

HVDC Light – likströmsöverföring med spänningsstyva strömriktare

Hittills har högspänd likströmsöverföring (HVDC) nästan uteslutande använts för att överföra mycket höga effekter över långa avstånd. HVDC Light är en ny teknologi som bygger på spänningsstyva omriktare och IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) som utökar det ekonomiskt rimliga området för HVDC-överföring ner till enstaka megawatt. Förutom att vara ett konkurrenskraftigt alternativ till konventionell växelströmsöverföring och lokal generering, exempelvis i avlägset belägna samhällen eller på små öar, öppnas nya möjligheter att förbättra spänningskvaliteten i växelströmsnät.

Utvecklingen av dagens teknik för högspänd likströmsöverföring (HVDC) inleddes i slutet av 1920-talet och började utnyttjas kommersiellt 1954, när världens första HVDC-länk togs i drift mellan Gotland och fastlandet. Den viktigaste innovationen på området har varit tyristorventilen, som infördes i början av 1970-talet.

Även om intensivt utvecklingsarbete under årens lopp har förfinat HVDC-tekniken som medfört lägre förluster, mer avancerade styr- och skyddssystem, lägre övertonshalt, mindre buller etc, är tekniken i princip oförändrad sedan den första Gotlandslänken.

Dessutom har dagens teknik vissa inboende svagheter som är relativt dyra att åtgärda och som i viss mån begränsar användningen av HVDC. Den allvarigaste svagheten är behovet av roterande maskiner i det mottagande nätverket, med åtföljande risk för kommuteringsfel, vilket innebär att ingen effekt överförs under flera perioder.

Spänningsstyva strömriktare

HVDC utvecklades ursprungligen från metoder som användes i industriella drivsystem. För att fastlägga utvecklingsriktningen för HVDC är det därför till nytta att studera närmare vad som händer inom den sektorn.

Faskommuterad strömriktarteknik (PCC), som för närvarande används vid HVDC-överföring, har i industriella drivsystem nästan totalt ersatts av VSC-tekniken (Voltage Sourced Converter). Den grundläggande skillnaden mellan dessa två metoder är att VSC kräver komponenter som också kan bryta strömmen, inte bara sluta den som i fallet PCC.

**Gunnar Asplund
Kjell Eriksson
Kjell Svensson**

ABB Power Systems AB

Eftersom strömmen i en VSC kan brytas finns det inget behov av en kommuteringsspänning i det anslutna AC-nätet. Detta gör det enklare att reglera varvtalet för en motor, givetvis av största intresse inom drivsystemtekniken.

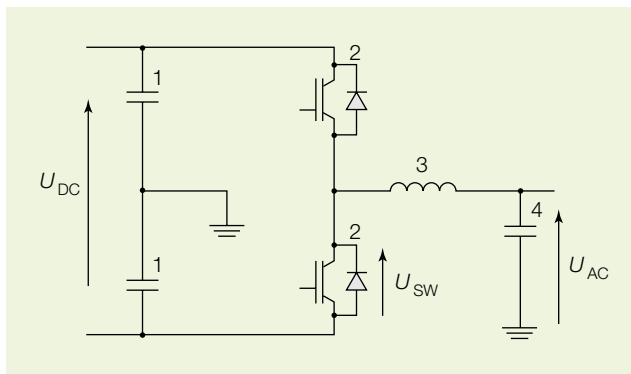
En möjlig tillämpning av VSC-tekniken på HVDC-sidan skulle kunna vara att mata "döda" växelströmsnät, dvs nät där det inte finns några roterande maskiner eller där kortslutningseffekten för befintliga roterande maskiner är mycket låg.

Pulsbreddsmodulering

Om tillgängliga kopplingskomponenter endast klarar lågfrekvent koppling, torde FFC (Fundamental Frequency Commutation) komma att bli den föredragna tekniken. För att minska övertonshalten måste strömriktarna delas upp i flera mindre strömriktare som arbetar med fasförskjutning. 12-, 24- eller 48-pulsdrift kan uppnås på detta sätt, och övertongenereringen kan reduceras i proportion till pulstalet. I sådana fall krävs relativt komplicerade transformatorer för anslutning av omriktarna.

Om kopplingsutrustningen klarar högre kopplingsfrekvenser är PWM-tekniken (Pulse Width Modulation) ett alternativ. I detta fall krävs endast en strömriktare, eftersom växelspänningen bildas genom högfrekvent omkoppling mellan två fasta spänningar. För att generera den önskade grundtonsspänningen krävs lågpassfiltrering. Transformatorarrangemanget är i detta fall mycket enkelt och det behövs inte ens en strömriktartransformator **1, 2**.

Med PWM-tekniken kan fasvinkel eller amplitud – inom vissa gränser – väljas, genom anpassning av PWM-mönstret. Detta kan ske så gott som momentant. Eftersom PWM tillåter oberoende reglering av aktiv och reaktiv effekt, kan en spänningsstyv PWM-omriktare nästan betraktas som en ideal överföringskomponent i ett växelströmsnät. Ur systemets synpunkt fungerar den som en motor eller ge-



En fas av en spänningsstyd omriktare (VSC) med pulsbreddsmodulering (PWM)

U_{AC} AC-spänning
 U_{DC} DC-spänning
 U_{SW} Omriktarens PWM-spänning

- 1 DC-kondensator
- 2 IGBT-ventil
- 3 Omriktarreaktor
- 4 Filter

nerator utan massa och kan styra aktiv och reaktiv effekt så gott som momentant. Dessutom, eftersom växelströmmen är styrbar, bidrar omriktaren inte till kortslutningseffekten.

IGBT

Med tanke på de fördelar som diskuterats ovan kan man fråga sig varför övergången från PCC-tekniken till VSC och PWM inte skedde för länge sedan. Orsaken är att inga kommersiellt tillgängliga halvledarkomponenter tidigare har varit tillräckligt bra.

En komponent som erbjuder intressanta möjligheter för HVDC-tillämpningar är IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). IGBT är en metalloxidhalvledare (MOS). Den kräver därför ett minimum av styreffekt (jämförbar med den effekt som krävs för att styra thyristorventiler. Effekten kan levereras av dämpningskretsar). Detta möjliggör seriekoppling med god spänningsdelning även vid kopplingsfrekvenser i kHz-området.

Utvecklingen av IGBT har varit mycket snabb och spänningsområdet har nu nått

2,5 kV, med ändå högre spänningar på gång. Marknaden för IGBT växer snabbt, något som ökar kunskapsbasen för denna teknik. IGBTn har hittills haft obetydlig användning i HVDC-tillämpningar, eftersom komponenternas kapacitet ännu inte är jämförbar med den hos dagens PCTV-komponenter (Phase Commutated Thyristor Valves).

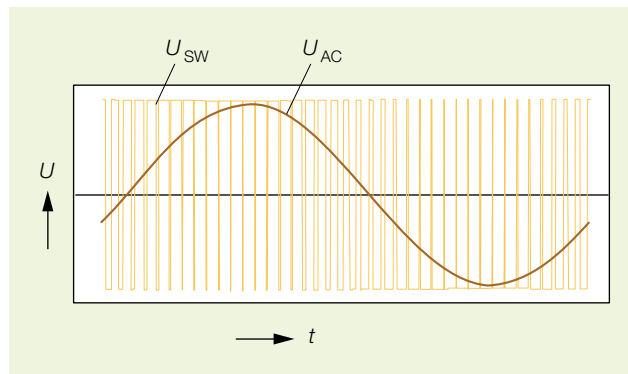
Hellsjön-projektet

Hellsjön-projektet är världens första VSC-baserade HVDC-överföringssystem **3**. Strömriktarstationerna till denna testinstallation med en nominell effekt på 3 MW och ± 10 kV DC, är anslutna till olika delar av ett befintligt 10 kV växelströmsnät. Överföringen går från Hellsjön till Grängesberg i Dalarna, och utnyttjar en 10 km lång 50 kV AC-linje, som för tillfället tagits ur drift **4**.

Strömriktare

Omriktaren i vardera stationen består av brygga, reaktor, DC-kondensator och AC-filter **5**.

Bryggan är av sexpulstyp, på två nivåer, med seriekopplade IGBT i varje ventil.



1 Mönster för pulsbreddsmodulering (PWM) och grundtonsspänningen i en spänningsstyd omriktare **2**

t Tid
 U Spänning

U_{AC} AC-spänning
 U_{SW} Omriktarens PWM-spänning

Varje IGBT är utrustad med en antiparallellkopplad diod. Ventilerna, DC-bussarna och DC-kondensatorerna är av låginduktiv konstruktion, något som minskar överspänningen över ventilen vid brytning. Hjälpspänningen till styrets drivkrets hämtas från spänningen över IGBTn. Halvledarna kyls med avjoniserat vatten.

Tändnings- och släckningskommandona för varje enskild IGBT skickas från kontrollrutrustningen (på jordpotential) via en fiberoptisk ledare.

Huvudfördelarna med en IGBT-baserad omriktare är följande:

- Högimpedivt styre – endast ett minimum av energi behövs för koppling
- Hög kopplingsfrekvens med låga kopplingsförluster som följd

Huvuduppgiften för DC-kondensatorn är att erbjuda en låginduktiv väg för strömmen vid släckning och energimagasin vid styrning av effektlöset. Kondensatorn reducerar dessutom övertonerna på DC-sidan.

Omriktaren genererar karakteristiska övertoner bestämda av kopplingsfrekvensen. Övertonsströmmarna blockeras av strömriktarens reaktor, och kvarvarande



Testinstallationen vid Hellsjön. Världens första HVDC Light-överföringslänk har kapaciteten 3 MW ±10 kV och använder en 10 km lång AC-linje som för tillfället inte är i reguljär drift. 3

- | | |
|------------------------------|------------------|
| 1 AC-filter | 4 Styrutrustning |
| 2 Omriktarreaktorer | 5 Kylsystem |
| 3 Ventiler och DC-utrustning | |

övertoner i AC-busspänningen reduceras därefter av ett högpasfilter. Grundtonsspänningen över strömriktarreaktorn bestämmer effektlödet mellan AC- och DC-sidorna.

Styrning

Strömriktarens styrsystem beräknar spänning-tid-ytan över strömriktarreaktorn som krävs för att ändra strömmen som flyter genom reaktorn från dess aktuella värde till referensvärdet. Strömordern till regulatorn beräknas från den inställda effekt/ström-ordern eller från signaler från DC-spänningsregulatorn. En referensspänning beräknas som till fas och amplitud är identisk med grundtonskomponenten i bryggans utspänning U_g . Pulsmönstret genereras av PWM.

Referensspänningen jämförs med en sågtandad bärvåg. Om referensspänningen är högre än bärvågen ansluts fastterminalen till den positiva DC-terminalen. Om den i stället är lägre ansluts fastterminalen till den negativa DC-terminalen.

Den aktiva effekten P som flyter mellan omriktaren och AC-nätet styrs genom förändring av fasvinkeln δ mellan grundtonsspänningen från omriktaren U_g och AC-busspänningen U_n . Med antagande av en förlustfri reaktor beräknas P i enlighet med följande ekvation:

$$P = \frac{U_g \cdot U_n \cdot \sin \delta}{X_1}$$

där X_1 är reaktansen för omriktarreaktorn.

Det reaktiva effektlödet Q beräknas via amplituden för U_g , i enlighet med ekvationen nedan. Amplituden regleras via pulsbredden på strömriktarbryggans utspänning.

$$Q = \frac{U_g \cdot (U_g - U_n \cdot \cos \delta)}{X_1}$$

Den maximala grundtonsspänningen som kan genereras av omriktaren beror på DC-spänningen.

Drift

Strömriktarstationen kan fjärrstyras och fjärrövervakas från båda stationerna eller från vilken punkt som helst via telefonledning.

Då överföringen ska startas upp, spänningssätts stationerna var för sig. Efter som AC-brytarna är slutna, spänningssätts även DC-bussarna via bryggans antiparallellkopplade dioder. När ventilernas styrdon laddats kan strömriktarna i de båda stationerna sammankopplas via kopplare på DC-sidan. Den första omriktaren som deblockeras kommer att styra DC-spänningen, därefter kan den andra omriktaren deblockeras och överföring av aktiv effekt kan inledas.

Normalt reglerar vardera stationen sitt reaktiva effektlöde oberoende av den andra stationen. Emellertid måste flödet av aktiv effekt till DC-nätet balanseras, vilket innebär att den aktiva effekten som lämnar nätet måste vara lika med den aktiva effekten som kommer in i nätet, minus förlusterna i systemet. Varje skillnad härvidlag skulle innebära att DC-spänningen i systemet snabbt skulle öka eller minska. För att nå denna effektbalans styr den ena stationen DC-spänningen. Detta innebär att den andra stationen kan ställa in godtycklig effekt inom de gränser som gäller för systemet, varvid den station som styr spänningen kommer att justera sin effektsignal för att säkerställa att balansen (dvs konstant DC-spänning) upprätthålls. Detta innebär att balans uppnås utan telekommunikation stationerna emellan, helt enkelt utgående från mätning av DC-spänningen.

Systemstörningar

Om en strömriktare blockeras vid hög last när effekten före blockeringen flyter från DC-nätet till ett AC-nät, kommer energin som är lagrad i kretsens induktanser att ladda DC-kondensatorerna, med följd att DC-spänningen ökar. Stationen som styr DC-spänningen kommer att reagera genom att sänka eller till och med reverse-

ra flödet av aktiv effekt till DC-systemet, i syfte att upprätthålla konstant DC-spänningsnivå. Omriktaren i drift kan fortsätta agera som en SVC (Static Var Compensator) och reglera det erforderliga flödet av reaktiv effekt.

I händelse av att flödet av aktiv effekt före felet skulle gå i motsatt riktning kommer DC-spänningen att sjunka då en strömriktare blockerar. Strömriktaren som är kvar i drift kommer därvid att reglera och återställa DC-spänningen och samtidigt reglera det erforderliga flödet av reaktiv effekt.

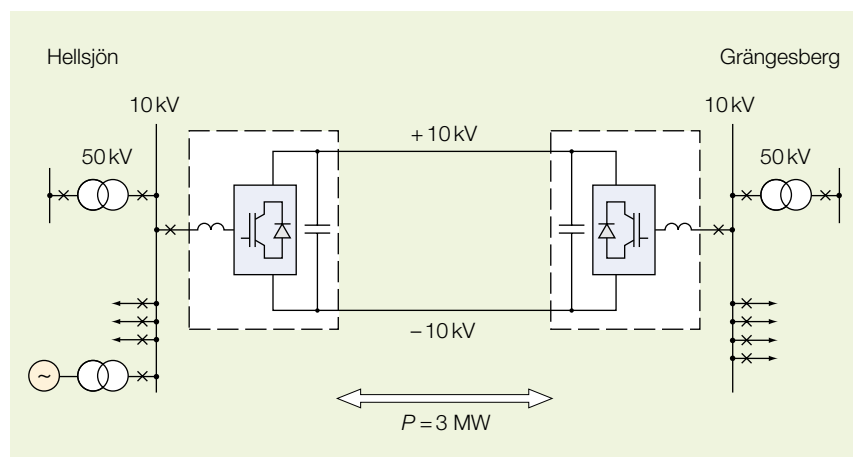
I händelse av ett jordfel i AC-systemet kommer strömregulatorn att snabbt minska grundtonsspänningen från bryggan, i syfte att minska strömmen till värdet före felet.

Systemtest vid fabrik

Var och en av strömriktarna togs i drift separat och drevs sedan som en SVC, med förbrukning och generering av reaktiv effekt. Alla styr- och övervakningsfunktioner verifierades på detta sätt. Därefter anslöts de båda omriktarna till varandra på DC-sidan för att bli en DC-överföringslänk som matades från samma 10 kV AC-spänning och provades med hög belastning av aktiv effekt innan de levererades till installationsplatsen. Aktiv effekt flöt från AC-nätet till DC-sidan via en strömriktare, och tillbaka till AC-sidan via den andra strömriktaren. AC-nätet behövde därmed bara kompensera för effektskillnaden (dvs förlusterna i kretsen).

Drifterfarenheter

Överföringslänken har varit i provdrift sedan mitten av mars 1997 och omfattande testprogram har genomförts. Drifterfarenheterna är uteslutande positiva. Överföringen är mycket stabil och uppvisar önskad prestanda, såväl vid kontinuerliga som transienta förhållanden. Mätningarna visar att omriktarna kommer att uppfylla kraven på ljudnivå, övertoner, telefonstörning och elektromagnetisk emission.



VSC HVDC-överföringslänken mellan Hellsjön och Grängesberg.
Effekten P kan flyta i endera riktningen, såsom framgår av pilarna.

4

Egenskaper för VSC HVDC-överföring

VSC-baserade överföringslänkar är väl lämpade för en mängd olika tillämpningar där konventionell HVDC-teknik idag inte kan konkurrera av ekonomiska eller tekniska skäl.

Enkelheten i en VSC-krets tillåter en kompakt och robust mekanisk konstruktion med strömriktarutrustningen installerad i enkla moduler **5**. En VSC-baserad strömriktarstation med en nominell effekt upp till 20 MW vid lägre spänning

än ± 30 kV tar upp en yta mindre än 250 m².

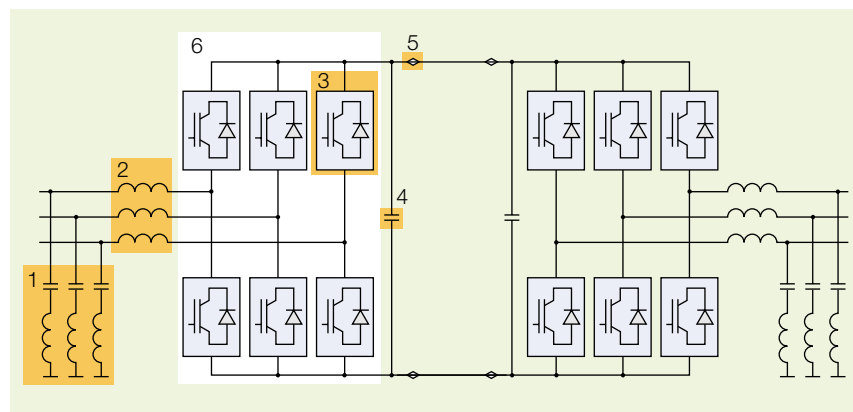
Tack vare sin modulära konstruktion kan utrustningen installeras och kopplas upp redan i fabrik och testas noggrant före leverans. De tekniska förenklingarna, som mindre filter, inga eller enklare transformatorer, mindre kopplingsutrustning och påtagligt enklare anläggningsarbete bidrar till litet utrymmesbehov och enkel hantering.

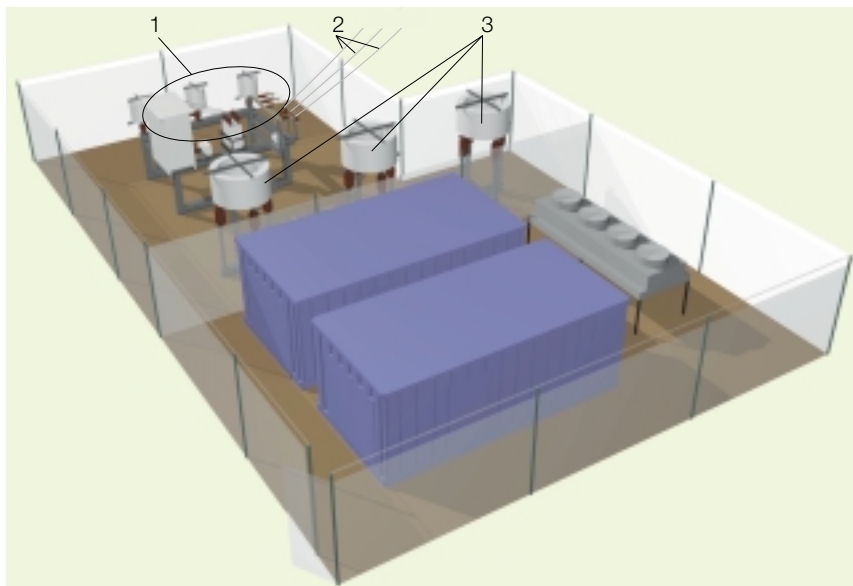
Anläggningsbyggnaden utgår från en uppsättning standardstorlekar och färdiga

Huvudutrustning i en typisk överföringslänk

5

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1 Filter | 4 DC-kondensator |
| 2 Strömriktarreaktor | 5 Anslutning till kabel |
| 3 Strömriktarventil | 6 Strömriktare |





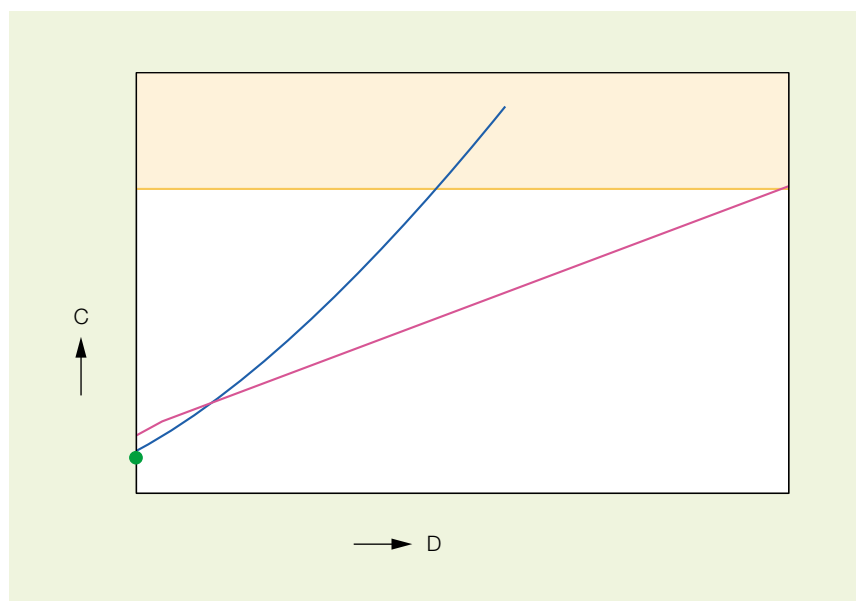
Modell av en typisk layout för en strömriktarstation på 20 MW

- 1 AC-filter
- 2 AC-anslutningar
- 3 Strömriktarreaktorer

Jämförelse mellan typiska kostnader för AC- och DC-överföring och lokal dieselgenerering (utgångspunkt: 20 MW)

- C Kostnad per kWh
- D Avstånd från AC-nätet

- Beige Lokal dieselgenerering
- Blå AC plus luftledning
- Röd HVDC Light med kabel
- Grön Energikostnad för AC-nät



standardritningar, något som minskar det tillämpnings-specifika konstruktionsarbetet. Praktiskt taget all utrustning för ett normalt projekt kan specificeras från första början.

De enkla kretslösningarna gör det dessutom möjligt att konstruera en station som inte behöver stängas av för reguljärt underhåll. Rutinunderhåll kan begränsas till utrustningsinspektion, t.ex. av pumpar, fläktar, hartsflaskor och batterier. Integrerade diagnossystem avslöjar automatiskt fel så att de snabbt kan åtgärdas.

Tillämpningar

Erfarenheten från installationen i Hellsjön har gett viktig information och ger en god bild av vilka anläggningsstorlekar som skulle kunna installeras inom den närmaste framtiden. För närvarande pekar allt mot effektområdet upp till ca 50 MW för VSC-baserade HVDC-system. Bland tänkbara tillämpningar kan nämnas matning till avlägset belägna förbrukare och anslutning av avlägset belägna kraftverk. Även "back-to-back"-anslutning av små förbrukare som befinner sig mellan asynkrona växelströmsnät kommer att bli ekonomiskt rimligt.

Små, isolerade, avlägset belägna förbrukare

Isolerade samhällen är ofta inte anslutna till det nationella elnätet utan får istället förlita sig på dyr lokal genereringskapacitet. VSC HVDC-konceptet kommer att göra det ekonomiskt rimligt för många av dessa samhällen att bli anslutna till det nationella elnätet och därmed få tillgång till billig och miljövänligt producerad elkraft. Ett annat miljömässigt plus är att det går att använda nedgrävd extruderad DC-kabel. Hellsjön-projektet har visat att kostnaden för underjordisk överföring med denna kabeltyp kommer att ligga i samma storleksordning som för luftledningar [7]. Vad mera är, det mottagande nätet kan vara passivt, eftersom VSC genererar en AC-spänning

som kan regleras till såväl amplitud som frekvens.

Matning till öar

Små öar måste ofta förlita sig på dyra lokala dieselmotorkraftverk. Genom att installera en VSC-länk och dra en billig extruderad kabel kan billig elkraft importeras från fastlandet och den lokala dieselgeneratoren kan stängas av.

Innerstadsmatning

Det är dyrt att öka transmissionskapaciteten genom att dra in nya AC-linjer i stadskärnan och i många fall är det svårt att överhuvudtaget få markägarens tillstånd för sådana installationer. En DC-kabel tar inte bara mindre utrymme än en växelströmsluftledning, utan den kan även överföra mer effekt än en AC-länk. Detta är ofta den enda rimliga lösningen för stadskärnor som behöver mer effekt.

Lokala småskaliga kraftverk

Lokala småskaliga kraftverk, som exempelvis små vattenkraftverk och vindkraftverk, har tidigare inte varit ekonomiskt rimliga på grund av de höga driftkostnaderna och den låga överföringskapaciteten i växelströmsnätet.

En VSC-överföringslänk ökar kapaciteten och minskar överföringskostnaderna. Detta innebär att små lokala kraftverk kan anslutas till det nationella nätet eller till avlägset belägna förbrukare och därmed optimera användningen av förnybara energikällor.

Off-shore-anläggningar

Oljeplattformar av idag facklar av över-skottsgas istället för att använda den för generering av elkraft som kan överföras till fastlandsnätet. Orsaken är att dagens överföringssystem inte erbjuder ekonomiskt rimliga lösningar. VSC-lösningen, i kombination med extruderade HVDC-kablar, är ett fullt rimligt alternativ som skulle låta oss slippa elda upp en värdefull resurs.

Multiterminal system

DC-spänningen från en spänningsstyvt strömriktare har alltid samma polaritet, vilket gör det enkelt att integrera anläggningen i ett system med flera terminaler. Ett godtyckligt antal VSCer kan anslutas till DC-bussen med fast polaritet, för att bilda ett maskat DC-system med samma topologi som ett AC-system.

Avtappning

Avtappningar, vilka representerar ett specialfall av ett multiterminalsystem ingår naturligt i ett VSC-system. Som alternativ till en avtappning längs linjen kan skärmledaren i ett stort bipolärt HVDC-överföringssystem användas som en separat VSC-överföring.

Sammanfattning

Kontinuerlig utveckling av krafthalvledare, framför allt på IGBT-sidan, har lett fram till HVDC Light, ett lågeffekts VSC-baserat HVDC-överföringssystem som är en ekonomiskt rimlig lösning för många olika tillämpningar.

HVDC Light lovar vidare effektkvalitetsförbättringar, eftersom metoden eliminerar problemet med spänningsfall längs långa AC-länkar. I kombination med nya styralgoritmer erbjuder metoden även förbättrade prestanda med avseende på variationer i AC-spänningen (flicker).

Bland övriga fördelar som gör VSC-baserad HVDC-överföring mycket attraktivt är:

- Passiva AC-förbrukare kan matas från en DC-spänningskälla.
- Aktiv och reaktiv effekt kan regleras var för sig.
- VSC-strömriktare bidrar inte till kortslutningseffekten.
- Inget behov av snabb kommunikation mellan stationerna.
- Kompakt layout och litet utrymmesbehov.

Genom att kombinera alla dessa fördelar har HVDC Light positionerat sig som ett

mycket intressant alternativ till lokal kraftgenerering och konventionell AC-överföring.

Referens

[1] Asplund, G.; Eriksson, K.; Svensson, K.: DC transmission based on voltage sourced converters. Cigre SC14 Colloquium, South Africa, 1997.

Författarnas adress

Gunnar Asplund
Kjell Eriksson
Kjell Svensson
ABB Power Systems AB
Box 703
S-771 80 Ludvika
Fax: +46 (0) 240 78 23 79
E-mail:
gunnar.asplund@sepow.mail.abb.com
kjell.eriksson@sepow.mail.abb.com
kjell.svensson@sepow.mail.abb.com