

HVDC 기술동향(Ⅲ)

(HVDC BTB시스템 개요와 설계조건)

이 석 진*, 김 승 규**, 최 영 호**, 김 대 식**

(*한전 송변전처, **한전 광주전력처)

1. 서 론

전세계가 하나의 글로벌시대로 변모해가는 시점에서 전력계통 연계 또한 각국의 새로운 관심사로써 자국내 연계 뿐아니라 국가간의 연계를 통한 전력의 글로벌 시대를 맞이하고 있다. 1970년대까지는 대부분이 장거리 가공송전 및 해저케이블을 이용한 Point to Point 전송방식을 채택하였으나 80년도 접어서부터는 비동기 연계를 목적으로하는 Back-to-Back방식의 연계가 급증하고 있다. 이러한 시점에서 그동안 두차례에 걸친 HVDC 시스템 기술동향 연구에 이어 이번에는 HVDC BTB방식 개요와 설계시 고려할 사항에 대한 기본 개념에 대하여 기술하고자 한다.

우선 HVDC 송전에는 3가지 방식으로 분류되고 있는데 이는 다음과 같다

1. Point to Point 전송방식
2. Back-to-Back 전송 방식
3. Multi-terminal systems 방식

여기서 현재 우리 나라에서 검토되고 있는 전송 방식별 시스템 적용 가능지역을 추론해 보면 다음과 같다.

가. 현재 우리 나라에서 검토되고 있는 PTP HVDC 방식 적용지역

1) 육지와 제주계통간 PTP방식 추가연계

- 목적
 - 제주지역의 부하증대에 따른 추가적인 전력량의 필요성 절감
 - 현지에 발전기를 설치한 경우에 운영비나 유지비가 육지에 비해 너무 고가이므로 적자누적
- 고려사항
 - 고장이나 용량을 고려하여 최적의 HVDC 수전단 위치 선정

- 전압형 HVDC형과 싸이리스터 HVDC형 사이의 타당성 검토
- HVDC 시스템의 운전방식과 기존의 HVDC 사이의 연계 검토

2) 한국과 일본 계통 PTP방식 연계

- 목적
 - 한국과 일본 사이의 침투 전력 사용이 시간에 따라 다르므로 계통의 침투 부하 송/수전
- 고려사항
 - 운전 방식
 - 발전소 인근에 HVDC Site를 건설할 경우에 발전기 터빈의 피로현상 고려

3) 시베리아-한국-일본계통 PTP연계

- 목적
 - 시베리아의 싼 가격의 전력을 중국과 북한을 거쳐 남한에 전력 공급
- 고려사항
 - 정치적인 고려 및 주변 환경 고려

나. 현재 우리 나라에서 검토되고 있는 BTB HVDC 방식 적용지역

1) 남한-북한 계통 연계 BTB HVDC

- 목적
 - 북한의 부족하고 낙후된 전력 사정을 감안하여 남한의 전력을 북한에 공급
- 고려사항
 - 정치적인 고려과 경제성 평가
 - 남·북한 사이의 상이한 주파수와 위상 차를 고려하여 전송방식 고려
 - 남·북한 계통연계 BTB의 고장시 남·북한 계통에 미치는 영향이 최소로 용량 설정
 - 최소 용량의 BTB 기본으로 고장을 고려한 Redundancy Multi-BTB 설계

2) 대구-옥천 계통 연계 BTB HVDC

- 목적
 - 우리 나라 계통의 대규모 계통에 존재하는 저 차 고 조파의 영향을 줄이고 전력 계통의 송전 용량을 높이기 위한 목적
- 고려사항
 - 국부적으로 발전기에 PSS를 설치하거나 FACTS를 설치하여 얻는 효과를 경제성과 연계하여 검토하여야 함

그럼 본론으로 HVDC BTB시스템의 개요 와 설치하기 위한 사전 고려사항에 대하여 보다 자세히 기술한다.

2. 본 론

1. BTB HVDC시스템의 개요

BTB HVDC 시스템은 일반적인 HVDC와 차이가 별로 없으나 PTP (Point-To-Point) HVDC 시스템이 대용량의 전력을 경제성 있게 전송하려는 것이 주된 목적인 데 반해 BTB HVDC는 전력의 주파수나 위상변환 또는 계통의 안정화가 주된 목적이기 때문에 송전선이 없고, 중/소 용량의 전력량만이 전송되어진다. BTB HVDC가 사용되어지는 용도는 다음과 같다.

- 서로 다른 위상을 가진 전력계통의 연계
 - 유럽의 독일-폴란드 HVDC 연계
- 서로 다른 주파수를 가진 전력계통의 연계
 - 일본의 관서지역의 60Hz 전력계통과 관동지역의 50Hz 전력 계통의 연계
- 계통의 단락용량을 높이기 위한 전력 계통 연계
 - 그림1-1과 같이 두 개의 AC계통 사이에 AC 전송라인과 병렬로 HVDC 라인을 설치하여 2개의 AC 계통사이의 전력 전송 용량 증대 및 하나의 AC 계통에 이상이 생겼을 때 HVDC라인을 통해서 이상이 있는 계통의 빠른 고장회복을 위한 동기 화력을 제공.
- 계통 내에 존재하는 Subharmonic을 저감하기 위한 전력 계통 연결

그림1-1은 AC계통의 송전용량을 높이기위한 BTB 연계도이다.

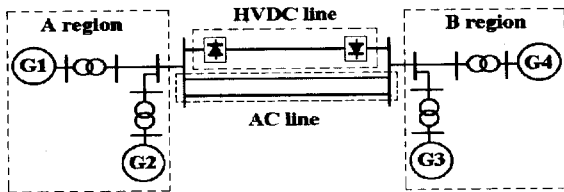


그림 1-1. AC 계통의 송전 용량을 높이기 위한 BTB 연계

2. BTB HVDC 설계시 고려사항

HVDC 시스템을 계획하기에 앞서 고려해야 하는 점은 다음과 같다.

2.1 수전단과 송전단의 SCR(Short Circuit Ratio)확인

SCR은 계통의 단락 용량을 결정하는 하나의 중요한 요소로써 단락용량 수준(SCL)를 DC전력으로 나눈 수치로 표시한다. SCR의 크기에 따라 HVDC 시스템의 AC 강도가 결정되고 HVDC 시스템의 안정적인 운전 여부를 결정하기에 송전 단과 수전 단의 SCR을 확인하는 것이 HVDC 시스템의 설계에 기반이 된다.

다음은 SCR에 따라 AC 강도를 표현한 것이다. 이러한 SCR도 무효전력 보상용 콘덴서를 SCR에 포함한 ESCR (Effective Short Circuit Ratio)를 새로운 계통강도의 척도로 사용하는데 HVDC 시스템에 필요한 콘덴서는 HVDC 시스템에서 발생하는 무효전력은 DC 전력의 60%에 해당되기 때문에 SCR에서 0.6(p.u)를 뺀 값이 ESCR이 된다. 즉, SCR이 3.6(p.u)인 경우에서 ESCR은 3.0(p.u)정도가 된다. 본표는 일반적으로 계통의 강도를 결정하는 표시하는 척도이다.

ESCR	Definition
≥ 2.5	High
1.5 ~ 2.5	Low
≤ 1.5	Very Low

다음 수식은 SCR을 구하는 공식을 보여 주고 있다.

$$\begin{aligned}
 SCL(\text{Short Circuit Level}) &= \frac{E_{ac}^2}{Z_{ac}} \\
 SCR &= \frac{\text{Short Circuit Level, SCL(MVA)}}{\text{DC Power, } P_d(\text{MW})} \\
 &= \frac{MVA(SCL)}{P_d} = \frac{E_{ac}^2}{P_d \cdot Z_{ac}} \\
 &= \frac{1}{Z_{ac}} Z_{base} = \left(\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_l} \right) Z_{base} \\
 ESCR &= \frac{SCL - Q_c}{P_d} \\
 &= \frac{1}{Z_e} Z_{base} \\
 &= \left(\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_l} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_c} \right) Z_{base}
 \end{aligned}$$

여기서, Z_s 는 계통의 등가 임피던스, Z_l 은 선로의 등가 임피던스, Z_f 와 Z_c 는 필터와 콘덴서 뱅크의 등가 임피던스 그리고 Z_{base} 는 기준 용량의 기준 임피던스를 보여 주고 있다.

다음 수식은 AC 계통과 콘덴서 사이의 공진 점을 확인하는 수식으로 SCR이 작을수록 AC 계통의 기본 주파수에 가까워져 시스템이 공진할 가능성이 높다. 만약에 SCR이 2.5(p.u)라면 AC 계통과 연결된 HVDC 시스템의 공진 주파수는 기본파의 2배가되기 때문에 계통에 불안정성이 생길 수 있는 가능성이 크다.

$$Q_C \approx 0.6P_d = \omega_o C E_{ac}^2,$$

$$C = \frac{0.6 \cdot P_d}{\omega_o \cdot E_{ac}^2}$$

$$L = \frac{Z_{ac}}{\omega_o} = \frac{E_{ac}^2}{\omega_o \cdot (SCR \cdot P_d)}$$

$$\omega_r (\text{Resonant freq.}) = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_o \sqrt{\frac{SCR}{0.6}}$$

$$\omega_r = \omega_o \sqrt{\frac{SCR}{0.6}} \approx 2 \cdot \omega_o$$

(If SCR is 2.5)

이상에서 보는 바와 같이 SCR은 HVDC 시스템에 많은 영향을 미치고 있기 때문에 SCR의 확인은 HVDC 시스템을 설계하는 데 있어서 필수적인 절차라 할 수 있다. SCR은 기준 용량에 대한 상대적인 임피던스로서 SCR이 2.0(p.u) 라는 의미는 HVDC 시스템이 공급하는 전력은 AC 계통이 견딜 수 있는 용량에 50(%)라는 의미로써 기준 용량이 50% 줄어든다면 SCR은 2배가 증가하여 4.0(p.u)가 된다.

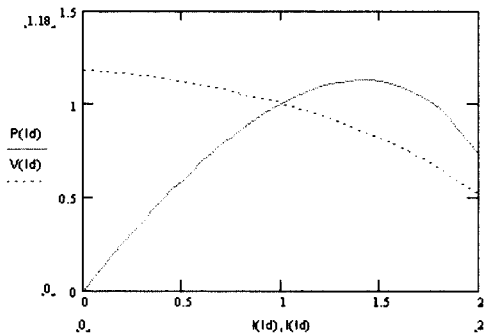


그림 2-1. HVDC 시스템의 최대 송전 전력과 AC 전압

SCR을 검토하는 또 하나의 이유는 HVDC가 포함된 AC 계통의 조류계산을 해보면 HVDC 시스템의 최대 송전 용량은 그림2-1와 같이 된다. 이 그림에서 보는 바와 같이 DC 전류가 변함에 따라 HVDC 시스템의 최대 송전 전력 곡선이 그려지며 그림2-1에서 보여 지는 점선은 DC 전류가 변함에 따라 무효전력 소비에 따른 AC 계통 전압의 전압강하 특성을 보여 주고 있다.

이 그림에서 점선은 HVDC DC 전류가 갑자기 0(零)으로 떨어지면 AC 전원 측에 발생하는 과 전압의 크기를 보여 준다. PTP와 달리 BTB에서는 HVDC 시스템이 갑자기 탈락되어도 계통에 영향이 작아야 하기 때문에 "AC 계통에서 발생하는 과 전압이 전력 회사의 계통 운영 규정 값 이내가 되도록 HVDC 시스템의 용량을 선정"한다.

2.2 SCR과 동기화력을 고려한 HVDC 시스템의 용량 결정.

BTB 시스템의 용량은 BTB HVDC 시스템을 어떤 목적으로 사용할 것인가에 따라 달라 질 수 있다. 즉, 서로 다른 위상을 가진 전력 계통의 연계나 서로 다른 주파수를 가진 전력 계통의 연계 그리고 계통 내에 존재하는 Subharmonic을

저감하기 위한 전력 계통 연결 그리고 계통의 고장용량을 높이기 위한 전력 계통 연계 등은 Bulk 에너지를 고정적으로 제어하는 PTP와 달리 순시 피크 전력제어를 위한 경우가 많기 때문에 용량의 결정은 계통을 PSS/E와 같은 프로그램으로 검토한 후 결정해야 한다. BTB HVDC 시스템의 목적 중에서 기저 전력을 공급하는 것을 제외하고 2개의 계통을 연계하는 경우와 계통의 저 차 고조파를 제거하기 위한 방법으로 크게 나눌 수 있는데 각각의 경우에 용량 계산은 다음과 같다.

* 계통 연계 BTB HVDC 시스템 경우

그림 2-2는 계통 연계형 BTB HVDC 시스템의 단결선도를 보여 주고 있다. 이 경우의 HVDC 송전용량은 2개의 계통이 같은 전력 각도를 유지하며 운전되어야 하기 때문에 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

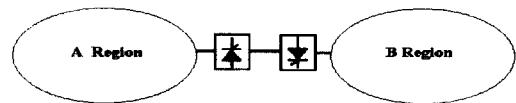


그림 2-2. 계통연계형 BTB HVDC 시스템

다음 수식은 같은 전압과 같은 주파수로 운전되는 2개의 계통을 연계한 것으로 2개의 AC 계통이 같은 전력 각을 가지며 운전하기 위한 필요 전력을 보여 주고 있다. 이때의 P_{syn} 를 동기화력이라 부를 수 있다.

$$P_{syn} = \frac{V_S V_R}{X_{SR}} \sin(\delta_A - \delta_B)$$

계통을 연계하기 위한 BTB HVDC 시스템의 용량을 결정하려는 경우에는 2개의 계통사이의 상차 각이 0(零)이 되기 위해 필요한 전력량을 BTB HVDC 시스템의 용량으로 산정 할 수 있다.

만약에 2개의 계통이 다른 주파수와 다른 전압, 그리고 다른 전력 각을 가지고 운전된다하더라도 위 수식과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, AC 계통의 주파수는 유효전력에 관계되고 AC 계통의 전압은 무효 전력에 관계된다. 그리고 전력 각은 부하 량에 관계되기 때문에 상이한 2개의 계통의 전력 각이 일치되도록 하는데 필요한 전력량이 BTB HVDC 시스템의 송전 용량이 된다. 또한 점두 부하를 교환하는 HVDC 시스템은 점두 부하만큼의 전력량이 BTB HVDC 시스템의 송전 용량이 된다. "BTB HVDC 시스템의 송전 전력 결정은 계통을 연계하는데 필요한 동기화력과 앞 절에서 논한 SCR의 강도를 고려하여 결정" 하여야 한다.

* 참고적으로 남한의 AC 전력 계통과 북한의 AC 전력 계통을 연계하기 위해서 HVDC 시스템을 이용하려는 방안은 전력의 공급 관점에서는 PTP HVDC 시스템의 형태와 제어 알고리즘을 가지고 있으며, HVDC 시스템의 하드웨어 구성은 BTB HVDC 시스템의 형태를 가지는 특이한 경우라 할 수 있다.

2.3 HVDC 시스템의 DC 전압 결정

HVDC 시스템의 DC 전압은 HVDC 시스템을 설계하는데 있어서 경제성과 관련된 아주 중요한 요소이다. HVDC 시스템의 DC 전압은 AC 계통의 AC 전압과 마찬가지로 높으면 높을수록 효율이나 전송 능력이 높아지나 변압기나 케이블과 같은 주변 기기의 절연레벨과 가격이 증가하는 관계로 무작정 높일 수가 없다. HVDC 시스템의 DC 전압을 높이는데 있어서 제약 요소 중에서 싸이리스터 문제를 고려하면 다음과 같다.

현재까지 개발된 싸이리스터의 정상상태 최대 전류용량은 3000[A]이다. 싸이리스터는 반도체 소자로 만들어 졌기 때문에 싸이리스터의 전류 정격이 6000[A]라 하더라도 열이나 순시 피크 전류에 약하기 때문에 자기 정격의 1/3규격으로 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 동일한 용량에서 낮은 DC 전압과 높은 DC 전류로 HVDC를 운전하는 경우에는 HVDC의 밸브가 기본적으로 직렬로 연결되어 있는 상태에서 새로이 추가적인 병렬 밸브를 기존의 밸브에 추가해야 한다. 이는 병렬 밸브 사이의 순환 전류뿐만 아니라 전류 불평형을 유발할 수 있기 때문에 기술적으로 대단히 어려운 것이다. 따라서 HVDC 시스템의 밸브는 2 병렬 이상은 사용하지 않는다. 즉, 한 Pole 당 3000[A]를 넘지 않는다. 이러한 이론적인 계산보다도 실제의 PTP HVDC 시스템에서는 케이블이나 가공선로의 선로 손실을 줄이기 위해서 정격 전류를 2500[A]이하로 억제한다.

표 1은 일반적으로 DC 용량과 DC 용량에 적당한 DC 전압을 결정하는 Table을 보여준다. DC 용량 400[MW]이하에서는 일반적인 DC 전압이 결정되지 않는데 이는 싸이리스터 밸브의 직렬 개수와 송전선로를 포함하는 HVDC 시스템의 절연 레벨에 따른 경제성과 HVDC 시스템에서 소비되는 손실 량에 따른 경제성이 명확히 비교되지 않기 때문에 제작사나 전력회사의 독자적인 결정에 따르기 때문이다.

표 1. 일반적으로 많이 사용하는 HVDC DC용량과 DC전압

용량 [MW]	AC 전압 [kV]	DC전압(kV) (PTP)	DC전압(kV) (BTB)
200	115	-	2 x 60
400	115-230	-	2 x 80
500	230-345	±250	2 x 100
1000	345-500	±400-500	2 x 150
1500	345-500	±500	-
2000	500	±500-600	-
2500	500	±500-600	-
3000	500	±600	-

표 1에서 특이한 점은 BTB에서는 대지 케환(Earth Return)이라는 개념이 존재하지 않기 때문에 Negative Voltage 개념이 존재하지 않고, 송전선로가 없기 때문에 송전선에서

소비되는 저항손실을 고려할 필요가 없기 때문에 DC 전압이 PTP에 비하여 작아도 된다. 여기서, DC 전압이 작아도 된다는 점은 HVDC 시스템 밸브의 싸이리스터 직렬 연결 개수와 주변 장치의 절연 레벨이 줄어든다는 점으로써 동일한 용량에서 송전선로의 가격을 빼고도 PTP HVDC에 비해 BTB HVDC의 제작비가 작아지는 이유가 여기에 있다 (보고서에 의하면 PTP에 비하여 BTB의 제작비용은 20% 절감되는 것으로 보고되고 있다). 또한 위에서 언급한 것 같이 BTB의 목적은 Bulk 에너지의 전송이 아니라 계통이 흔들릴 때 흔들리는 만큼의 전력을 가감하는 작용이나 AC 계통 사이의 침투 부하를 교환하는 역할을 하기 때문에 1500[MW]를 넘는 대용량 BTB HVDC 시스템은 없다.

2.4 HVDC 밸브 및 주변장치 용량결정

HVDC 시스템의 용량과 DC 전압이 결정되면 DC 전류가 결정되고, HVDC 시스템에 필요한 필터나 변압기 그리고 제어 각도가 결정되어 진다. BTB HVDC 시스템의 용량은 AC 계통 용량에 비하여 작기 때문에 필터나 콘덴서 뱅크를 이용한 무효전력 보상장치 이외에는 별도의 무효전력 보상 장치의 필요성이 없다.

다음 수식은 HVDC 시스템의 용량과 DC 전압 그리고 DC 전류가 결정된 상태에서 HVDC 시스템의 AC/DC 변압기, 필터 그리고 밸브의 용량을 결정하는 방법을 보여 주고 있다.

* AC 계통 등가 모델

AC 등가 모델을 구하는 방식은 다음과 같다. 우선 AC 계통의 SCR과 DC 송전 전력 그리고 DC 전압이 구해지면 다음과 같은 수식에 의하여 AC 등가 모델이 구해진다. 여기서, AC 계통의 3상 전압은 특별히 고려할 필요는 없으나 우리가 구하고자 하는 DC 전압이상이 되어야 하는 것은 당연하다.

$$Z_s = \frac{V_t^2}{(P_{dc, rated} ESCR - Q_f)} \angle \delta^\circ$$

$$X_c = L_g \frac{V_{ll}^2}{T_{rMVA}}$$

$$V_{dc} = 1.35 V_{ll} \cos(\gamma) - \frac{3}{\pi} X_c I_d$$

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = P_{ac}$$

$$\cos(\phi) \approx (-\cos(\gamma)) + \frac{X_c I_d}{\sqrt{2} V_l}$$

$$I_l = \frac{P_{ac}}{\sqrt{3} V_l \cos(\phi)} \angle \phi$$

$$I_{conv} = \frac{Pole \text{ 갯수} \times I_l}{n} \quad (\text{Bipole 인 경우는 } 4,)$$

필터에 흐르는 전류의 크기와 위상은 다음과 같다.

$$I_f = \frac{Q_f}{\sqrt{3}I_f} \angle 90^\circ$$

$$Z_{filt} = \frac{V_{II}}{\sqrt{3}I_f}$$

여기서, L_g : AC/DC용 변압기 누설 인덕턴스, V_t : AC 계통의 선간 전압, V_{II} : AC/DC용 변압기 2차 측 전압, Tr_{MVA} : AC/DC용 변압기 용량, n : 변압기 변압비.

결론적으로 AC계통으로 들어가는 전체 전류와 테브난 전압(E_t)과 전력 각은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} I_{sys} &= I_{conv} + I_f \\ E_t &= V_t + \sqrt{3} Z_{sys} I_{sys} \end{aligned}$$

결론적으로 부하가 탈락된 경우의 과 전압 비율은 다음과 같이 구해진다.

$$V_{II} = E_t \frac{Z_{filt}}{Z_{filt} + Z_{sys}}$$

$$\text{Overvoltage}[\%] = \frac{|V_{II}| - |V_{base}|}{V_{base}}$$

2.4.1 HVDC 필터 값 선정

• 최적의 필터 값 계산

다음은 BTB HVDC 시스템의 최적의 콘덴서 뱅크를 설계하는 기준이다. PTP의 필터는 고조파 제거와 무효전력 공급이라는 2가지의 목적을 충족시켜야 하지만 BTB의 필터는 고조파를 제거하는 것이 고조파를 제거하는 것이 최우선 목표이기 때문에 경제성을 고려하는 것이 최우선 과제라 할 수 있다. 따라서, 콘덴서의 가격과 리액터의 가격이 주어지면 이때의 최소 비용이 되는 콘덴서와 리액터 용량을 구하는 방법은 다음과 같다.

$$K = A \cdot S + \frac{B}{S}$$

$$A = U_c + \frac{U_L}{h^2}$$

$$B = \frac{V_1^2 \cdot I_{hf}^2 \cdot (U_c + U_L)}{h}$$

여기서,

K = Cost in k\$, S = Size in VAR,

U_c = Unit cost of capacitor in \$/kVAR

U_L = Unit cost of inductor in \$/kVAR

h = 고조파 차수

예제) 다음 예제는 캐나다의 Manitoba에서 사용하는 BTB 필터의 용량 계산법을 예제로 풀어 본 것이다.

$$U_c = 10(\$/kVAR), U_L = 25(\$/kVAR),$$

$$h = 11차, V_1 = 230(kV),$$

$I_{hf} = 268.57(A)$ 라고 한다면 이때의 최적의 필터 용량을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= U_c + \frac{U_L}{h^2} = 10000 + \frac{25000}{(11)^2} \\ &= 10206.61 \$/MVAR \end{aligned}$$

$$|Y_h| = |Y_{hf}| \cdot \cos\left[-\frac{\phi_m}{2}\right]$$

(여기서, $|Y_h|$ 는 고조파에 대한 필터와 계통의 병렬 어드미턴스, $|Y_{hf}|$ 는 필터의 어드미턴스, ϕ_m 은 임피던스 각도).

$$\frac{|Y_{hf}|}{|Y_h|} = \frac{1}{\cos\left[-\frac{\phi_m}{2}\right]} = \sec\left[\frac{75^\circ}{2}\right] = 1.2604$$

따라서 $I_{hf} = I_h \times 1.2604 = 338.525A$ 이고, B 값은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\begin{aligned} B &= \frac{V_1^2 \cdot I_{hf}^2 \cdot (U_c + U_L)}{h} \\ &= \frac{\left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times 338.525\right)^2 \times (10000 + 25000)}{11} \\ &= 6.429 \times 10^6 \$ \cdot MVAR \end{aligned}$$

필터의 사이즈(S)에 대한 가격의 최적을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{dK}{dS} = A - \frac{B}{S^2} = 0$$

$$S_{min} = \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{\frac{6.429 \times 10^6}{10.206 \times 10^3}} = 25.099[MVAR]$$

필터에 대한 최소 비용 결정방법은

$$\begin{aligned} K_{min} &= A \cdot S_{min} + \frac{B}{S_{min}} = (10206.61) \cdot (25) + \frac{(6429708)}{(25.099)} \\ &= \$512,349.59(\text{perphase}) \end{aligned}$$

필터구성요소들의 값은 다음과 같이 계산될 수 있다:

$$S = \frac{V_1^2}{X_c}, X_c = \frac{1}{\omega_1 \cdot C}$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{S_{min}}{\omega_1 \cdot V_1^2} = \frac{25.099 \times 10^6}{(120\pi) \cdot \left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= 3.776 (\mu F) \end{aligned}$$

그리고 공진 점은 $h \omega_1 L = \frac{1}{h \omega_1 C}$ 이므로

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{(h \omega_1)^2 C} = \frac{1}{(11 \times 120\pi)^2 \cdot (3.776 \times 10^{-6})} \\ &= 0.0154 (H) \end{aligned}$$



최종적으로

$$R = \frac{1}{Q_o} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{(21.72)} \cdot \sqrt{\frac{0.0154}{(3.776 \times 10^{-6})}}$$

$$= 2.94 [\Omega]$$

2.4.2 싸이리스터 개수 산정

BTB에서 DC 전압은 PTP에 비하여 전압 레벨이 작아지는 경향이 있으며 일단 DC 전압이 결정되고, 정상상태 점 곱각이 결정되어지면 싸이리스터의 레벨이 결정된다.

그러면 이때의 싸이리스터의 개수를 결정하는 방법은 다음과 같다.

랙티파이어 밸브의 어레스터 레벨을 "RAL"로 표기하고, 인버터 밸브의 어레스터 레벨을 "IAL"로 표기하기로 하자. 그리고 밸브의 DC 전압을 Vd라 표기하면, 싸이리스터 개수를 결정하는 방법은 다음과 같다.

- 력티파이어 밸브 절연 레벨(RVIL: Rectifier Valve Insulation Level)
= RAL x 1.15
- 인버터 밸브 절연 레벨(IVIL : Inverter Valve Insulation Level)
= IAL x 1.15

여기서, 1.15라는 계수는 스위칭과 낙뢰에 의한 과 전압을 고려한 계수이고 1.15는 제작사에서 실험을 거쳐 사용하는 일반적인 계수이다.

○ Rectifier

- 밸브 하나의 싸이리스터 개수

$$\frac{RVIL}{V_d} \times 0.95 \times 1.03$$

- 력티파이어에서 싸이리스터 개수

$$\text{밸브 하나의 싸이리스터개수} \times 6 \text{ Valve} \times 4 \text{ Group}$$

○ Inverter

- 밸브 하나의 싸이리스터 개수

$$\frac{IVIL}{V_d} \times 0.95 \times 1.03$$

- 력티파이어에서 싸이리스터 개수

$$\text{밸브 하나의 싸이리스터개수} \times 6 \text{ Valve} \times 4 \text{ Group}$$

여기서, 0.95는 싸이리스터 밸브의 스너버에 의해서 발생되는 불 균일한 전압을 고려한 계수이며, 1.03은 Redundancy를 고려해서 안정한 동작을 하게 하기 위한 계수이다.

2.4.3 DC 리액터

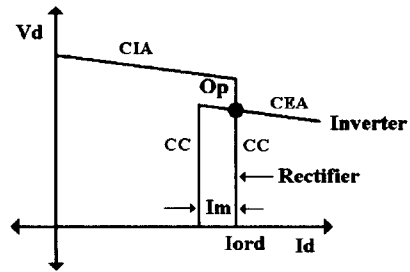
PTP는 선로 자체가 리액턴스와 콘덴서를 가지고 있지만

BTB는 선로가 없기 때문에 전류의 오버슈트에 대한 문제에 취약할 수 밖에 없다. 그래서 BTB에서는 DC 리액터의 설치가 필수적이며 전류의 과도 현상과 HVDC 시스템의 안정성을 고려하여 선정해야 한다.

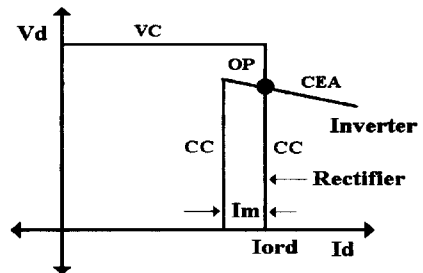
2.5 HVDC 시스템의 제어기 형태 결정

2.5.1 HVDC 전압/전류 특성 곡선

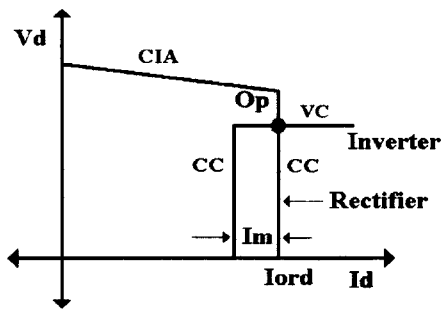
HVDC 시스템에서는 컨버터 측에서 만들 수 있는 제어기의 종류는 α_{min} 제어기, 전류 제어기, 전압제어기이며, 인버터 단에서는 γ_{min} 제어기, 전류 제어기, 전압 제어기가 있을 수 있는데 양쪽에 전류 제어기는 필수적으로 존재해야 하기 때문에 전류 제어를 제외한 나머지 제어기의 선택이 중요한 요소가 될 수 있다. 대규모 계통을 계통에 비해 소용량인 HVDC 시스템으로 연계하는 BTB에서는 전류 제어기 이외의 제어기의 선택은 경제성과 효율만 고려하면 된다. 예를 들어 인버터 단이 가질 수 있는 제어기 중 γ_{min} 제어기, 전류 제어기 그리고 전압 제어기 중에서 전압제어기의 안정도가 가장 좋은 반면 시스템의 정격이 커진다는 단점을 가지고 있기 때문에 안정도를 우선할 것인지 아니면 효율을 우선할 것인지는 제작사와 전력회사의 선택에 달려 있다. 그리고 전력을 보내는 력티파이어 단보다는 전력을 받는 인버터 단이 안정도 문제에 취약하기 때문에 정상상태에서 전류 제어권은 력티파이어 단에 있는 것이 일반적이다. 그림 2-3는 BTB에서 가질 수 있는 전압/전류 제어특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 γ_{min} 제어기와 α_{min} 제어기는 시스템의 효율을 고려한 것이고 전압 제어기는 시스템의 안정도를 고려한 결과이다.



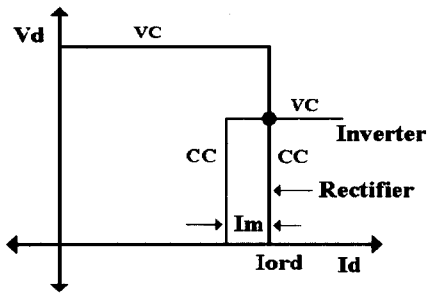
(a)



(b)



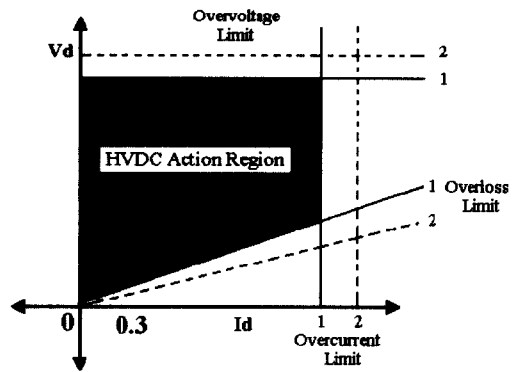
(c)



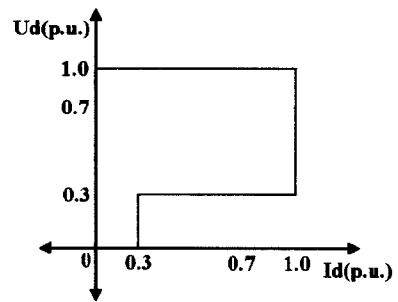
(d)

그림2-3. BTB에서 가질 수 있는 전압/전류 특성 곡선

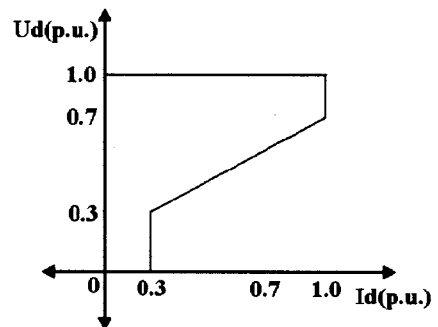
그림2-3에서 보여주는 전압/전류 특성 곡선은 실제로 그림2-4 a)와 같이 여러 가지 요소에 의하여 제한을 받는다. 첫 번째로 싸이리스터와 HVDC Arrester가 견딜 수 있는 전압과 전류의 제한기에 의해 제한을 받고, 두 번째로 동일한 용량의 전력을 송전하려는 경우에 대 전압 저전류 형태가 이상적이며 저전압 대 전류 형태의 전력 전송은 케이블이나 송전선로의 손실을 유발할 수 있기 때문에 바람직하지 않다. 따라서 그림2-4 a)와 같이 Overloss limit에 제한을 받는다. HVDC 시스템의 실제적인 동작 영역은 그림 2-4 a)의 검은색 부분이 된다. 그림2-4 b)와 그림2-4의 c)는 Overloss Limit를 고려한 HVDC 시스템의 VDCL(Voltage Dependent Current Limit)의 전압/전류 특성 곡선으로 그림2-4 b)와 같은 Bang-Bang 타입과 그림 2-4 c)와 같은 Ramp 형태가 있다. 각각의 특성을 고려하면 Bang-Bang 타입은 AC 계통의 고장 시에 빠른 속응성을 가지고 있는 반면 많은 고조파를 발생시키며 AC 계통을 더욱 불안하게 하는 단점을 가지고 있기에 SCR이 큰 경우나 BTB HVDC에서 많이 사용되고 있다. 반면에 그림 2-4 c)는 AC 계통이 고장이 생긴 경우에 속응성은 그림2-4 b)의 경우보다 떨어지나 고조파의 함유율과 과전압과 과전류의 발생이 작기 때문에 많은 PTP HVDC 시스템의 주된 VDCL로 채용되고 있다. 그림2-4 c)의 전류 제한 값(0.3)은 HVDC 시스템의 전류가 0.3[p.u.]이하가 되는 경우에는 전류의 불연속 현상이 발생하기 때문에 이를 막기 위해 채택된 제한 값이며, Ramp 함수의 기울기는 AC 계통의 시정수와 HVDC 터미널에 연결된 발전기의 응답 특성을 고려하여 결정된다.



a) HVDC 동작 영역



b) Bang-Bang Type VDCL



c) Ramp Type VDCL

그림2-4. HVDC 시스템의 수정된 전압/전류 특성 곡선

2.5.2 HVDC 시스템의 제어기 설계

HVDC 시스템은 렉티파이어 단과 인버터 단에 여러 개의 제어기를 동시에 가지고 있으며 AC 계통 조건에 따라 제어기가 선택되어진다. 따라서 각각의 제어기는 각각의 피드백 루프를 가지고 있기 때문에 제어기의 계인을 설계하는 것이 중요하다. HVDC 시스템의 제어기를 설계하는 기준은 다음과 같다.

- 1) 전류 제어기의 계인은 전류의 단위 입력 당 최대 오버슈트는 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$|T| = \left| \frac{FGP}{1 + GPH} \right| \leq 0.1[\text{dB}]$$

위 식은 주파수영역에서 해석된 것으로 시간 영역으로

바꾸어 해석하면 제어기의 제동 계수(ξ)는 $0.652 < \xi < 1$ 이 된다. 따라서 제동계수(ξ)의 최대 오버슈트는 6.7(%) 이 된다.

2) 전류 제어기의 응답은 정상상태의 95(%)를 40(ms)안에 도달해야 한다. 이것은 주파수 영역에서 해석하면 $\left| \frac{FGP}{1 + GPH} \right|$ 의 크기가 -3(dB) 이상이 되어야 하며 시간 영역에서 이 값을 해석하면 자연 주파수(ω)는 68(rad/s)가 된다.

2.5.3 고조파 공진에 대한 대책

HVDC 시스템의 제어기 설계는 Motor를 제어하던가 아니면 일반적인 컨버터를 제어하는 방법과 같다. 그러나 HVDC 시스템은 용량이 워낙 대용량이기 때문에 HVDC 시스템에서 발생하는 고조파나 전압/전류왜곡은 계통에 심각한 영향을 줄 수 있기 때문에 이것에 대한 대책을 고려해야만 한다. HVDC 시스템의 고조파 공진 문제를 억제하는 방법 중에 하나로써 제어기의 피드백 신호에 Band-Pass 필터를 설치하여 공진 주파수를

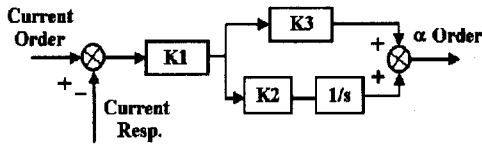


그림 2-5. 일반적인 전류 제어기

제거한 피드백 신호를 제어기에 인가하는 방법이 보고되고 있다. 이러한 방법은 HVDC 시스템의 공진을 완전히 해결할수 있는 방법은 아니지만 하나의 보조적인 수단일 수 있기 때문에 대부분의 HVDC 시스템에 채용되고 있다. 그림2-6과 2-7은 공진을 절감시키는 수정된 전류제어기의 블록도를 보여 주고 있다. 그림2-7의 수정된 전류제어기는 아직 성능이 검증되지 않은 면이 있기 때문에 그다지 많이 사용되고 있는 것 같지는 않다.

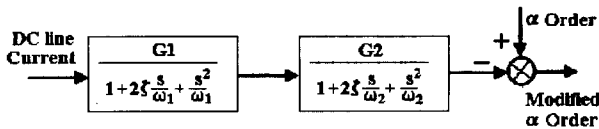


그림 2-6. 수정된 전류 제어기(1)

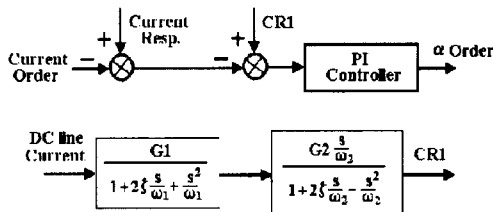


그림 2-7. 수정된 전류 제어기(2)

2.5.4 HVDC 시스템의 제어기 구성

HVDC 시스템의 구성은 일반적으로 그림 2-8과 같은 구성으로 되어 있으며 각각의 기능은 다음과 같다.

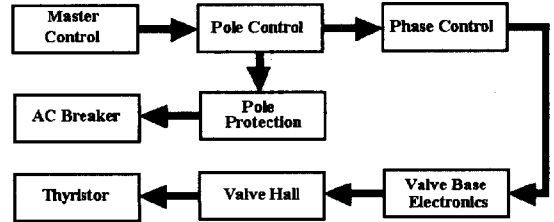


그림 2-8. HVDC 시스템 구성도

○ Master Control

- 주파수 제어나 정전력 제어와 같은 운전 모드를 결정하고, 각각의 운전 모드에 따른 지령 값을 설정한다.

○ Pole Control

- HVDC시스템의 실질적인 운전모드에 대한 실행 알고리즘을 내장하고 이를 실행한다.
- VDCL이나 Pole사이의 전류 오차 제거루프를 가지고 있다.

○ Phase Control

- 컨버터 구동 알고리즘을 내장하고 있다.
- 등간격 펄스 방식이 내장되어 있다.

○ Protection Control

- HVDC 시스템의 보호회로

○ VBE(Valve Based Electronics)

- 밸브보호 및 싸이리스터 점호신호 발생

BTB HVDC 시스템에서도 그림2-8과 같은 일반적인 HVDC 시스템의 제어기구성과 동일한 제어구조를 가지고 있으나 PTP HVDC는 각 변환소에 각각의 제어기를 가지고 필요하면 서로 통신선을 연결하여 정보를 공유하는데 비해 BTB HVDC 시스템은 하나의 변환소에 모든 제어기와 싸이리스터 밸브를 가지고 있다. BTB HVDC 시스템의 제어기 구조는 PTP와 크게 다르지 않고 양쪽 계통의 주파수 오차를 입력 값으로 갖는 주파수 제어기와 일정전력을 송전하는 정 전력 제어기로 구성되어 있고 이를 실행하는 Pole제어기나 Phase 제어기 그리고 보호회로나 VBE의 구성은 같다.

2.6 환경과 계통상황을 고려하여 제어기의 파라미터 결정

위에서 논한 여러 문제 중에서 BTB에서 고려해야 하는 문제를 고려하면 다음과 같다.

전류/전압 특성 곡선은 이론적인 특성 곡선을 보여 주고 있는 것이기에 전압이 줄어든 경우에 HVDC 시스템과 AC



계통의 충격을 고려한 VDCL(Voltage Dependant Current Limit)를 고려해야 하며 AC 계통에서 생기는 고조파 문제를 해결하기 위해서 전류 피드백회로의 개선을 추가적으로 고려해야 한다. 또한 HVDC 시스템이 AC 계통과 연결된 터미널의 단자 모선에 발전기나 동기조상기를 추가한 경우에는 동기조상기의 여자 시스템이나 발전기의 터빈에 스트레스가 누적 될 수 있다.

3. 결 론

HVDC BTB시스템은 계통에 필수적인 시스템이거나 AC 계통을 대신할 수 있는 시스템은 아니다. 그러나 AC 계통으로 해결이 곤란하거나 가격적인 면에서 우위를 가지고 있기 때문에 앞으로 HVDC 시스템이나 FACTS와 같은 DC 개념의 전력 전송이나 운영 개념이 우리 나라 계통에 많이 도입될 것으로 사료된다. 앞으로 HVDC 기술동향을 통하여 HVDC 기술을 많이 전파하는 계기가 되었으면 한다.

REFERENCES

[1] Se Il kim, Suk Jin Lee, J L Haddock, M H Baker, 'System Design Characteristics for 300 MW Submarine Link to Cheju', CIGRE Regional meeting, Australia, October 1993.

[2] J L Haddock, F G Goodrich, Se Il Kim, "Design Aspects of Korean Mainland to Cheju Island HVDC Transmission", Power Technology International (Annual, Sterling Publication Ltd, London), 1993

[3] B R Andersen, M H Baker, "HVDC Converter Station Design, with particular reference to the 2000 MW HVDC Link Between Great Britain and France", GEC Review, London, 1987.

[4] L Haddock, C A Brough, "The Application of Transputers to HVDC and SVC Control", CIGRE SC14 International Colloquium, New Zealand, Sept 1993.

[5] R P Burgess, L D Ainsworth, H L Thanawala, et al, "Voltage/Var Control at McNeil Back-to-Back HVDC Converter Station", CIGRE Report 14-104, Paris, 1990.

[6] 1996 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc

[7] 직류송전의 현황과 운용기술, 한국전력 계통운용처, 1992

[8] HVDC 변환이론과 구성, 한국전력 광주전력처, 1999.

저 자 소개

이석진(李錫珍)

1957년 8월 4일생. 서울대학교 전기공학과 졸업. 한전 청원 전력소장 역임. 現 한전 송변전처 송변전기술팀장

김승규(金勝奎)

1953년 7월 4일생. 명지대학교 전기공학과 졸업. 전남대학교 산업대학원 석사과정 졸업. 한전 광주전력처 순천전력소장 역임. 現 한전 광주전력처 변전운영부 부장

최영호(崔永鎭)

1949년 2월 15일생. 한전 전남지사 전력계통보호과장. 한전 신광주전력소 변전부장 역임. 現 한전 광주전력처 신강진전력소장

김대식(金大植)

1959년 9월 22일생. 전남대학교 전기공학과 졸업. 조선대학교 산업대학원 학사과정 재학. 한전 신강진전력소 변환과장 역임. 現 한전 광주전력처 변전운영부 과장