

AC 계통 무효전력 제어를 위한 HVDC 시스템 설계

HVDC System Design for AC Network Reactive Power Control

최 순 호[†] · 최 장 흠^{*} · 김 찬 기^{*}

(Soon-Ho Choi · Jang-Hum Choi · Chan-Ki Kim)

Abstract - This paper deals with the concept design of HVDC system for controlling AC network reactive power. HVDC system can control active power and reactive power and the control concept of reactive power is similar to SVC(Static Var Compensator). Reactive power is controlled by adjusting firing angle of HVDC system under the condition that AC filters are switched. Reactive power depends on AC voltage condition, considering the steady-state and transient state to maintain the stable operation of AC network in the viewpoint of voltage stability. Therefore, in the design stage of HVDC, the reactive power required in the AC network must be considered. For the calculation of operation angle in HVDC system, the expected reactive power demand and supply status is examined at each AC system bus. The required reactive power affects the determination of the operation angle of HVDC. That is, the range of "control deadband" of operation angle should have the capability supplying the required reactive power. Finally, the reactive power control concepts is applied to 1GW BTB Pyeongtaek-Dangjin HVDC system.

Key Words : Reactive power, HVDC system, Voltage stability

1. 서 론

HVDC 컨버터는 AC를 DC로 변환하여 송전하는 렉티파이어와 DC를 AC로 변환하여 계통에 전력을 공급하는 인버터로 구분된다. 렉티파이어 및 인버터에서는 사이리스터 밸브를 이용하여 DC 전압 및 전류를 제어하고 이 때, 사이리스터 점호 지연각에 따라 AC 전압 및 전류에 위상차이가 발생한다. 이로 인해 HVDC의 운전시 유효전력의 50~60%에 해당하는 무효전력이 렉티파이어와 인버터단 각각에서 흡수되는 구조를 갖는다. 본 논문에서는 HVDC 시스템이 연계된 AC 계통의 무효전력 문제를 검토하고, HVDC 시스템에서 무효전력을 제어하는 방안을 연구하였다. HVDC 시스템의 무효전력 제어가 가능한 범위는 DC 전압 및 전류, AC 전압 등에 의해 변동되며, 변압기 탭 절환기의 제어를 통해 제어 범위를 확장할 수 있다. MAP 방법을 사용하여 단락용량 및 운전각에 따른 1GW급 BTB HVDC 시스템의 안정도를 검토하였다. 평택-당진간 설치 예정인 1GW급 BTB HVDC 시스템의 설계를 위해 해당 모선의 2017년 HVDC 시스템 연계 후 무효전력 수급 상태를 검토하였으며, 인근 연계 모선의 상정사고 시뮬레이션을 통해 전압안정도를 유지하기 위해 필요한 무효전력량을 결정하였다. 이에 따라 HVDC 시스템의 운전 상태에 따른 무효전력 제어 범위를 결정하고, 사이리스터 밸브의 운전각을 설계하였다.

2. AC계통에서 무효전력문제에 대한 고찰

AC 전력계통에서 무효전력을 제어하는 목적은 크게 계통 전압을 제어하기 위한 것과 AC계통에 고장이 발생한 경우에 과도 불안정을 피하기 위한 것으로 나눌 수 있다. 따라서, AC계통에서 무효전력은 다음과 같은 형태로 제어되어야 한다.

- * 순시 무효전력제어/전압제어
- * 정상상태 무효전력제어/전압제어
- * Long-Term 무효전력제어/전압제어

한편, HVDC시스템의 렉티파이어 단에서는 점호각 α 와 인버터 단에서는 소호각 γ 가 존재하기 때문에 전류는 항상 전압에 비하여 지연(lagging)현상이 유발되고, 이러한 지연 현상은 무효전력의 소모를 유발한다. 그리고 HVDC 시스템의 제어는 반도체 소자의 스위칭을 이용하기 때문에 무효전력의 변화량이 대단히 빠르고, AC계통에 주는 영향이 크기 때문에 무효전력에 대한 문제는 심도있는 검토를 필요로 한다.

2.1 무효전력제어에 관한 수학적 고찰

HVDC 시스템에서 인버터 측에서는 DC출력 P_d 가 음(Negative)이며 이때 소모되는 무효전력 Q_{inv} 가 통상 정격 부하의 50% ~ 60%정도로 설계하는 것이 일반적이다. HVDC시스템에서 무효전력 Q_{inv} 와 유효전력 P_d 에 대한 관계식은 다음과 같다[1].

* KEPCO Research Institute, Korea.

[†] Corresponding Author : KEPCO Research Institute, Korea.

E-mail : shchoi@kepcoco.kr

Received : May 8, 2012; Accepted : September 24, 2012

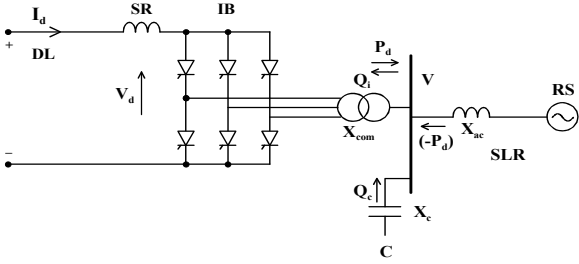


그림 1 HVDC 인버터 시스템의 기본 회로
Fig. 1 HVDC inverter circuit diagram

렉티파이어

$$P_d = U_d \cdot I_d \tag{1}$$

$$Q_d = \frac{U_{diO} \cdot I_d}{4} \cdot \frac{\sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu) + 2\mu}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} \tag{2}$$

$$U_d = U_{diO} \cdot \cos \alpha - (d_x + d_r) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot U_{diON} \tag{3}$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) = 2 \cdot d_x \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{diON}}{U_{diO}} \tag{4}$$

$$\alpha = 180^\circ - \gamma - \mu \tag{5}$$

인버터

$$U_d = U_{diO} \cdot \cos \gamma - (d_x - d_r) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot U_{diON} \tag{6}$$

$$\cos \gamma - \cos(\gamma + \mu) = 2 \cdot d_x \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{diON}}{U_{diO}} \tag{7}$$

여기서, U_d 는 직류 전압, U_{diO} , U_{diON} 는 밸브 측의 무부하 전압($U_{diO} = 3\sqrt{6} \cdot U_{ph}/\pi$, 컨버터 변압기 권수비 $\tau=1$ 인 경우), d_x 는 컨버터 변압기의 단락 임피던스($d_x = 0.5 \cdot x_k$), d_r 는 컨버터 변압기 내의 저항 손실, I_d 와 I_{dN} 는 DC 전류 및 공칭 DC 전류, α 는 점화각, μ 는 중첩각, Q_d 는 무효전력 요구량, P_d 는 렉티파이어에서 송전되는 DC 전력량, γ 는 소호각이다.

위 수식에서 HVDC 시스템에서 $U_d = U_{diO} \cdot \cos \alpha$, $\mu=0$, $Q_d = P_d \cdot \tan \alpha$ 로 가정하여 HVDC에서 소모하는 무효전력을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_{inv} = P_d \sqrt{\left[\frac{(1 + 0.5 \cdot X_{com} \cdot P_d)}{\cos \gamma} \right]^2 - 1} \tag{8}$$

$$Q_{inv} = P_d \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{diO}}{U_d} \right)^2 - 1} \tag{9}$$

식 (9)로 부터 HVDC 시스템에서 흡수하는 무효전력은 일정한 P_d 에 대해서 U_{diO}/U_d 에 따라 조절된다는 사실과 일정한 Q_d 는 U_d 와 P_d 를 일정하게 유지하면서 U_{diO} 를 증가시키면 따라 증가 될 수 있다는 사실을 알 수 있다. U_{diO} 가 증가될 때 U_d 를 일정하게 유지하기 위해서는 α 나 γ 를 증가시

키면 I_d 의 증가 없이 Q_d 를 증가시키는 것이 가능하다. 또한, U_{diO} 가 일정한 상태에서 U_d 를 감소시키으로써 Q_d 를 증가시킬 수도 있다. 그러나 이 경우에는 P_d 를 일정하게 유지하기 위해 I_d 가 증가되어야 한다. U_{diO} 가 일정하고 유효전력이 감소할 때 Q_d 를 일정하게 유지하기 위해서는 U_d 를 감소시켜야 하며, 렉티파이어 운전 시에는 α 를 인버터 운전 시에는 γ 를 감소시켜야 한다. 이러한 사실은 HVDC 시스템이 점호각이나 소호각을 이용하여 다양한 형태의 무효전력제어를 수행할 수 있으며, 다양한 형태로 운전될 수 있음을 보여준다. 그림 2는 컨버터 변압기 탭과 AC시스템 전압이 일정한 것으로 가정한 상태에서 운전모드에 따른 HVDC 컨버터의 능력 곡선(PQ 곡선)을 보여준다[2].

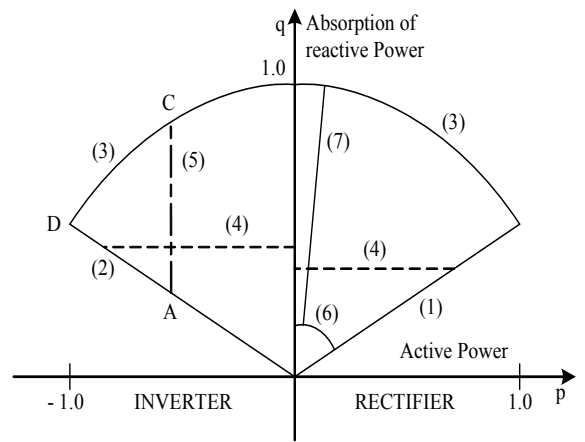


그림 2 제어기에 따른 HVDC 컨버터 단에서 P-Q 능력곡선 ((1) 정전압 DC제어와 최소 점호각제어, (2) 최소 소호각제어, (3) 정전류제어, (4) 정무효전력제어, (5) 정전력제어(6) 최소전류제어, (7) 최대점호각제어)

Fig. 2 P-Q capability characteristic of HVDC converter terminal with different control scheme ((1) Constant DC voltage control and minimum control angle (α min.), (2) Constant minimum control angle(γ min.), (3) Constant DC current control, (4) Constant reactive power control, (5) Constant active power control, (6) Minimum DC current control, (7) Maximum control angle (α max.))

그림 2의 능력곡선 1(렉티파이어)에서 DC 전압은 최대 값으로 일정하게 유지되며, 전력은 전류에 의해 제어된다. 능력곡선 2에서 인버터는 최소 운전각($\gamma = 15^\circ \sim 17^\circ$)으로 운전되고 있으며 최소 운전각은 무효전력 소비를 줄이면서 정류실패를 억제하는 관점에서 결정된다. 그리고 능력곡선 3은 DC전류가 최대인 상태에서 운전각이나 다른 제어전략이 사용된 경우, 컨버터의 용량을 보여주고 있다. 능력곡선 4는 컨버터에서 무효전력 소비가 일정하도록 운영되는 경우를 보여주며 능력곡선 5는 일정한 유효전력을 가지는 제어전략을 보여주고 있다. 만일 256개의 의사 무작위 패턴이 가해졌을 때, 66개의 결정 패턴만을 가하면 고장 검출률 100%를

보장할 수 있다. 따라서 총 322개의 패턴으로 고장 검출률 100%를 얻을 수 있는 것이다.

2.2 무효전력제어를 위한 HVDC 시스템 정격변화

HVDC 시스템이 무효전력을 제어하는 경우에 시스템의 정격에 미치는 영향을 검토하기로 하였다.

Case 1) 유효전력을 변화하지 않으면서 무효전력을 제어하는 경우

유효전력을 변화하지 않으면서 무효전력을 제어하려는 경우에는 식 (9)로부터, 유효전력을 일정하게 유지하면서 점호각 α 나 소호각 γ 를 제어해야 하며 이는 HVDC 시스템의 정격이 커져야 함을 의미한다. 그리고 U_{diO} 를 일정하게 하면서 무효전력을 제어하려는 경우에는 U_d 가 감소하고, 이는 전류 I_d 가 증가하기 때문에 이 또한 시스템의 정격이 커져야 한다.

Case 2) 유효전력을 변화시키면서 무효전력을 제어하는 경우

유효전력을 변화시키면서 무효전력을 제어하는 경우에는 U_d 를 감소시켜야 하며, 이를 위해서 점호각 α 나 소호각 γ 를 제어하면 된다. 이 경우에는 시스템의 정격은 변함이 없으나, 절연내력이나 손실은 커져야 한다.

이상에서 보는 바와 같이, 만약 점호각이나 소호각을 제어하여 무효전력을 제어하고자 하면, 유효전력을 변화시키지 않는다면 밸브와 컨버터 변압기들의 정격을 높여야 하고, 높은 전류에서 운전되어야 한다. 또한, 유효전력을 변화시키면서 무효전력을 제어하는 경우에는 높은 U_{diO} , 높은 α 또는 γ 값에서 운전되어야 하고, 이 경우도 밸브나 컨버터 변압기의 정격이 높아진다. 이는 필터 가격 상승으로 이어지게 된다. 무효전력 제어량을 증가시키기 위해서 제어각이 증가해야 한다면, $U_d=1$ 을 유지하고, 전체 송전 용량을 유지하기 위해 컨버터 변압기 밸브 측 AC 전압 U_{diO} 또한 증가해야 한다. 따라서 일반적인 최적 설계보다 밸브는 더 높은 전압 정격으로 설계되어야 한다. 이는 곧 사이리스터 개수와 기타 밸브 구성품이 증가하므로 밸브의 가격 상승을 의미한다. 또한 밸브 양단에 설치되는 피뢰기 가격에도 영향을 준다. 여기에 탭 절환기의 단계 동작에 의해 U_{diO} 가 자주 동작하게 되어 탭 절환기의 유지보수 비용이 상승하게 되는데 이러한 요소는 HVDC 시스템의 가격상승을 유발한다.

Q_d 를 P_d 의 함수로 나타낸 그림 3의 그래프에서는 운전각 (렉티파이어에서는 α , 인버터에서는 γ)와 U_d 에 따른 무효전력의 변화량을 보여준다. 그림 3(a)와 3(b)에서는 $U_d=1$ 인 경우이고 그림 3(c)와 3(d)에서는 $U_d=0.9$ 인 경우를 보여주고 있다.

렉티파이어 운전모드를 나타내고 있는 1사분면에서, 무효전력 소모량은 최소 α 값에 의해서 제한된다. 또한, Q_d 는 또한 공칭값인 $\alpha=15^\circ$, $\alpha=25^\circ$, $\alpha=35^\circ$ 에 대해서 계산하였다. 정격전류에서 운전각 25° 는 무효전력 소모량의 상한값을 보여주고 있는 것으로 무효전력제어를 수행하지 않는 경우에 사용되는 값이다. 인버터에서 Q_d 는 최소 $\gamma=16^\circ$ 그리고

최대 30° 및 40° 에서 계산하였다. $\gamma=30^\circ$ 는 일반적으로 설계되는 최대 값으로 적당하다. 해당 곡선들은 3a부터 3d까지의 그래프에서 2사분면에 나타내었다. 이 그래프들은 0부터 정격전류 1[p.u]에 해당하는 최대 전력까지 계산된 값을 나타낸 것이다.

그림 4(a)와 4(b)는 Q_d-P_d 그래프 내에서 운전영역을 음영으로 표시하였다. 그림 4(a)는 렉티파이어일 때 $\alpha_{max}=25^\circ$ 인버터일 때 $\gamma_{max}=30^\circ$ 그리고 $U_{diOmax}=1.05 \cdot U_{diON}$ 로 설계된 일반적인 컨버터에 대한 그래프를 보여준다. 렉티파이어의 경우, 최대 제한치는 왼쪽으로부터 최대 $(\alpha+\mu)$ 곡선, 최대 U_{diO} 곡선, 최대 피상 전력 곡선 그리고 정격 DC 전류를 의미하는 $P_d=1[p.u]$ 인 수직선으로 둘러싸인 영역이 된다. 인버터의 경우 최대 제한치는 최대 U_{diO} 곡선, 최대 피상 전력 곡선 그리고 최소 제한값은 최소 γ 곡선에 의해 제한된다. 그림 4(b)는 $\alpha_{max}=35^\circ$, $\gamma_{max}=40^\circ$, $U_{diOmax}=1.2 \cdot U_{diON}$ 값을 갖는 무효전력 소모량을 증가시키도록 설계된 컨버터에 대한 그래프를 보여주고 있다. 이 경우에는 렉티파이어로 운전 시 허용 상한 값이 최대 U_{diO} 곡선에 의해 결정된다.

2.3 무효전력관점에서 탭 절환기

HVDC 컨버터 변압기는 거의 대부분 탭 절환기를 구비하고 있다. 이유는 정상상태 최적운전 조건을 만족시키고 DC 선로부하나 AC전압 변동을 최소화시키기 위해 DC 전압이 지령값을 추종하도록 해야 하기 때문이다. 여기서의 “최적 운전 조건”은 DC 선로 손실을 최소화하기 위해 최대로 가능한 DC 전압 U_d , 불필요하게 큰 무효전력 소모를 피하기 위한 적절한 제어각 α 와 γ , 제어 목적을 위해 너무 낮은 α 는 지양하는 것을 의미한다. 탭 절환기 범위는 보통 AC 전압변동의 크기와 DC 전류변동에 따른 DC 선로에서의 전압 변동량에 의해 결정된다. 탭 절환기는 외란 상황에서도 밸브에 인가되는 전압을 규정된 최대값까지 변화시키면서 DC 전압을 제어하는데 사용된다.

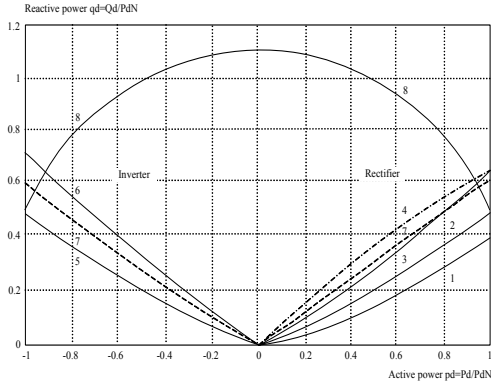
공칭 변압기 권선비에 해당하는 공칭 탭 위치가 있다, $\tau=\tau_N$, 이 위치에서 공칭 AC 전압 $U_n=U_{nN}$ 에 대해 공칭 $U_{diO}=U_{diON}$ 값을 제공한다. 최저 $U_n=U_{nmin}$ 에서 최대값 $U_{diO}=U_{diOmax}$ 가 되어야 한다면, 최저 탭 위치 τ_{min} 은 다음으로 정의된다.

$$\tau_{min} = \frac{U_{nmin}}{U_{diOmax}/(3 \cdot \sqrt{6}/\pi)} \quad (10)$$

그리고 특정 최소값 U_{diOmin} 에 해당하는 U_{diO} 를 얻기 위해 최고 탭 위치 τ_{max} 는 다음으로 계산된다.

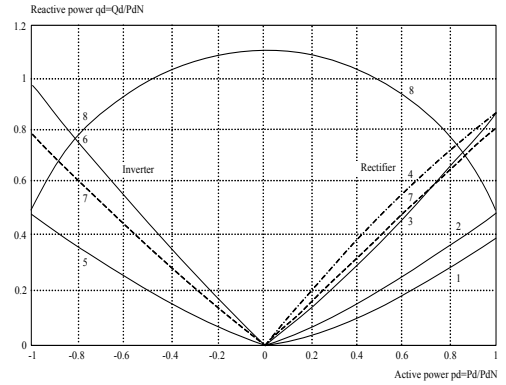
$$\tau_{max} = \frac{U_{nmax}}{U_{diOmin}/(3 \cdot \sqrt{6}/\pi)} \quad (11)$$

τ_{min} 에 해당하는 탭 위치는 U_{diOmax} 와 관련되기 때문에 무효전력 제어관점에서 중요하다. τ_{max} 는 I_d 가 감소할 때 정격 값에서 U_d 를 유지하기 위해서는 중요한 의미를 가질 수 있다.



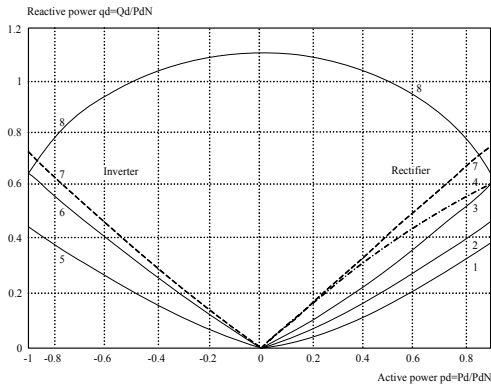
(a) 일반적인 경우 (일정 $U_d = 1.0[p.u.]$)

- 1: $\alpha = 5^\circ$
- 2: $\alpha = 15^\circ$
- 3: $\alpha = 25^\circ$
- 4: $\alpha + \mu = K$
- 5: $\gamma = 16^\circ$
- 6: $\gamma = 30^\circ$
- 7: $U_{diOmax} = 1.05 \cdot U_{diON}$
- 8: $S = 1[p.u.]$



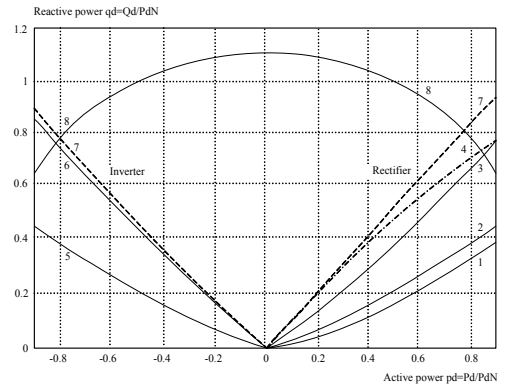
(b) U_{diO} 제어를 하는 경우 (일정 $U_d = 1.0[p.u.]$)

- 1: $\alpha = 5^\circ$
- 2: $\alpha = 15^\circ$
- 3: $\alpha = 35^\circ$
- 4: $\alpha + \mu = K$
- 5: $\gamma = 16^\circ$
- 6: $\gamma = 40^\circ$
- 7: $U_{diOmax} = 1.05 \cdot U_{diON}$
- 8: $S = 1[p.u.]$



(c) 일반적인 경우 (일정 $U_d = 0.9[p.u.]$)

- 1: $\alpha = 5^\circ$
- 2: $\alpha = 15^\circ$
- 3: $\alpha = 25^\circ$
- 4: $\alpha + \mu = const$
- 5: $\gamma = 16^\circ$
- 6: $\gamma = 30^\circ$
- 7: $U_{diOmax} = 1.05 \cdot U_{diON}$
- 8: $S = const = 1p.u.$

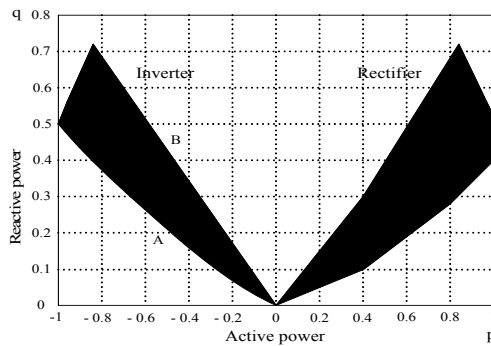


(d) U_{diO} 제어를 하는 경우 (일정 $U_d = 0.9[p.u.]$)

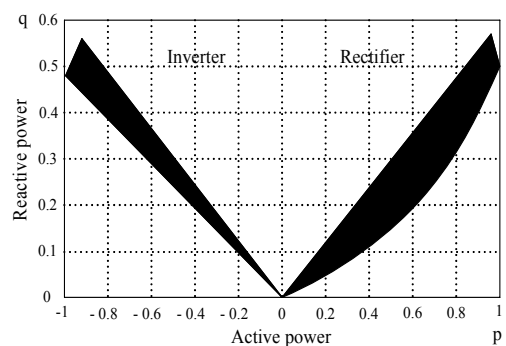
- 1: $\alpha = 5^\circ$
- 2: $\alpha = 15^\circ$
- 3: $\alpha = 25^\circ$
- 4: $\alpha + \mu = const$
- 5: $\gamma = 16^\circ$
- 6: $\gamma = 30^\circ$
- 7: $U_{diOmax} = 1.05 \cdot U_{diON}$
- 8: $S = const = 1p.u.$

그림 3 HVDC 컨버터 무효전력 흡수 특성곡선

Fig. 3 Reactive power absorption of a HVDC converter



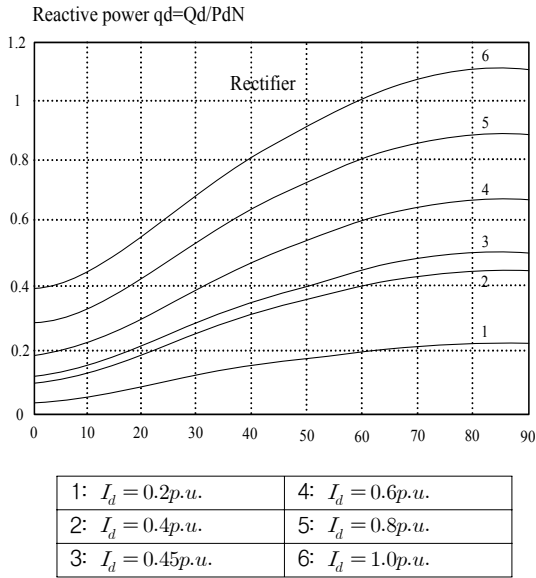
b) $U_d = 1[p.u.]$ 이고, $U_{diOmax} = 1.2 \cdot U_{diON}$,
 $\gamma_{min} = 16^\circ$, $\gamma_{max} = 40^\circ$, $\alpha_{min} = 5^\circ$, $\alpha_{max} = 35^\circ$



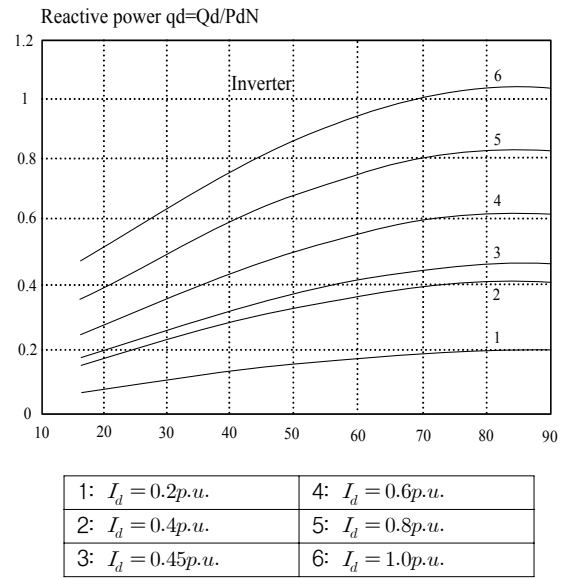
a) $U_d = 1[p.u.]$ 이고, $U_{diOmax} = 1.05 \cdot U_{diON}$,
 $\gamma_{min} = 16^\circ$, $\gamma_{max} = 30^\circ$, $\alpha_{min} = 5^\circ$, $\alpha_{max} = 25^\circ$

그림 4 $P_d - Q_d$ 곡선 ((a) : 일반적인 경우, (b) : 무효전력제어가 고려된 경우)

Fig. 4 $P_d - Q_d$ diagram ((a) : normally designed HVDC converter, (b) : designed for reactive power control)



(a)



(b)

그림 5 $U_{diO} = U_{diON}$ 인 경우 무효전력능력 곡선 ((a) : 렉티파이어, (b) : 인버터)

Fig. 5 Reactive power absorption with $U_{diO} = U_{diON}$ ((a) : rectifier, (b) : inverter)

인버터에서는 일정한 γ 동작을 하고, 렉티파이어는 점호각 α 를 이용하여 DC 전류를 제어하는 경우에, 렉티파이어단의 탭 절환기는 U_{diO} 를 제어해서 α 를 공칭 값(예를 들어 15°)에 가깝게 유지한다. 이때 탭 절환기는 피드백 루프를 이용해서 렉티파이어 단의 DC 전압을 제어할 수 있다. 이러한 사실을 통해 탭 절환기 제어 루프에 α 기준 값을 바꾸는 제어기를 포함시킴으로써 렉티파이어 단에서 "Slow Reactive Control" 기능을 구성할 수 있다는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 무효 전력 증가가 필요하면, 제어기는 α 를 증가시키는 지령 값을 내고 이는 결과적으로 U_{diO} 를 증가하게 한다. 이 경우에는 인버터 쪽에는 아무런 영향이 없다. 물론 변압기 탭 절환기를 구동함으로써 얻어질 수 있는 것보다 더 빠르게 무효전력을 변화시켜야 한다면 인버터의 γ 를 증가시킴으로써 DC 전압을 감소시켜야 한다. 이 경우는 인버터도 영향을 받는다.

인버터 단에서 일정 γ 로 운전 중에 무효 전력을 증가시키는 것은 γ 기준값을 증가시킴으로써 수행된다. 이 동작이 DC 전압을 제어하는 탭 절환기가 충분히 추종할 수 있는 만큼 천천히 진행된다면, 탭 절환기가 U_{diO} 를 증가해서 DC 전압을 회복시키기 때문에 렉티파이어는 아무 영향을 받지 않게 된다. 인버터가 피드백 전압 제어로 운전된다면 탭 절환기는 γ 를 공칭값에 가깝게 유지하려고 할 것이고 정상 상태에서 γ 기준값을 변경시킴으로써 무효전력을 변화시킬 수 있다. 탭 절환기가 U_{diO} 증가를 제한할 수 있기 때문에 탭 절환기 동작 범위 또한 무효전력 소모량을 증가시키는데 있어서 제한 요소가 된다. 따라서 이는 최대 U_{diO} 제한과 비슷한 영향을 주게 된다.

그림 6은 같은 AC계통전압에서 같은 파라미터를 가질 때 탭 절환 변압기의 최대 탭과 최소 탭에 대한 2개의 다이어

그램을 보여준다. 탭 절환기는 계통의 사고나 계통전압의 상승이나 하강 등 AC계통의 조건이 변화한 경우에, HVDC 시스템을 처음 설계한 상태로 환원시키는 동작을 한다.

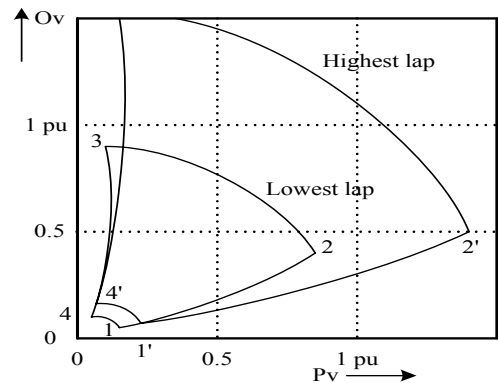


그림 6 컨버터 변압기의 탭위치에 따른 PQ 능력곡선

Fig. 6 PQ diagram of a HVDC converter with different taps of the converter transformer

그림 7에서 A점에서 1.0[p.u]전압에서 HVDC 시스템을 운전한다고 가정할 때, 만약 인버터 측 AC 전압이 증가하면, HVDC는 인버터가 더 많은 무효전력을 소비하도록 제어할 것이고 무효전력의 제어에 의해서 AC계통전압은 안정화 될 것이다. 만일 AC 계통전압이 계속 증가한다면, 전압 제어기는 결국 B점에 도달할 것인데, B점은 DC전류 최대 값이 된다. 역으로 AC 전압이 1.0[p.u]로 부터 감소한다면, 컨버터는 γ 를 감소시켜 무효전력 소비를 감소할 것이고, 최종

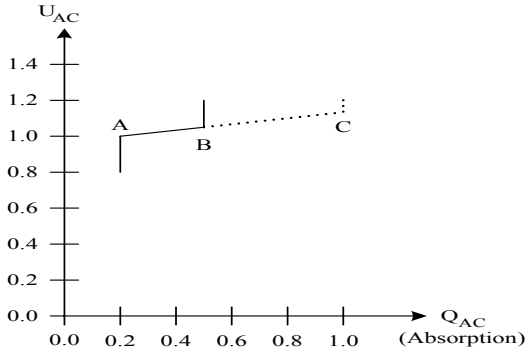


그림 7 일정 전력 0.5 p.u.에서 인버터의 전압제어
 Fig. 7 Voltage control at the inverter keeping the power constant at 0.5 p.u.

적으로 A점에 도달할 때까지 전압을 안정화시킬 것이며 이때 A점은 최소 γ 값에 도달하게 된다. AC인버터 전압이 더 많이 감소하면, 유효전력을 일정하게 유지하기 위하여 DC전류가 증가할 것이다. 감소하는 전압을 제어하기 위한 조건은 컨버터가 그림 7의 A와 B사이에 있는 점에서 운전되는 것이다.

3. 1GW BTB HVDC 시스템의 무효전력 검토

3.1 과전압 해석 및 안정도 검토

TOV는 HVDC 컨버터와 AC 계통사이의 순간적인 무효 전력수급의 불평형에서 발생한다. TOV에 대한 개념은 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 k_{TOV} 는 TOV factor로써 기본과 전압의 과전압 배수를 말하며, 다음과 같은 수식으로 결정된다.

$$k_{TOV} = \frac{V_{LTN}}{V_{Lo}} = (1 + 2 \frac{Z}{U_{Lo}^2} \cdot (P_d \cdot \cos\theta + Q_d \cdot \sin\theta) + \frac{Z^2}{U_{Lo}^4} + \frac{Z^2}{U_{Lo}^4} \cdot (P_d^2 + Q_d^2)^{1/2}) \quad (12)$$

1GW급 BTB HVDC 시스템의 안정도와 TOV를 결정하기 전에 안정도와 TOV를 결정하는 단락용량을 구해야 한다. 인버터 측과 레กติ파이어 단에서 측정된 최대 단락용량은 12,900[MVA]이고, 최소 단락용량은 9,200[MVA]이며, 이를 SCR로 변환하면 최대값 12.9와 최소값 9.2를 갖는다.

일반적으로 SCR이 10이 넘는 경우에는 순시 전압제어와 안정도에 대한 해석이 필요 없다. 즉, SCR이 10이 넘는 경우에는 TOV가 5%미만이기 때문에 WSCC에서 권장하는 일반적인 AC계통의 전압운전범위 5%이내에 들어오기 때문이며 안정도 해석이나 전압안정도에 대한 해석은 생략한다. 그러나 실제계통에서 발생하기는 어려우나 운전각이 40°이며,

전압이 0.9[p.u]이하로 떨어진 경우 등 아주 특별한 경우에 대하여 전력 안정도를 MAP 방법을 통하여 검토하였다[3].

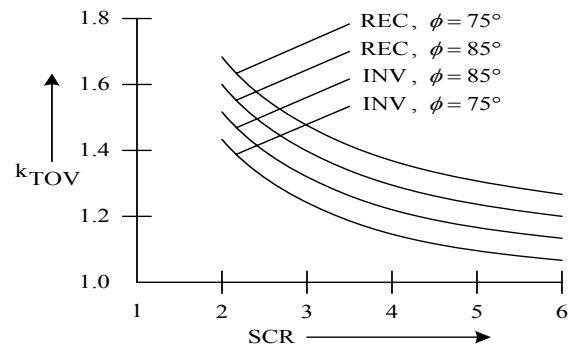
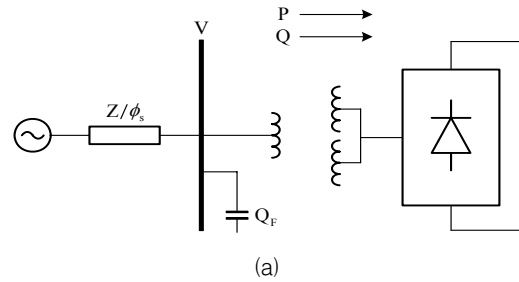
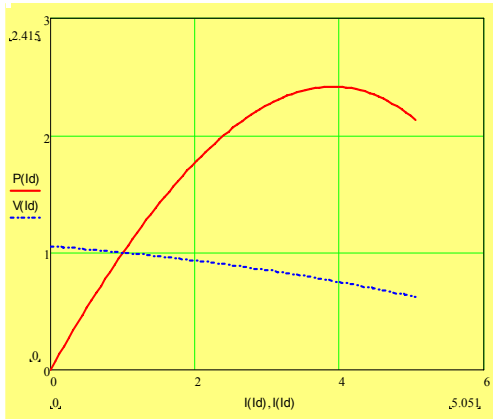


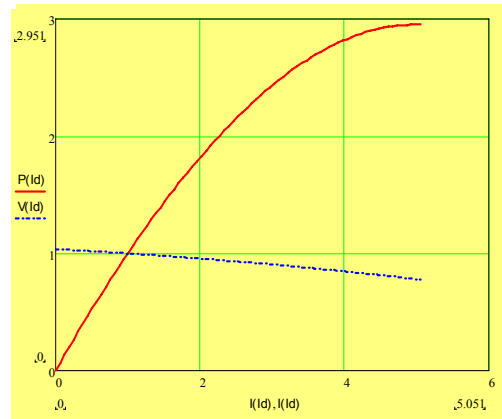
그림 8 HVDC 시스템 구성 및 HVDC 블럭시 과전압 배수
 Fig. 8 HVDC system configuration and overvoltage factor at blocking of HVDC station

그림 9는 운전각이 25°이며, AC계통전압이 1[p.u]인 경우에 SCR에 의한 안정도를 보여주고 있다. 그림 9(a)의 경우에 안정도가 붕괴되는 전류는 4[p.u]이며, TOV는 5%이내이다. 그리고 그림 9(b)의 경우는 안정도가 붕괴되는 전류가 5[p.u]이며, TOV는 5%미만이 된다. 그림 10은 단락용량이 최대가 되는 SCR이 12.9이고 무효전력 200[MVAR] x 2인 경우를 모의하기 위해서 운전각이 40° 그리고 AC 계통전압이 1.0[p.u]과 0.9[p.u]인 경우를 모의한 경우로 이 경우에도 HVDC 시스템은 정상상태에서 안정도가 붕괴되지 않으며, TOV가 5%이내가 된다.

그림 11은 1GW급 HVDC 시스템에서 최악의 조건과 최상의 조건에서 HVDC 시스템의 안정도를 모의한 것으로 그림 11(a)는 단락용량이 9.2, 운전각이 40° 그리고 AC계통전압이 0.9인 경우에 대하여 안정도와 TOV를 구하였다. 이 경우에 HVDC 시스템의 최대 전력전송 능력은 전류가 2.8[p.u]인 경우에서 발생하고, TOV도 1.05[p.u]가 발생하는 것을 알 수 있다. 반면에 그림 11(b)의 경우는 SCR이 12.9, 운전각이 20° 그리고 AC계통전압이 1.05인 경우를 가정하는 경우로써 TOV는 1%이내이며 최대 전력전송 능력은 전류가 6[p.u]인 경우에 발생한다.



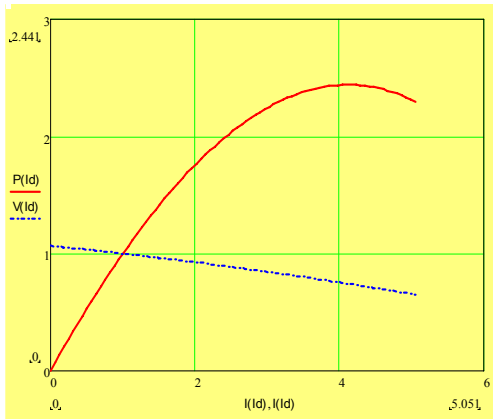
(a) SCR = 9.20, 운전각 = 25°, 전압 = 1[p.u]



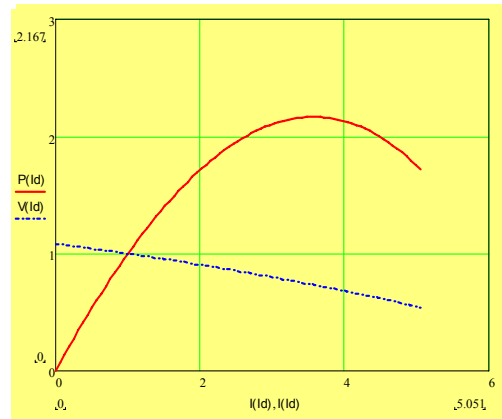
(b) SCR = 12.9, 운전각 = 25°, 전압 = 1[p.u]

그림 9 MAP를 이용한 안정도 계산

Fig. 9 Calculation for voltage stability using MAP method



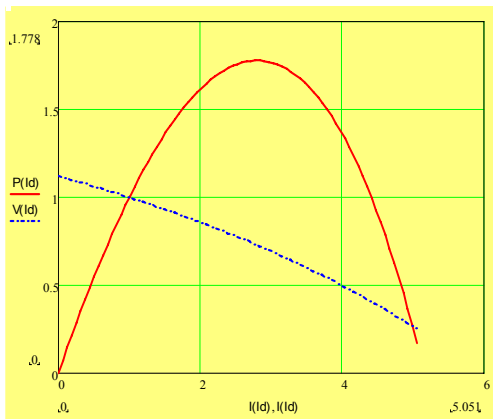
(a) SCR = 12.9, 운전각 = 40°, 전압 = 1.0[p.u]



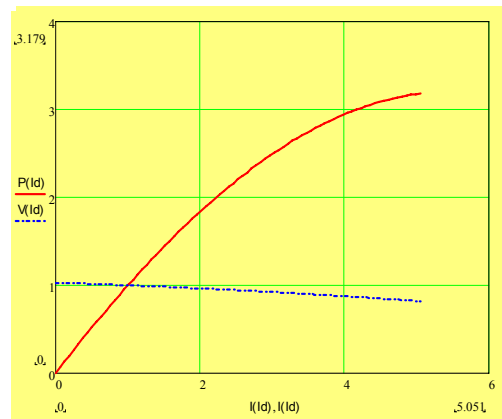
(b) SCR = 12.9, 운전각 = 40°, 전압 = 0.9[p.u]

그림 10 MAP를 이용한 안정도 계산

Fig. 10 Calculation for voltage stability using MAP method



(a) SCR = 9.20, 운전각 = 40°, 전압 = 0.90[p.u]



(b) SCR = 12.9, 운전각 = 20°, 전압 = 1.05[p.u]

그림 11 MAP를 이용한 안정도 계산

Fig. 11 Calculation for voltage stability using MAP method

표 1 2017년 계통의 QV해석을 위한 상정사고 시나리오

Table 1 Credible fault scenario for QV analysis in 2017

Case	Trip 선로					비고
	모선명 (Fr Bus)	모선번호 (Fr Bus)	모선명 (To Bus)	모선번호 (To Bus)	CKT	
Contingency 1	신안성7	4010	신중부7	4020	1	765kV 선로 1회선 사고
Contingency 2	신가평7	1020	강원7	5030	1	765kV 선로 1회선 사고
Contingency 3	신중부7	4020	신서산7	6030	1	765kV 선로 1회선 사고
Contingency 4	신태백7	5010	강원7	5030	1	765kV 선로 1회선 사고
Contingency 5	화성3	4400	아산3	6950	1	345kV 선로 2회선 사고
	화성3	4400	아산3	6950	2	
Contingency 6	신김포3	3300	신파주3	1300	1	345kV 선로 2회선 사고
	신김포3S	3301	신파주3S	1301	1	

3.2 HVDC에 의한 무효전력 제어 범위 검토

연도별 발전소 건설계획에 따라 서해안의 발전단지에는 2016년 말까지 발전기 병입이 완료될 예정이며, 발전기 밀집에 따른 과도안정도 저하 등의 문제를 해결하기 위하여 2015년 12월에 서해안 발전단지와 수도권 사이에 1[GW]급 HVDC가 투입될 예정이다. 따라서 HVDC에 의한 무효전력 제어 범위를 검토하기 위한 계통 무효전력 검토는 2017년의 계통에 대해 수행하였다.

계통 무효전력 검토를 위한 상정사고는 사고시에도 계통이 안정적으로 운영될 수 있는 사고 가운데 계통 파급 영향이 클 것으로 판단되는 Case를 선택하였으며 표 1과 같다.

무효전력 검토를 위한 사고는 전송용량이 큰 765kV 선로 1회선 사고, 1GW HVDC 인근의 345kV 북상선로 2회선 사고, 인천 발전단지에서 수도권으로 향하는 345kV 선로 2회선 사고로 상정하였다.

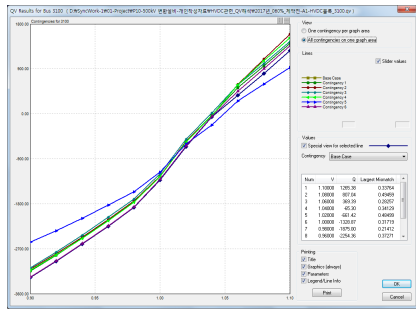
3.1.1 2017년 60% 부하에 대한 무효전력 검토

2017년 계통의 60% 부하에서 각 모선에서 전압 1.0[p.u.]를 유지하기 위해 필요한 무효전력량에 대한 검토결과를 표 2에 표시하였으며, HVDC의 블록시와 운전시에 대한 PSS/E Q-V 곡선 결과를 그림 12와 그림 13에 표시하였다.

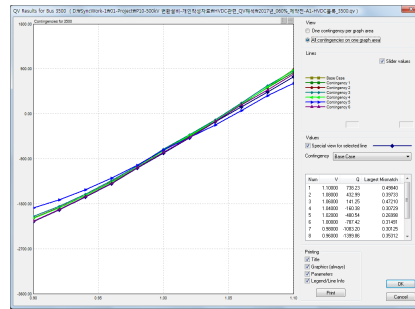
표 2 2017년 60% 계통의 각 모선별 1.0[p.u.]를 전압 유지를 위한 무효전력

Table 2 Reactive power for maintaining 1.0[p.u.] voltage of 60% AC network in 2017

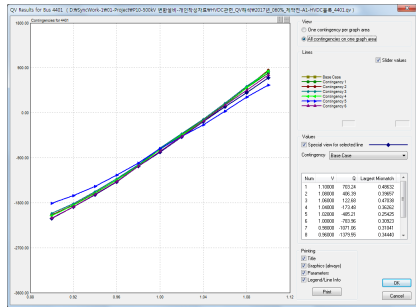
Case	HVDC 운전조건	모선 전압 1.0[p.u.] 유지를 위한 무효전력 (MVAR)				비고
		3100 (서서울#2)	3500 (신안산3)	4401 (화성3S)	4450 (평택TP3)	
Base	블록	-1328.87	-787.42	-783.96	-587.99	-
	운전	-717.02	-252.14	-115.24	61.19	
	DC소비량	611.85	535.28	668.72	649.18	
Contingency 1	블록	-1243.81	-734.92	-730.68	-551.42	765kV 1회선 사고
	운전	-644.58	-238.23	-73.57	98.48	
	DC소비량	599.23	496.69	657.11	649.9	
Contingency 2	블록	-1242.30	-733.78	-729.94	-549.45	765kV 1회선 사고
	운전	-639.82	-240.77	-73.26	100.70	
	DC소비량	602.48	493.01	656.68	650.15	
Contingency 3	블록	-1195.46	-710.19	-704.92	-532.40	765kV 1회선 사고
	운전	-602.36	-223.49	-54.67	114.12	
	DC소비량	593.1	486.7	650.25	646.52	
Contingency 4	블록	-1252.87	-738.60	-734.77	-552.92	765kV 1회선 사고
	운전	-649.89	-241.89	-75.71	97.37	
	DC소비량	602.98	496.71	659.06	650.29	
Contingency 5	블록	-1165.09	-726.36	-715.09	-556.83	345kV 2회선 사고
	운전	-629.06	-243.71	-113.02	45.66	
	DC소비량	536.03	482.65	602.07	602.49	
Contingency 6	블록	-1313.68	-774.35	-770.07	-582.84	345kV 2회선 사고
	운전	-707.33	-246.52	-102.89	66.04	
	DC소비량	606.35	527.83	667.18	648.88	



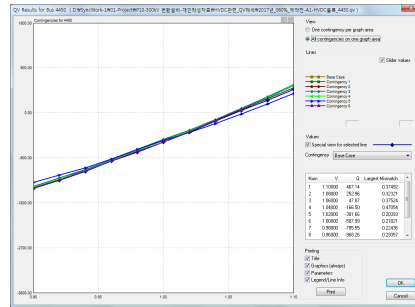
(a) 3100(서울#2)모선



(b) 3500(신안산3)모선

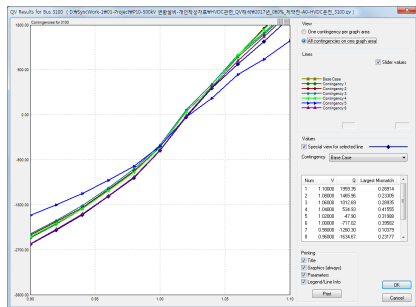


(c) 4401(화성3S)모선

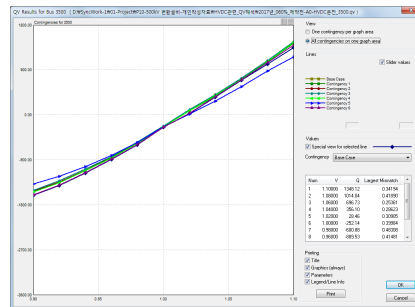


(d) 4450(평택TP3)모선

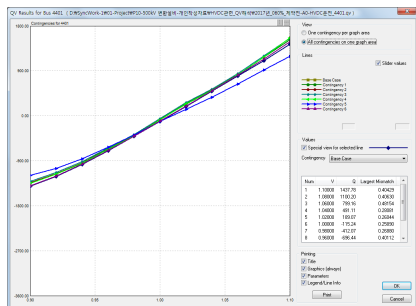
그림 12 60% 부하에서 HVDC 블록시 각 모선의 Q-V 곡선
Fig. 12 Q-V curve of each bus on 60% load when HVDC blocking



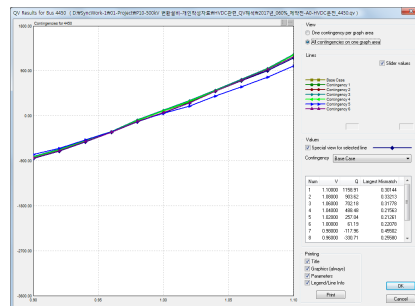
(a) 3100(서울#2)모선



(b) 3500(신안산3)모선



(c) 4401(화성3S)모선



(d) 4450(평택TP3)모선

그림 13 60% 부하에서 HVDC 운전시 각 모선의 Q-V 곡선
Fig. 13 Q-V curve of each bus on 60% load when HVDC operating

표 2의 결과로부터 다음의 결론을 유추할 수 있다.

- 1GW급 BTB의 인버터단 인근의 4450(평택TP3) 모선
- HVDC 운전시 최대 무효전력 소비 증가량 :650.29 [MVAR]
- 상정사고시 1.0[p.u]를 유지하기 위해 필요한 무효전력

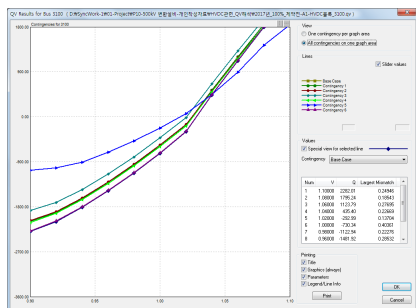
$$= 114.12(\text{Contingency 3}) - 61.19(\text{Base}) = 52.93 \text{ [MVAR]}$$

따라서 2017년 계통의 60% 부하에서는 HVDC 운전시에 도 HVDC 양단의 전압을 1.0[p.u]로 유지하기 위하여

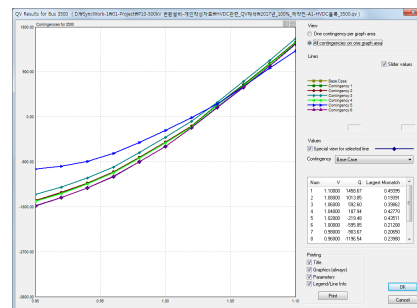
표 3 2017년 100% 계통의 각 모선별 1.0[p.u] 전압 유지를 위한 무효전력

Table 3 Reactive power for maintaining 1.0[p.u] voltage of 100% AC network in 2017

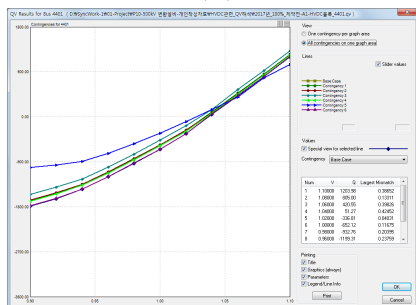
Case	HVDC 운전조건	모선 전압 1.0[p.u] 유지를 위한 무효전력 (MVAR)				비고
		3100 (서서울#2)	3500 (신안산3)	4401 (화성3S)	4450 (평택TP3)	
Base	블록	-730.34	-595.85	-652.12	-558.15	-
	운전	-324.08	-151.11	-76.07	35.88	
	DC소비량	406.26	444.74	576.05	594.03	
Contingency 1	블록	-573.01	-504.15	-561.73	-493.74	765kV 1회선 사고
	운전	-172.58	-67.55	6.34	93.76	
	DC소비량	400.43	436.6	568.07	587.5	
Contingency 2	블록	-563.74	-501.81	-560.60	-493.10	765kV 1회선 사고
	운전	-163.09	-61.47	11.11	96.91	
	DC소비량	400.65	440.34	571.71	590.01	
Contingency 3	블록	-418.33	-409.03	-466.02	-425.42	765kV 1회선 사고
	운전	-31.19	21.33	95.34	157.34	
	DC소비량	387.14	430.36	561.36	582.76	
Contingency 4	블록	-596.37	-520.92	-578.94	-506.31	765kV 1회선 사고
	운전	-194.90	-79.55	-6.71	84.28	
	DC소비량	401.47	441.37	572.23	590.59	
Contingency 5	블록	-223.35	-270.88	-326.69	-326.95	345kV 2회선 사고
	운전	-0.18	42.63	91.41	142.55	
	DC소비량	223.17	313.51	418.1	469.5	
Contingency 6	블록	-723.09	-591.25	-647.89	-554.72	345kV 2회선 사고
	운전	-318.73	-147.70	-72.55	38.47	
	DC소비량	404.36	443.55	575.34	593.19	



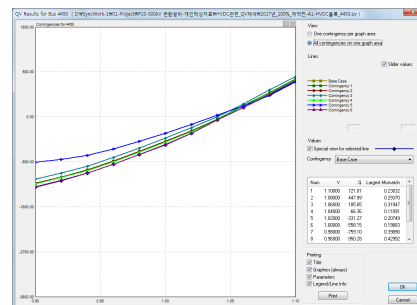
(a) 3100(서서울#2)모선



(b) 3500(신안산3)모선



(c) 4401(화성3S)모선



(d) 4450(평택TP3)모선

그림 14 100% 부하에서 HVDC 블록시 각 모선의 Q-V 곡선

Fig. 14 Q-V curve of each bus on 100% load when HVDC blocking

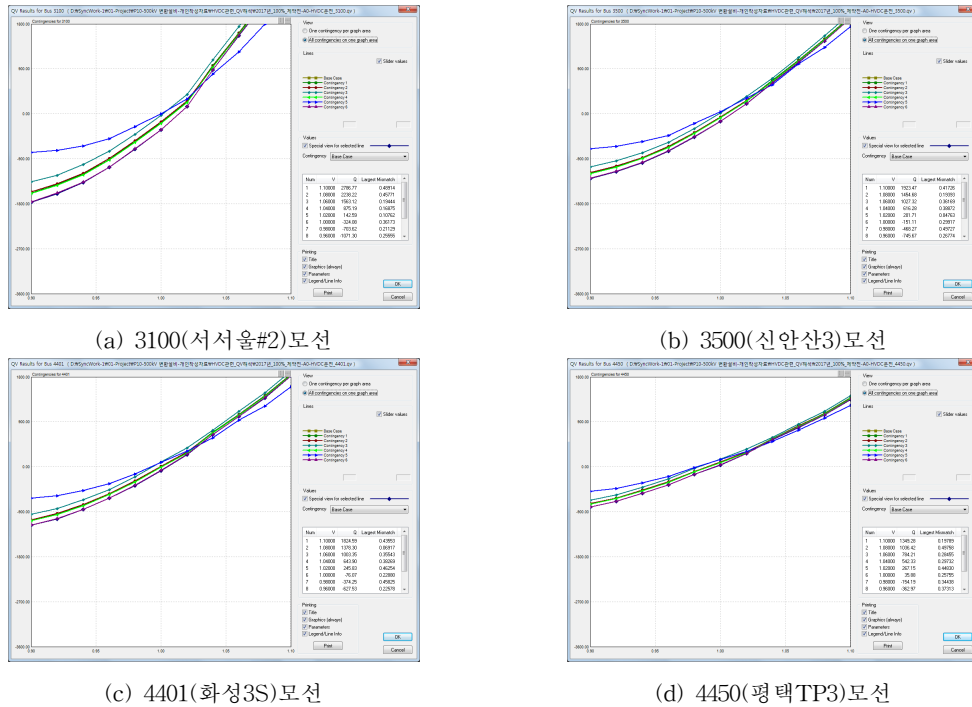


그림 15 100% 부하에서 HVDC 운전시 각 모선의 Q-V 곡선
 Fig. 15 Q-V curve of each bus on 100% load when HVDC operating

650.29[MVAR]의 AC Filter의 용량이 필요 하고, 각 상정 사고시에 전압을 1.0[p.u.]로 유지하기 위해 필요한 무효전력의 최대값이 52.93 [MVAR]이므로 HVDC의 운전각 제어에 의해 52.93 [MVAR]의 무효전력을 계통에 공급할 수 있어야 한다.

3.1.2 2017년 100% 부하에 대한 무효전력 검토

2017년 계통의 100% 부하에서 각 모선의 전압을 1.0[p.u.]로 유지하기 위해 필요한 무효전력량에 대한 검토결과를 표 3에 표시하였으며, HVDC의 블록시와 운전시에 대한 PSS/E Q-V 곡선 결과를 그림 14와 그림 15에 표시하였다.

표 3의 결과로부터 다음과 같은 결론을 유추할 수 있다.

- 1GW급 BTB의 인버터단 인근의 4450(평택TP3) 모선
 - HVDC 운전시 최대 무효전력 소비증가량 : 593.19 [MVAR]
 - 상정사고시 1.0[p.u.]를 유지하기 위해 필요한 무효전력 = 157.34(Contingency 3) - 35.88(Base) = 121.45 [MVAR]

따라서 2017년 계통의 100% 부하에서는 HVDC 운전시에 도 HVDC 양단의 전압을 1.0[p.u.]로 유지하기 위하여 593.19[MVAR]의 AC Filter의 용량이 필요 하고, 각 상정 사고시에 전압을 1.0[p.u.]로 유지하기 위해 필요한 무효전력은 HVDC의 운전각 제어에 의해 121.45 [MVAR]를 계통에 공급할 수 있어야 한다.

3.1.3 2017년 계통에 대해 필요한 HVDC의 무효전력

2017년 계통의 60% 부하에서 필요한 AC 필터 용량 650.29[MVAR]이고, 100%에서 부하에서 필요한 AC 필터

용량은 593.19[MVAR]이다. 따라서 1GW HVDC에 설치될 AC 필터 용량은 650.29[MVAR]가 되어야 한다.

또한 60% 부하에서 상정사고시 모선 전압을 유지하기 위해 추가로 요구되는 무효전력량은 52.93[MVAR]이고, 100% 부하에서 상정사고시 모선 전압을 유지하기 위해 추가로 요구되는 무효전력량은 121.45[MVAR]이다. 따라서 상정사고시 모선 전압을 유지하기 위하여 1GW HVDC에서 운전각 제어를 통해 계통에 추가로 공급해야 하는 무효전력은 121.45[MVAR]이며 이 값을 HVDC의 운전각 결정에 반영되어야 한다.

표 4 2017년 계통의 HVDC 인버터 측 무효전력

Table 4 Reactive power of HVDC inverter in 2017 AC network

구분	모선 전압 유지를 위해 필요한 무효전력량	
	HVDC 운전시 AC 필터 용량	사고시 HVDC 제어를 통한 무효전력 공급량
2017년 60% 부하	650.29	52.93
2017년 100% 부하	593.19	121.45
HVDC 무효전력 요구량	650.29	121.45

표 5 인버터 측의 운전각 결정

Table 5 Operation angle for the inverter side

① 절대 소호각	12°
② NPS에 의한 보정각(1%)	1°
③ 변압기 권선의 공통임피던스에 의한 보정각	1.5°
④ 필터 스위칭을 고려한 보정각	2°
⑤ 정상상태 최소 소호각(오차 미고려)	16.5°
⑥ 측정오차	1°
⑦ 정상상태 최소 소호각 (측정오차포함)	17.5°
⑧ 제어 데드밴드	2%
최적 운전각	19.3°
⑨ 정상상태 최대 운전각	21°
⑩ 정상상태 최대 소호각(측정오차 포함)	22°

3.3 무효전력제어를 고려한 운전각

HVDC 시스템의 운전각을 도출하기에 앞서, HVDC 시스템의 운전각 결정에 관한 특성을 고찰해볼 필요가 있다[4]. 표 5는 인버터 측의 운전각을 결정하는 기본적인 과정을 보여주고 있는 것으로 ① 절대 소호각은 사이리스터가 소호를 하기위한 절대시간을 보여주고 있으며, ② NPS(Negative Phase Sequence)는 상 불평형에 의한 점호각의 왜곡을 보상하는 개념이며, ③ 공통임피던스보상은 3권선 변압기에서 발생하는 임피던스간섭에 의한 보상이고, ④ 필터 스위칭에 의한 과도전압변동을 고려한 개념이다. 그리고 ⑦은 측정오차를 고려한 최소 소호각으로써 실제로는 히스테리시스 밴드개념이 포함된 오차이며, ⑧은 제어 데드밴드로써 전압변동범위를 Tap으로 나눈 값으로써 정상상태 제어범위를 나타내고 있다. ⑩ 정상상태 최대소호각은 오차를 포함한 값이다.

이상에서 보여주는 운전각 도출개념에서 무효전력제어 즉, 점호각의 변동에 의해서 무효전력이 변동되는 범위를 구하면 다음과 같은 3가지 요소를 고려해야 한다.

- * 순시 무효전력제어/전압제어
- * 정상상태 무효전력제어/전압제어
- * Long-Term 무효전력제어/전압제어

순시 무효전력제어는 탭이 동작하지 않으면서 급격한 전압변동이나 무효전력 변동 시에 동작하는 제어범위이며, 정상상태 무효전력제어는 탭이 동작하지 않으면서 정상상태에서 동작하는 제어범위를 말한다.

각각의 경우를 고려해 보면, 순간적인 전압변동의 경우에는 표 5에서 ④번 항목과 ⑧번 항목이 동시에 고려되어야 하며, 정상상태에서 무효전력제어범위는 어떠한 계통의 동요 없이 제어되는 순동 무효전력 제어범위를 말한다. Long-Term 무효전력제어는 정상상태 무효전력제어와 탭이 고려된 무효전력을 말하는 것으로써, 탭의 범위에 따라 무효전력제어범

위가 결정된다. 변환용 변압기 탭 절환기의 제어 데드밴드는 2%이며, 이 범위 내에서 AC 계통 사고 발생시 HVDC 운전각 제어에 의해 121.45[MVAR]의 무효전력이 공급되어야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 HVDC 시스템이 연계된 AC 계통의 무효전력 문제를 검토하고, HVDC 시스템에서 무효전력을 제어하는 방안을 연구하였다. HVDC 시스템의 무효전력 제어가 가능한 범위는 DC 전압 및 DC 전력, AC 전압 등에 의해 변동되며, 변압기 탭절환기의 제어를 통해 제어 범위를 확장할 수 있다. MAP 방법을 사용하여 단락용량 및 운전각에 따른 1GW급 BTB HVDC 시스템의 안정도를 검토하였다. 평택-당진간 설치 예정인 1GW급 BTB HVDC 시스템의 운전각 설계를 위해 해당 모선의 2017년 HVDC 시스템 연계 후 무효전력 수급 상태를 검토하였으며, 인근 연계 모선의 상정사고 시물레이션을 통해 전압안정도 유지를 위해 필요한 무효전력량을 결정하였다. 마지막으로 HVDC 시스템의 운전 상태에 따른 무효전력 제어 범위를 결정하고, 사이리스터 밸브의 운전각을 설계하였다.

참 고 문 헌

- [1] E.W.Kimbark, "Direct Current Transmission", Vol. 1, John Wiley & Sons, 1971
- [2] "Use of DC Converters for VAR Control," CIGRE 82, Feb 1994
- [3] Chan-Ki Kim et al. "HVDC Transmission - Power Conversion Applications in Power Systems", IEEE PRESS, WILEY, 2009
- [4] "Main Circuit Parameters", #2 HVDC ALSTOM Report 2009

저 자 소 개



최 순 호 (崔 淳 浩)

2007년 충남대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 한전 전력연구원 일반연구원.



최 장 흙 (崔 章 歙)

1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 일반연구원.



김 찬 기 (金 燦 起)

1991년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 한전 전력연구원 책임연구원