

HVDC 시스템 기술적 동향(상)

양병모 · 김찬기 · 고봉언 · 정길조
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

1. 머리말

1887년 처음 한국에서 전기가 공멸의 불을 밝혔고, 그 이후로 전력산업은 북한의 수력자원을 개발하면서 커져나갔다. 그러나 1948년 북한이 남한으로의 송전을 단전시키면서 남한의 전력부족은 심각하게 되었다. 그래서 그 이후로 남한 정부는 경제를 부흥시키기 위해 발전소 건설과 송배전 확충을 위해 많은 노력을 하였다.

결과적으로 한전은 전력공급을 위하여 현재 33GW 건설과 2만km의 송전선을 가지게 되었고, 전력수요는 지난 20년 동안 매년 약 10% 이상의 증가가 있었으며 여러 가지 전력산업의 장애를 극복하기 위한 많은 노력이 요구되었는데 그 가운데 장애 요인들을 들면 다음과 같다.

- 원료의 98% 이상이 수입되었으며 원료의 30%는 발전을 위해서 소비되었다. 그래서 다원화된 발전방식을 중요하게 고려하여 총 발전의 33%가 원전으로 대체되었다.
- 남한의 전력계통은 완전히 이웃나라와 고립되었으며 국내 경제는 수출에 크게 의존하였기 때문에 결과적으로 부하 증가의 불확실성이 충분한 전력공급을 유지하기가 어렵게 만들었다.
- 전력수요 성장률은 매년 약 10% 이상 증가하였다.
- 국토의 약 70%가 산으로 덮여 있어서 발전소와 송전선 건설의 어려움이 있다.
- 남북한의 정치적 군사적 긴장이 매우 높아 대규모의 화력 및 원전은 대부분의 부하가 집중되어 있는 서울과 멀리 떨어진 남쪽에 건설되었다.

이러한 환경 속에서 지금까지 안정적이고 충분한 전력공급을 위하여 많은 노력을 기울여 왔다. 그러나 최근에 새로운 발전소 및 송전선 건설을 위한 부지를 결정하기가 매우 어려워지게 되었다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 새로운 기술인 FACTS, 광역관리시스템(WAMS), HVDC, 재생에너지와 발전

소를 분산시키는 방법이 가장 최선의 길로 알려져 있으며 현재까지 그 기술을 적용하고 있고 계속 연구 중이다.

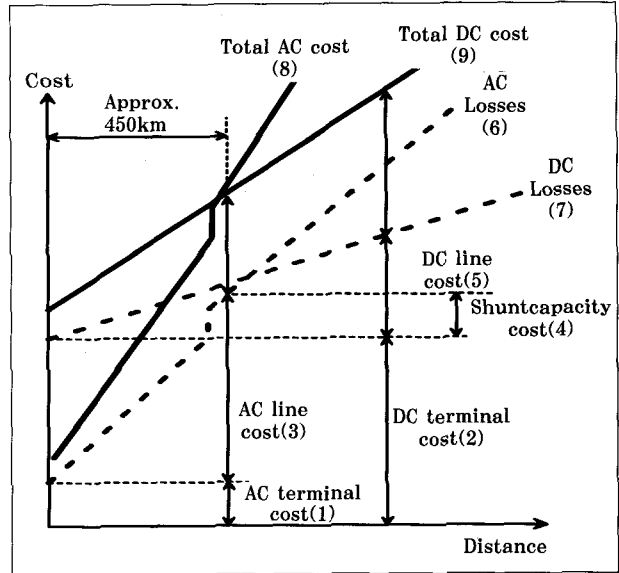
본 기고에서는 HVDC 기술에 대하여 기술하고자 한다.

세계 각국에서는 국가간의 전력망을 연결하거나 전력 사용의 시차를 이용한 계통의 연계, 그리고 1, 2차 변환기의 증설 없이 최종단의 변압기 용량만을 키워 직류계통을 연계하여 부하량을 늘리고 전체 계통에는 영향 없이 전력 계통을 연결하는 직류전송에 관해서 많은 연구가 진행되고 있다. 직류전송은 주상변압기를 대체하거나 태양광 전원을 계통에 연계하는 LVDC(Low Voltage DC)에서부터 대용량의 에너지를 전송하는 HVDC(High Voltage DC)까지 많이 이용되고 있으며 수요와 필요성은 앞으로도 더욱더 늘어날 전망이다. 직류전송은 모든 면에서 교류전송보다 우수하다고 말할 수는 없으나 교류전송에서 가지고 있는 단점을 보완할 수 있다는 면에서 큰 매력을 가지고 있다.

2. HVAC와 HVDC 경제성 평가

HVAC와 HVDC의 경제성을 비교하면 다음과 같다 (단, 비교대상은 가공송전선이다).

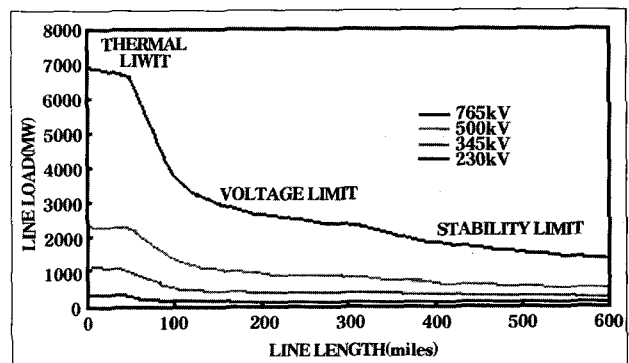
그림 1에서 (1)은 HVAC 송전을 하기 위해서 초창기에 투입되는 비용을 보여주고 있는 것이며, (2)는 HVDC로 송전하는 경우에 밸브가격이 HVAC보다 월등히 높기 때문에 초기 투자비가 많이 소요된다는 것을 보여주고 있다. (3)은 HVAC로 송전하는 경우에 송전라인의 건설비를 보여주고 있고, (5)는 HVDC로 송전하는 경우에 송전라인의 가격을 보여주고 있다. 이 경우에 HVDC 송전이 거리에 따른 건설비가 저렴하다는 점을 보여 주고 있다. HVAC로 송전하는 경우에는 거리에 따른 정전용량 때문에 100km나 200km 구간마다 Shunt Capacitor를 설치해야 하므로 송전선로 가격이 비싸지는 것 이외에도 추가적인 비용이 수반된다(3). (6)과 (7)은



〈그림 1〉 HVDC와 HVAC와 경제성 비교

HVDC 송전과 HVAC 사이의 송전시에 손실을 보여 주고 있는데, 같은 용량을 송전하는 경우에 HVDC가 적은 손실을 가지고 있음을 보여 주고 있다. 따라서 HVDC 송전과 HVAC 송전 사이의 최종적인 평가는 450km 이내에서는 AC 송전이 유리하고, 450km를 초과하는 경우에는 HVDC 송전이 유리함을 보여 주고 있다.

그림 2에서 보듯이 HVAC 송전은 열(Thermal), 전압(Voltage)과 안정도(Stability)에 크게 영향을 받고 있다.



〈그림 2〉 AC전압에 대한 AC 송전용량의 한계(ABB 자료)

즉 열적 용량을 고려하면 AC전압과 용량은 다음과 같다.

- 230kV - 400MW
- 345kV - 1100MW
- 500kV - 2300MW
- 765kV - 7000MW

이 때 전압과 안정도를 고려하면 그림 2에서 보듯이 거리에 따라서 큰 폭으로 용량이 작아짐을 확인할 수 있다.

그러나 HVDC인 경우 같은 전압에 대하여 용량은 2배가 되며, 열과 전압의 안정도에 대한 제약조건은 AC에 비해 거의 없고 또한 전력조류를 제어할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 HVDC 시스템을 설계하는데 있어서 DC전압을 선정하는 문제는 대단히 중요한데, DC전압을 높이면 부하손실은 작아지나 절연레벨을 높이기 위해서 투자비가 높아지고 DC전압을 낮추면 절연레벨은 작아지나 부하손실이 커지는 단점을 가지고 있다. 따라서 절연레벨과 부하손실을 고려하여 최적의 DC전압을 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. HVDC를 이용하여 장거리 대용량 전력 전송을 하는 경우에는 우선적으로 전송하고자 하는 전력량을 결정할 필요가 있다. 그리고 전력량이 결정되면, 경제성을 고려한 DC전압을 결정하고, 다음으로 시스템 설계에 들어가게 된다.

아래 식은 손실과 투자비를 고려해서 HVDC 시스템의 DC전압을 결정하는 이론적인 수식을 보여 주고 있다. 전체비용(C)은 시스템을 건설하는 투자비용(C₁)과 손실비용(C₂)의 합에 의해서 결정된다.

$$C = C_1 + C_2$$

$$C_1 = A_0 + A_1 nV + A_2 nq$$

여기서,

V = 전압 레벨

n = 도체 수

q = 각 도체의 전체 단면적

A₀, A₁ 그리고 A₂는 상수

그리고 단위 길이당 손실비용(C₂)은 다음과 같이 주어진다.

$$C_2 = [n(P/nV)^2 \frac{1}{2} TLp]/q$$

$\frac{1}{2}$ = 도체의 저항률

T = 1년 동안 전체 운전시간

L = 부하 손실 계수

P = 단위 에너지당 비용

C₂는 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$C_2 = [A_3(P/V)^2 \frac{1}{2}]/nq$$

$$nq = \sqrt{(A_3/A_2)} \frac{1}{2} (P/V)$$

$$J = P/(nqv) = \sqrt{A_2 / (A_2 \frac{1}{2})}$$

여기서, J는 전류밀도

$$C = C_1 + C_2 = A_0 + A_1 nV + 2\sqrt{A_2 A_3} \frac{1}{2} \left(\frac{P}{V}\right)$$

3. HVDC 기술 최신 동향

가. VSC(Voltage Source Converter) 방식 변환기

사이리스터 밸브를 이용하는 전류형 컨버터 HVDC 시스템은 본질적인 단점을 가지고 있는데, 예를 들어, 사이리스터 밸브를 정류하기 위해 발전기나 동기조상기와 같은 회전기기가 인버터 측 계통에 필요하며, 무효전력 보상을 위한 커패시터 뱅크가 인버터 측이나 렉티파이어 측에 존재해야 한다. 또한 사이리스터형 HVDC 시스템은 고조파를 발생시키기 때문에 이를 제거하기 위한 고조파 필터가 필수적으로 필요하다. 그러나 사이리스터형 HVDC 시스템이 어느 정도 완성된 기술이라 할지라도, 아직 성능 개선이라는 차원에서 다음과 같은 분야에서 연구의 필요성이 대두되고 있다.

- AC측과 DC측에 Active Filter의 적용

- Capacitor Commutated Converter(CCC)
- Controller Series Capacitor Converter(CSCC)
- HVDC 컨버터에 발전기의 직접적인 연계

이러한 사이리스터형 HVDC 시스템은 자체적인 결점 때문에 점차로 전압형 HVDC 시스템으로 전환되어 가고 있는 추세이나 전압형 HVDC 시스템의 스위칭 손실과 소자의 한계 그리고 고주파 스위칭에 의한 새로운 문제점 때문에 아직 해결해야 하는 점이 많이 있다. 따라서 전압형 HVDC 시스템은 150MW 이하에서 타당성이 있고 150MW 이상에서는 당분간 사이리스터형 HVDC 시스템이 시장을 점유할 것으로 예상되나 장기적으로는 전압형 HVDC 시스템이 점차적으로 사이리스터형 HVDC 시스템 시장을 잠식할 것으로 예상된다. 따라서 세계 각국에서는 이러한 전압형 HVDC 시스템 개발을 하고 있으며, ABB사에서는 전압형 HVDC 시스템을 "HVDC Light"라는 상품명으로, Siemens사에서는 "HVDC Plus"라는 상품명으로 그리고 Alstom사에서는 "HVDC Extra"라는 상품명으로 세계 시장에 내놓고 있다. 전압형 HVDC 시스템의 상용화는 스웨덴의 ABB사가 1999년 스웨덴 본토와 고틀랜드 섬 사이를 연계하여 상업운전하고 있는 것이 최초이며, 이 시스템은 일반적으로 BTB(Back-to-Back)의 기능도 가지고 있으나 육지의 전력을 섬에 전송하는 방식이 기본 방식이며 스위칭 패턴은 PWM 방법을 사용하고 있고 AC/DC 컨버터의 입력단과 인버터의 출력단에는 PWM 스위칭 방법에 따라 발생하는 고조파를 제거하기 위해 소형 필터가 존재하고 있다. 앞으로 기술적 측면에서 HVDC 시스템은 전압형 기술의 사용과 각 변환소의 독립적 제어 및 수동제어 최소화를 지향하게 될 것이다. 현재의 직류연계는 전류형 변환기가 사용되어 왔는데 이런 장치가 더 개발되어 높은 전압에서도 사용될 수 있게 될 것이고 가격도 현재보다 낮아지게 될 전망이다. 전압형 변환기는 재래의 전류형에 비하여 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 강제 전류
 - 전류실패 없음
 - 중앙제어 불필요
 - AC 송전과 보다 더 유사함
 - 제어 속도가 빠르고 무효전력제어가 가능
- 전압형 HVDC 시스템은 사이리스터형 HVDC 시스템과 비교하였을 때, 다음과 같은 장점이 있다.

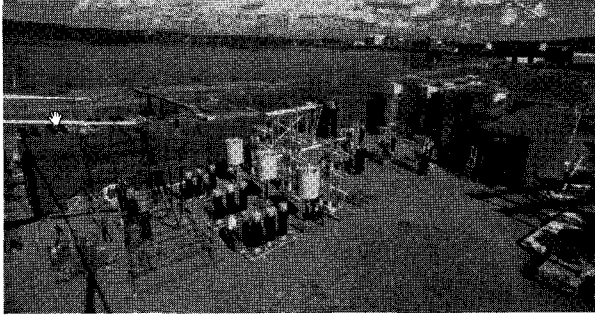
- 고속 스위칭에 의해서 짐차 고조파는 큰 폭으로 감소하므로 고조파 필터의 크기가 상대적으로 적어질 수 있다.
- 무효전력 공급이 필요하지 않다.
- 유효전력과 무효전력 제어가 독립적으로 가능하다.
- PWM 제어의 증가된 스위칭 주파수로 응답속도가 빨라졌다.

그러므로 전압형 HVDC 시스템은 다음과 같은 장소에 적합하다고 할 수 있다.

- 풍력발전단지나 새로운 전원을 기존의 계통과 연결하는 경우
- 섬이나 시추선과 같이 독립된 계통에 전기를 공급하는 경우
 - ※ 시추선에서 사용하는 전원을 기존의 교류계통을 이용하는 경우에는 대용량의 변압기를 탑재해야 하기 때문에 가능한 한 작은 공간과 제한된 무게만을 요구하는 시추선에서는 교류계통을 이용해서 얻어지는 경제적인 이득보다는 손해가 많기 때문에 전압형 HVDC 시스템이 기본설비로 자리 잡고 있다.
- 급속하게 팽창된 즉, 고층 건물이 밀집한 도시에 전력을 공급하는 경우
- 장거리 송전선을 갖는 경우

전압형 HVDC 시스템으로써 HVDC Light에 대해 간단히 소개를 하면 다음과 같다.

HVDC Light는 중소용량의 송전을 위한 전력송전 기술이다. 이 기술은 상호 연결이 어렵거나 불가능한 네트워크



〈그림 3〉 설치 전 HVDC Light

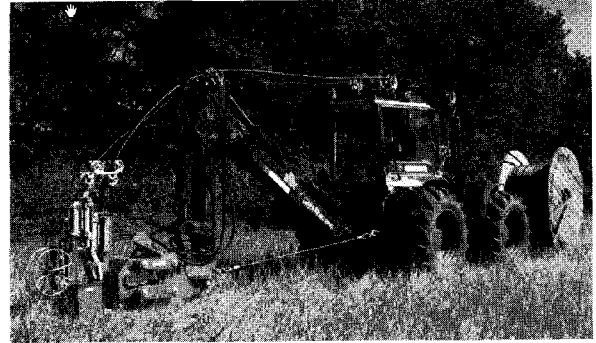
워크의 연결에 적합하며, 5~150MW의 용량을 모듈 방식으로 움직일 수 있는 집에 건설될 수 있다(그림 3 참조). HVDC Light는 컨버터 변환소와 케이블로 구성된 DC 송전 기술로 컨버터 변환소는 스위칭 소자인 IGBT 전력 반도체를 이용한 전압원 컨버터다.

HVDC Light는 AC 네트워크와 무관하게 전압과 주파수의 안정을 유지할 수 있게 한다.

HVDC Light 시스템은 150MVA, DC전압 ±150kV까지 가능하며 환경친화적인 기술로 HVDC Light 컨버터 스테이션 출력은 고주파수 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation)로 제어함으로써 AC 네트워크에 출력전압과 전류를 거의 동시에 변화시킬 수 있다. 그래서 HVDC Light 컨버터는 무효전력 발생과 소비를 통하여 계통 네트워크를 보상할 수 있는 것이다. HVDC Light의 무효전력은 AC 네트워크의 전압을 제어하여 전력품질을 향상시키며 고장시 AC전압이 감소할 경우 컨버터는 빠르게 전압을 보상하여 부하에 심각한 왜란을 방지하게 된다.

HVDC light는 다음과 같은 환경에 큰 장점이 있다.

- 고립된 부하에 전력공급 : 발전소에서 멀리 떨어져 있는 도시, 광산, 섬
- 비동기 네트워크 연결 : 상이한 주파수의 AC 네트워크 연결
- 소전력 공급 : HVDC Light는 풍력, 수력, 태양에너지로부터 전력을 공급



〈그림 4〉 50~70cm 깊이로 땅을 갈아서 케이블을 묻고 있는 장면

- 다단자 DC 연결(Multi-terminal DC connection) 경쟁적인 전력시장의 도입으로 전력네트워크의 역할이 중요하게 되었다. HVDC Light는 새로운 DC 송전기술로 시장경쟁에서 많은 장점이 있는데, 이 장점은 모듈화되고 규격화된 설계로 짧은 기간에 전력전송이 가능하며 콤팩트한 변환소, 환경의 영향을 최소화한 케이블, 전압과 전력의 제어 용이성이 있다. 이러한 특징들로 인해 지금 전력시장 경쟁에서 HVDC Light 설비가 빠르게 설치되고 있는 것이다. 그림 4에서 보듯이 케이블 설치시 매우 용이하고 공기가 매우 짧다는 것을 알 수 있다.

나. CCC 방식 변환기

CCC는 "Capacitor Commutated Converter"의 약자로 종래의 변환기와 다른 점은 변환용 변압기와 밸브 사이에 직렬 커패시터를 연결한 것이다.

이 직렬 커패시터를 연결함으로써 변환기 특성은 다음과 같이 개선할 수 있다.

- 무효전력 변화를 작게 한다.
- 전류실패위험을 작게 한다.
- 인버터를 안정되게 제어할 수 있다.
- 변환용 변압기 용량을 줄일 수 있다.
- 동적 과전압을 낮출 수 있다.

CCC 기술은 제어성능이 우수하고 단락전류 및 장거

리 HVDC 케이블의 방전에 대하여 보호효과가 좋다. 이러한 효과는 케이블 길이가 500km 이상일 때 현저하다. 또한 교류계통과 무효전력 교환에 대한 제어성능이 우수하여 전류실패위험이 현저히 감소하고 동적 상태에서 교류계통과 상호관계가 매우 향상된다. 그러나 재래식 변환기도 이런 성능을 개선할 방법은 있다는 점을 참고해야 한다. 즉 소오각(v)값을 증가시키거나 전류리액턴스값을 줄임으로써 위의 장점을 어느 정도 갖게 할 수 있다. 현재 대용량 변환기에 적용하고 있다.

직렬 커패시터를 가진 HVDC 시스템은 1950년대에 이미 연구되었던 방식이다. 그러나, CCC HVDC 시스템은 직렬 커패시터가 밸브와 변압기 사이에 위치하기 때문에 밸브가 On-Off하는 경우에 밸브에 과전압이 인가되어 경제적인 면 때문에 실용화하지는 못하였다. 1980년대 들어서 ZnO 어레스터의 개발과 Recovery 스너버의 개발은 CCC HVDC 시스템의 실용화에 비전을 제시해 주었고, 1997년 아르헨티나와 브라질 사이에 BTB HVDC 시스템이 처음으로 CCC HVDC 시스템 방식으로 적용되면서 CCC HVDC 시스템의 본격적인 실용화 단계에 이르렀다.

최근에는 캐나다 Manitoba 대학의 Gole 교수는 CCC HVDC 시스템이 처음 CCC HVDC 시스템을 고안할 때 생각했던 것보다 더 많은 장점이 있음을 IEEE에 보고하였으며, ABB사와 Siemens사도 Topology 차원에서 차이는 있지만, CCC HVDC 시스템 방식의 직렬 커패시터를 HVDC 시스템 동작특성과는 무관하게 계통을 제어하는 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor) 방식으로 적용하여 CCC HVDC 시스템의 효율을 극대화하는 연구를 진행하고 있다.

Gole 교수가 기존의 HVDC 시스템보다 CCC HVDC가 더 많은 장점을 가지고 있음을 IEEE에 발표한 내용들을 요약하면 다음과 같다.

① 매우 낮은 무효전력을 필요로 한다.

② SCR이 낮은 계통에 적용이 가능하다.

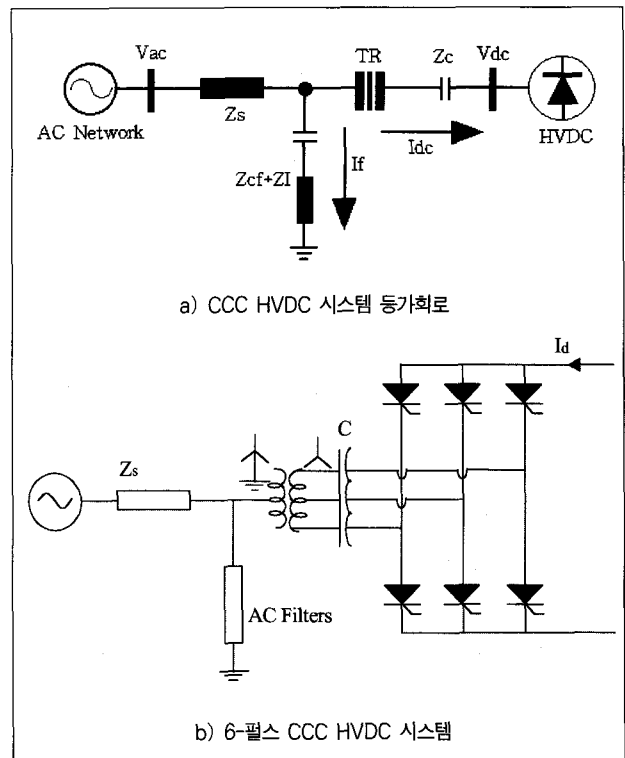
③ 기존의 HVDC 시스템에 비하여 전송전력이 증가한다.

▶ CCC HVDC 시스템의 구성

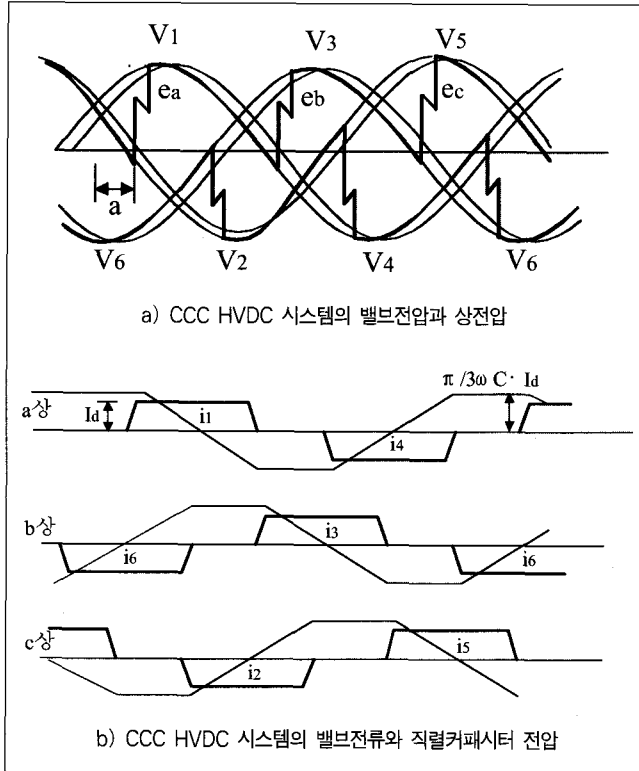
그림 5는 기본적인 6펄스 CCC HVDC 시스템의 결선도를 보여주고 있다. 그림 5 a)에서 CCC 정류 커패시터, Z_c 의 역할은 다음 식에 표현되어 있다.

$$V_{dc} = V_{ac} - Z_s \times (I_f + I_{dc}) - Z_c I_{dc}$$

그림 5에서 보는 바와 같이 CCC HVDC 시스템의 DC전류는 정류커패시터를 통하여 AC계통에 흐르는 것으로, 정류커패시터는 변압기의 2차측과 밸브 사이에 위치함으로써 DC전류를 충방전을 반복하면서 DC전류를 AC계통에 전달하여 준다. 그림 6은 CCC HVDC 시스템



<그림 5> CCC HVDC 시스템 구성



〈그림 6〉 CCC HVDC시스템의 전압과 전류 파형

템의 각 부분에서 전압과 전류 파형을 보여주는 것으로, 그림 6 a)에서 굵은 선은 밸브에 걸리는 전압을 보여주고 있으며 실선은 계통전압을 보여주고 있다. 또한, 그림 6 b)는 CCC HVDC 시스템의 밸브에 흐르는 DC전류와 직렬커패시터에 인가되는 전압을 보여 주고 있다.

그림 6 a)에서 보는 바와 같이 CCC HVDC 시스템은 상전압과 밸브전압 사이에는 차이가 있기 때문에 실제적으로 180°C에서도 소호가 가능하다는 점을 알 수 있고, 이러한 점은 일반적인 HVDC 시스템에서는 생각할 수 없는 것이다. 물론 이러한 점은 일반적인 HVDC 시스템과 비교해서 침투전압이 커진다는 단점을 의미하기도 한다. HVDC 시스템에서 제어범위가 넓어진다는 의미는 제어 영역이 넓어지기 때문에 약한 계통에서도 적용이 가능하다는 것을 의미한다.

다. HVDC 케이블

오늘날 HVDC 케이블은 대부분 또는 유침지 절연 케이블(MI Cable : Mass Impregnated Cable)이 사용되고 있다. 이 케이블은 과거 약 40년 동안 사용되어 왔고 아주 신뢰성이 높지만 제작 공정이 복잡하고 비싸서 다른 적당한 절연물을 개발하기 위해 노력해 왔다. 그 중 하나가 성형폴리머릭 절연케이블(Extruded Polymeric Insulation Cable)이다. 이 기술은 현재 XLPE(Cross Linked Polyethylene) 케이블로서 주로 교류계통에 널리 사용되고 있다. XLPE 케이블은 제작이 쉽고 가격이 비교적 싸다. 그러나 이 케이블을 HVDC 케이블로 사용할 때에는 공간전하 축적이라는 문제점이 있다. 절연물 내에서의 국부적 전하축적은 전계강도를 대폭 증가시키게 되고 절연수명이 단축된다. 최근 매우 고순도의 XLPE 샘플에서 연구한 결과 공간전하 축적은 매우 적고 절연 파괴에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 실제 케이블을 제작할 때는 절연물의 결합을 완전히 제거할 수 없다는 문제점이 있으며 그러한 결합이 장기간 절연성능에 미치는 영향은 연구 중에 있다.

일본전원개발회사는 1997년에 전선메이커 4사(후루가와전공, 스미도모전공, 후지구라, 히다찌전선)와 공동으로 50만V급 직류 CV 케이블의 공동개발에 착수하였으며, ABB사는 1997년 스웨덴 고틀란드 풍력발전소단지에서 Visby라는 도시까지 송전에 HVDC Light(50MW, ±80kV bipolar)와 함께 자체개발한 72km XLPE 지중 케이블을 사용하여 운전중에 있다. ABB사의 경우 XLPE 케이블은 145kV, MI 케이블은 450kV, OF 케이블은 420kV까지 개발되었다고 한다.

최근 HVDC용으로 개발된 케이블 중에는 케이블 바깥 층에 귀로도체를 추가하여 mono-pole 방식에서 대지로 전류가 흐르지 않도록 설계가 가능하게 하였다.

〈다음호에 계속〉