved fikk man en meget billig kabelanlegg og et energiokonomisk system med lave tap. De to omformerne kan vekselvis virke som likeretter og vekselretter alt etter hvilken vei en ønsker at kraftutvekslingen skal gå.
Elektroder	Selv om det er utført noen prøveinstallasjoner er elektrodeteknikken bare utviklet i full skala for sjøelektroder. Ved plassering av en stasjon i Samnanger må en føre en metallisk returleder fram til Norheimsund.

Elektrodeanleggene må også plasseres i god avstand fra omformerstasjonene.



Figur 3 Monopol med elektrodeanlegg

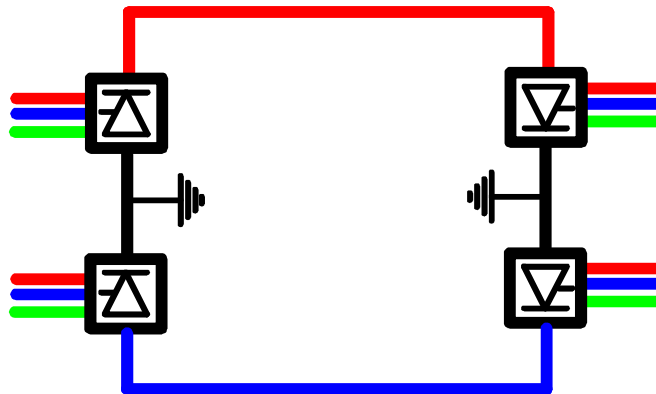
Over tid har det oppstått en miljømessig skepsis til slike systemer da det utvikler seg klorforbindelser rundt elektroden (avhengig av elektrodetype og utforming) der strømmen forlater jord/sjø og går tilbake til omformereren. Magnetfelt fra en DC kabel påvirker konvensjonelle kompass på grunt vann og i enkelte land er det krav om maksimalt 5 ° kompassmisvisning som kan medføre at elektrodene må legges på ca 30 m vanddyp med elektrokabelen ført i parallell med hovedleder på grunt vann. I tillegg kommer forhold som korrosjon på rørinstallasjoner og andre virkninger av vagabonderende strømmer som velger letteste returvei. Disse forhold kan etter nærmere analyser normalt avbøtes og er som regel størst der sjøbunnen er dekket av store sediment avsetninger som på kysten av Tyskland og Nederland. Et par nylig etablerte HVDC installasjoner er bygget som monopol med metallisk returleder ut fra lokale krav. En metallisk returleder kan bygges for en lavere spenning enn hovedlederen og gir derved et billigere system enn en ren bipol, men vesentlig dyrere enn en monopol med elektrodeanlegg.



Figur 4 Monopol med metallisk returleder

Bipol

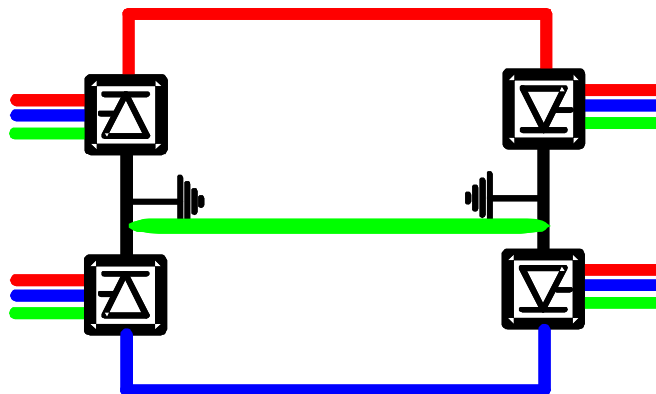
Ved bipol-anlegg behøves det to brosett per omformer (en for hver pol), Den effektive spenningen blir dobbelt så høy som ved monopolar drift men isolasjonsnivået blir det samme (\pm spenning). Returleder kan unngås. De fleste eksisterende bipolanlegg er imidlertid bygget med elektrodeanlegg og benytter sjø eller jord for returstrømmen ved midlertidig monopolar drift (halv overføringsevne) dersom en bro eller kabel er ute av drift.



Figur 5 bipol med- eller uten elektroder

Bipol med metallisk retur

På grunn av de miljømessige innvendingene som er referert ovenfor er noen bipol anlegg bygget med metallisk retur der en har en returleder med lavt isolasjonsnivå mellom omformerstasjonene.



Figur 6 Bipolar drift med metallisk returleder

Spesielle koblinger

Som avbøtende tiltak ved omformerfeil kan en også installere brytere slik at en kan benytte en av faselederne som metallisk retur ved monopolar drift.

Spesielle anvendelser

Likestrøm benyttes også i spesielle anvendelser for å etablere forbindelse mellom forskjellige adskilte vekselstrømsnett. Av spesielle tekniske årsaker ønsker en ikke å bygge for store sammenhengende vekselstrømsnett. For eksempel er vekselstrømsnettet i Norden; Norge, Sverige, Finland og Øst-Danmark, adskilt vekselstrømsmessig fra vekselstrømsnettet i Vest-Danmark og det øvrige kontinentale Europa: Disse nettene er imidlertid forbundet med flere likestrømsforbindelser, eksempelvis Kontiskan mellom Sverige og Jylland og Skagerrak mellom Norge og Jylland. Det bygges nå ytterligere en forbindelse mellom Norge og Nederland (NorNed). Ved slike spesielle anvendelser er det også benyttet likestrømsanlegg i rygg mot rygg utførelse uten overføringsforbindelse mellom likeretter og vekselretter (back-to-back anlegg).

Oppsummering Likestrømsanlegg krever store og kostbare omformeranlegg for omforming av strøm/spenning fra vekselstrøm til likestrøm og tilbake, men overføringsforbindelsen, særlig ved kabelforbindelse, er enklere og rimeligere enn kabelforbindelser ved vekselstrøm. Ved lange sjøkabelforbindelser må det benyttes likestrøm pga generering av reaktiv effekt i vekselstrømskabler. Spesielle anvendelser av likestrøm er som forbindelser mellom forskjellige vekselstrømsnett.

V1-3 TEKNISKE LØSNINGER

V1-3.1 Omformerprinsipper

Krafterlektronikk Siden tidlig på 1970 tallet har halvlederteknologi vært enerådende. Krafterlektroniske komponenter har stadig blitt utviklet til å klare større strømmer og høyere spenninger og derved blitt i stand til å overføre stadig høyere effekter med stor pålitelighet. Krafterlektroniske komponenter kan imidlertid ikke overlastes selv ikke i kortere perioder dette fordi alle termiske tidskonstanter er svært små og en kommer meget raskt opp til stabil temperatur.

V1-3.1.1 Nettkommuterte omformere

LCC Det første prinsippet som ble tatt i kommersiell bruk for likestrømsoverføringer og som benyttet krafterlektroniske komponenter var nettkommuterte omformere i form av "line commutated inverters" (LCC). Disse omformerne bruker tyristorer for å styre omformingen og setter relativt store krav til nettet.

Nettkomutering Tyristorer kan bare skrus på og vil da ikke slukke før strømmen gjennom dem blir null. Ved å benytte fasestyring (eller utsnittstyring) og vente lenger og lenger med å skru på tyristoren kan en regulere spenningen. (Ref fig 7)

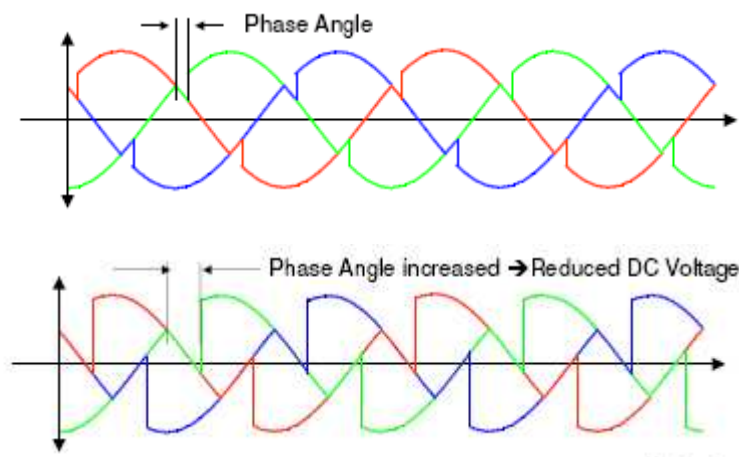


Fig 7 Fasestyring av tyristorer, lenger fasevinkel lavere DC spenning. (kilde ABB)

Spenningsformen blir nokså uryddig ved dette omformerprinsippet og det kreves store filter for å sikre seg mot forstyrrelser i telenett og bakenforliggende nett.

Enhver til- og frakobling av halvlederkomponenter fører til tap i omkoblingsøyeblikket men siden LCC omformerene bare kobler i takt med nettfrekvensen blir tapene relativt små (i størrelseorden 1 – 2%)

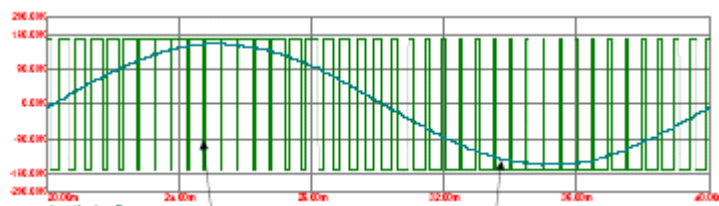
LCC teknologien har vært brukt på alle likestrømsoverføringene fra Norge til kontinentet og har stadig klatret i ytelse. Teknologien betraktes som moden og vel utviklet og er blant annet benyttet i Skagerrak forbindelsen mellom Norge og Danmark der første byggetrinn ble satt i drift i 1977. Det er nå levert HVDC stasjoner som overfører opp til 1 500 MW per pol ved en likespenning på 500 kV på luftledninger og 500 MW per pol med en likespenning på 350 kV på kabler. Ledende leverandører ser for seg at 5 000 MW systemer med en spenning på ± 800 kV vil være utviklet i løpet av et par år men dette vil sannsynligvis være kun for luftledninger en god stund inn fremtiden.

Reaktiv effekt	Som sagt ovenfor er ikke reaktiv effekt noe tema for selve likestrømsoverføringen og den kan utnyttes opp til termisk grenselast for overføring av aktiv energi. Imidlertid krever omformerer selv tilførsel av reaktiv effekt (drøyt 50 % av overføringskapasiteten) og må derfor utstyres med relativt store kondensatorbatteri.
Filterbehov	HVDC omformere forvrenger spenningen fra en ønsket ren sinusform og genererer derfor overharmonisk støy som kan skade tilknyttede apparater og forstyrre telekommunikasjoner. Anleggene må derfor utstyres med nøye tilpassede filter. Hovedkomponentene i et filter er kondensatorer og disse kan derfor være del av kompenseringсанlegget som er nevnt i avsnittet over.
Krisedrift	LCC systemer kan ikke gå på egne nett da de krever tilskudd fra både leverende og mottagende nett for kommutering. Styrken på nettet måles gjerne i kortslutningseffekt og minimal kortslutningseffekt som kreves i hver av endene for en sikker drift er som en tommelfingerregel oppgitt til 2 x overføringseffekten.
CCC	<p>Dette kravet kan reduseres til ca. 1,5 x overføringseffekten dersom en benytter den nyutviklede variant av LCC nemlig "capacitor commutated converters" (CCC), eller på norsk "kondensator kommuterte omformere". Her setter en inn seriekondensatorer på vekselstrømssiden.</p> <p>Disse kravene til nettet gjør at en nettkommutert omformer ikke egner seg til forsyning av områder uten egen produksjon.</p>
Nettstudier	Et LCC system må i stor grad skreddersys til nettet det skal brukes i og krever en relativ lang og omfattende utredningsfase før komponentene kan settes i produksjon.

Effektretning Vending av effektretning i en LCC/CCC skjer ved å vende spenningen på broene mens strømrretningen består uforandret. En slik vending medfører ekstra påkjenninger på kabelisolasjonen og har vanskeliggjort utviklingen av oljefri kabelisolasjon for HVDC kabler.

V1-3.1.2 *Tvangskommuterte omformere*

VSC På slutten av 1990 tallet ble tvangskommuterte omformere i form av "voltager source converter" (VSC) introdusert. Disse er en videreutvikling av frekvensomformere for store motorer og benytter krafttransistorer for å styre omformingen. Transistorer kan både slå av og på og derved kan en benytte et helt annet omformerprinsipp, nemlig puls bredde prinsippet. Her hakker en opp spenningen og ved hjelp av filter genererer en vekselspenning igjen.



Figur 9 Puls bredde modulering (kilde ABB)

Siden koblingsfrekvensen er relativt høy er det enkelt å filtrere bort støy men den høye frekvensen gjør at en slik omformer har relativt høye tap (6 – 9 %)

Transistorene ligger etter tyristorene i den ytelse (spenning og strøm) de kan håndtere. Etter en vellykkede prøveinstallasjoner med lavere ytelse og spenning på Gotland i 1999 har utviklingen skutt fart og det er nå levert systemer med overføringsevne på 330 MW med spenning ± 150 kV. ABB har inn till nå vært enerådende på markedet med system under navnet HVDC light mens Siemens har presentert forslag til tilsvarende system med betegnelsen HVDC pluss. ABB planlegger å være leveringsklar med en 1 140 MW versjon i 2006 (spenningen blir da ± 300 kV)

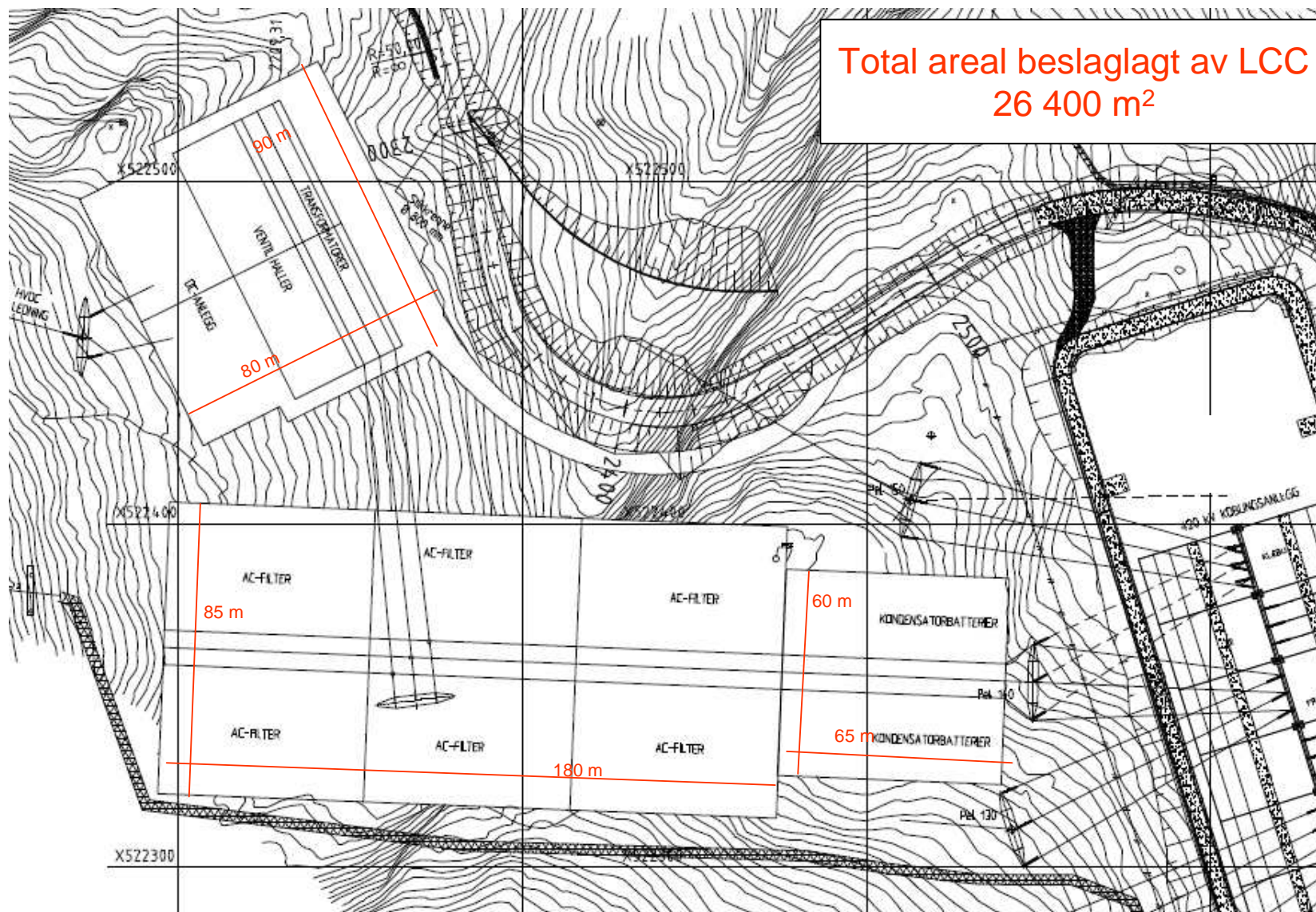
Reaktiv effekt En VSC omformer gir full kontroll over reaktiv effektflyt og trenger derfor ikke støtte. Den kan faktisk også støtte omliggende nett og erstatte kompenseringssystemer for reaktiv effekt som ellers kunne være nødvendig, for eksempel en statisk VAR kompensator i Samnanger. En VSC leverer langt mindre elektrisk støy og filteranleggene er derfor langt mindre omfattende.

Krisedrift En VSC kan levere strøm til et dødt nett og er derfor et effektivt instrument i nettoppbygging etter krisesituasjoner.

V1-3.2 **Omformerstasjoner**

LCC Figur 2-1 viser et typisk arrangement for en LCC omformer med ytelseområde ca 2 000 MW. Som det fremgår er den svært plasskrevende og det kreves en slik stasjon i hver ende av overføringen. I tillegg til koblingsanlegg som en kjenner fra

konvensjonelle transformatorstasjoner kommer den store ventilhallen som inneholder selve omformereren samt kompenseringssystem og filterinstallasjoner med tilhørende bryteranlegg.

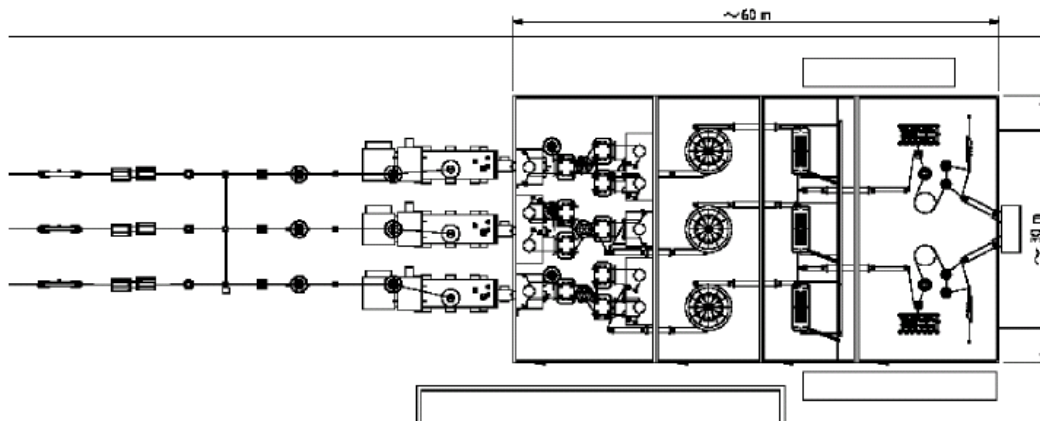


Total areal beslaglagt av LCC
26 400 m²



VSC

Fig 2-2 viser et typisk arrangement for en VSC omformer med ytelse ca 300 MW.



Selv om det er en betydelig forskjell i ytelsen viser dette klart at VSC omformere er vesentlig mer kompakt enn LCC omformerne.

V1-3.3

Kabelteknikk

Luftledninger

Likestrømsløsninger kan bygge på kabel så vel som luftledninger for transport av energi. I denne skisseutredningen er ikke luftledning sett på som noe relevant alternativ.

Kabeltyper

Likestrøm påkjenner isolasjonen på en annen måte enn vekselstrøm siden det over tid bygger seg opp romladninger som er vanskelig å kontrollere. Derfor har ikke PEX kabel vært benyttet inntil nå. De to aktuelle kablene har vært:

- trykkoljekabel
- masseimpregnert papirkabel.

Trykkoljekabel er som beskrevet for vekselstrømsalternativet med sin innebygde lengdebegrensning og fare for begrensede utslipp av kabelolje ved skader. Masseimpregnert kabel er impregnert med en lite viskøs olje som ikke flyter fram og tilbake og har derfor ikke noen lengdebegrensning. Den er også lite forurensende dersom kabelen skulle skades.

Nylig har det blitt utviklet kabler med ekstrudert plastisolasjon for lavere likespenninger. Disse kan foreløpig bare benyttes med VSC teknologi da spenningen her ikke veksler polaritet ved vending av effektretning. En slik veksling utlader de før nevnte romladningene og fører til ytterligere påkjenninger på isolasjonen. Disse kablene utvikles stadig videre og tas langsomt i bruk. De har imidlertid ikke nådd samme modenhetstrinn som PEX vekselstrømskabler og vurderes

ikke som aktuelle alternativer i det prosjekt der kablene legges så dypt som det kreves i Hardangerfjorden.

Det er også under utvikling andre plastbaserte kabelisolasjonstyper. Blant annet har et system med overlappende tynnfilmisolasjon blitt utprøvd men heller ikke dette vurderes som modent nok for Hardanger-prosjektet.

Magnetiske felter Varierende magnetiske felter har, som beskrevet i hovedrapporten, vært i søkelyset som en mulig kreftårsak. Feltene utviklet av likestrøm må i denne sammenheng betraktes som stasjonære på lik linje med jordens magnetiske felter og har ikke vært tilsvarende mistenkt.

Kabeltrase og Installasjon Det er i prinsippet liten forskjell på like- og vekselstrømskabler når det gjelder disse forholdene men detaljløsninger er selvfølgelig avhengig av kabelvekt og dimensjon.

V1-3.4 Nettinnvirkninger

Kompensering En VSC omformer vil kunne fungere som en statisk fasekompensator og kunne erstatte en eventuell statisk VAR kompensator (SVC-anlegg) i Samnanger. Siden effektoverføringen over en likestrømsforbindelse kan styres elektronisk er det mulig å stabilisere nettet i området ved å modulere denne i motfase med eventuelle forstyrrelser.

V1-4 KONKRET VURDERING SIMA – SAMNANGER

V1-4.1 Dimensjonering

Alle termiske tidskonstanter i en omformer er korte og disse tåler derfor lite overlast selv fra relativ kald tilstand. På den annen side er grunnkostnadene for en omformerstasjon store og det er derfor relativt billig og bygge stasjonene med en større kapasitet. Dette gjelder også kablene siden det i stor grad er materiellprisen som vil gi merkostnader. For å kunne foreta en sammenligning har vi imidlertid valgt å bruke samme dimensjoneringskriteriene som for vekselstrømsalternativet.

Kravet om korttidsbelastning på 1 250 MW vil i praksis si at omformeren må dimensjoneres for dette og det er da klart at det må benyttes bipol både for LCC / CCC og VSC løsning.

Vi har også antatt at en VSC løsning i denne størrelsesorden vil være leveringsklar i tide. Denne antagelsen mener vi er rettfærdiggjort av minst en leverandørs konkrete planer om å komme med en 1 340 MW løsning i 2006.

Med dagens teknologi ønsker ikke leverandøren å drive VSC anlegg som i monopolar drift. Dersom det legges en ekstra fullisolert kabel vil en kunne opprettholde full drift med utfall av en kabel.

V1-4.2 Tekniske løsninger

- Likestrømsløsninger** Nedenfor er skissert utformingen dersom Sima – Samnanger forbindelsen skulle etableres som en likestrømsforbindelse. Som nevnt er det omformerstasjonene som er de store kostnadskomponentene og vi vurderer det som lite aktuelt å stoppe i Ljones eller Norheimsund. Derfor baserer skissen seg på bruk av sjøkabler fra omformerstasjon i Sima til Norheimsund, disse kablene forutsettes skjøtt direkte inn på tilsvarende landkabler som føres opp til en forutsatt Kvamskogtunnel og videre til omformerstasjon i Samnanger
- Prinsipløsning** Som det framgår av diskusjonen i avsnitt V1-3.1 er det bare LCC omformere som er levert med den ytelsen som er krevd i Hardangerprosjektet (1 250 MW). En leverandør hevder dog at de snart skal bli klar med en VSC type som dekker kravet. Vi er derfor valgt å skissere begge alternativene uten å foreta noen detaljuttøinger av fysisk lokalisering.
- Omformerplassering** For denne skissen har vi antatt et fotavtrykk på 250 x 160 meter for LCC omformer og 150x90 m for VSC omformer. Spesielt for LCC anlegg kan en arrangere relativt fritt mellom lange og smal utforming og kort og bred.
- I Sima vil det være naturlig og legge en omformerstasjon i parken mellom koblingsanlegg og sjøen. For å få tilstrekkelig overføringskapasitet er det forutsatt en bipol løsning. Tilkoblingen til koblingsanlegget i Sima vil kunne skje som planlagt for vekselstrømsløsningen. Både LCC og VSC system kan få plass på området. Tilkobling til to kabler vil skje gjennom et muffehus på sjøsiden.
- I denne skissen antar en at forbindelsen går helt til Samnanger og at en i Norheimsund går rett fra sjøkabel til landkabel uten å gå opp i dagen. En skjøtekum kan være aktuell.
- I Samnanger vil det være vanskelig å plassere omformeren rett ovenfor koblingsanlegget. En slik måtte antageligvis plasseres lenger opp eller nede i dalen med en vekselstrømskabel opp til koblingsanlegget.
- Kabel** Det er forutsatt to masseimpregnerte kabler uten at en har gått inn og detaljbestemt tverrsnitt. Traseen er antatt å følge den som er utredet for vekselstrømsalternativet.

V1-4.3 Miljøpåvirkning

Som nevnt før er magnetfeltproblematikken mindre kontroversiell for likestrømsoverføring enn for vekselstrømsoverføringer. En bør imidlertid også her legge kablene så nær hverandre som mulig for å redusere feltpåvirkningen.

Selve kabeltraseen representerer stort sett samme miljøpåvirkning i de to tilfellene.

Stasjonene i Sima og Samnanger vil være dramatisk mer dominerende i likestrømsalternativet men de er her plassert i et miljø som allerede er influert av store tekniske installasjoner.

Norheimsund blir forskånet for dominerende anlegg over bakken.

V1-5

KOSTNADER

Prisbase

For likestrømsoverføringer er vår prisbase mye mindre enn for vekselstrømsanlegg: For omformere (spesielt VSC anlegg) har vi benyttet prisantydninger fra leverandører i foredrag og internettartikler samt oppskalerte priser på anlegg levert i den senere tid. Disse gjelder i det vesentlige LCC anlegg.

For kabelpriser har vi stort sett benyttet prisene for vekselstrømsalternativet men skalert ned for antall kabler.

Vi har antatt 420 kV tilknytning til nettet i Sima og Samnanger

Estimatene er summert opp i nedenforstående tabell.

Komponent	LCC		VSC	
	Med to kabler (et sett, ±) millioner kr.	Med ekstra fullisolert kabel millioner kr.	Med to kabler (et sett, ±) millioner kr	Med ekstra kabler millioner kr
Stasjonsanlegg Sima	15	15	15	15
Omformer Sima og Samnanger	2 000	2 000	1 500	1 500
Sjøkabel materiell	552	828	552	828
Sjøkabel installasjon	205	307	205	307
Landkabel materiell	139	209	139	209
Landkabel installasjon	36	54	36	54
Stasjonsanlegg Samnanger	60	60	60	60
TOTALT	3 007	3 473	2 507	2 973