

Determination of Optimal Operating Angle for HVDC System

김진영[†] · 김재한* · 김찬기**
(Jin-Young Kim · Jae-Han Kim · Chan-Ki Kim)

Abstract - In this paper a process of determination for thyristors operating with optimal angle is described. The proposed method is based on the trade-off between the cost(due to rating and loss) and controllability of the system. Large control angle increases controllability of HVDC system and also increase the rating of the system which leads to a high price. Therefore it is important to determine a control angle at a first step of design procedure. This paper shows a rating trend of C.Tr, Valve and Filter due to control angle variation, and then introduces a determination process of the HVDC operating angle.

Key Words : HVDC, Control, Firing angle

1. 서론

최근 HVDC 시스템은 설비가격이 고가라는 단점에도 불구하고, 인위적인 조류제어가 가능하고, 고장용량을 제어할 수 있고 장거리 전력전송이 쉽다는 장점이 있다. 이러한 장점은 우리나라에서도 그대로 적용되어, 제주도과 같은 고립된 계통에 전력을 전송하는 경우나 불확실성이 높은 신재생 에너지원의 연계 그리고 대규모 환상망을 가진 수도권의 계통분할에 적용 등 그 수요가 높아지고 또한 설계 기술 확보에 대한 필요성도 커지고 있다.

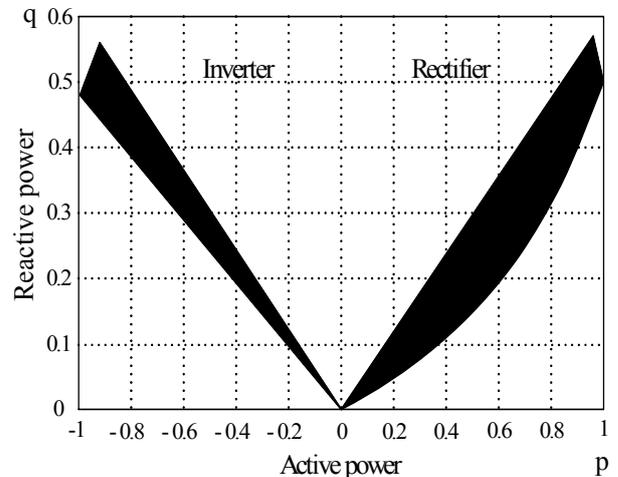
HVDC 시스템에서는 사이리스터 소자의 점화각 위상제어를 이용하여 전력을 전송할 수 있게 되는데, 이러한 운전각은 다른 설계 파라미터 결정에 영향을 미치기 때문에 HVDC 시스템을 처음 설계하는 단계에서 운전각을 결정하는 것은 대단히 중요한 요소이다. 운전 각이 크면 가제어성(Controllability)이 높아져 시스템이 안정하게 동작하나 시스템의 정격이 커지고 손실이 많이 발생한다. 반대로 운전각이 작으면 시스템의 정격과 손실이 작아서 경제적이거나 가제어성이 떨어져 시스템의 불안요소가 발생할 가능성이 높다.

본 논문의 2.1절에서는 운전각 변동이 고조파 필터, 변압기, 사이리스터 밸브에 미치는 영향을 살펴보고, 이를 정량화하여 경제성을 검토하여 최적 운전각 결정의 필요성에 대

해 논하였다. 2.2절에서는 점화각 변동에 영향을 줄 수 있는 다양한 요인들을 검토하여 최적 운전각을 도출하였다.

2. 운전각 변동에 따른 경제성 분석과 최적의 운전 각 결정

아래 그림 1은 운전각 변화에 따른 유,무효전력 제어 범위를 나타내고 있다. 알파각, 소호각이 커짐에 따라 Rectifier 및 Inverter에서 제어해야 하는 무효전력의 크기가 증가하고 그 범위도 넓어짐을 볼 수 있다. 이는 곧 무효전력 보상장치인 필터 용량이 증대됨을 의미한다.



(a) $\gamma_{min}:16^\circ$ $\gamma_{max}:30^\circ$, $\alpha_{min}:5^\circ$, $\alpha_{max}:25^\circ$

[†] 교신저자, 정회원 : 전력연구원 일반연구원

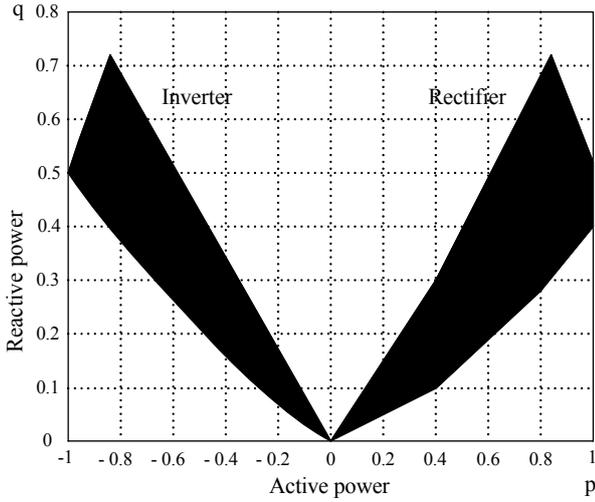
E-mail : k jy9043@kepeco.co.kr

* 정 회원 : 전력연구원 일반연구원

** 정 회원 : 전력연구원 책임연구원

접수일자 : 2011년 8월 8일

최종완료 : 2011년 11월 24일



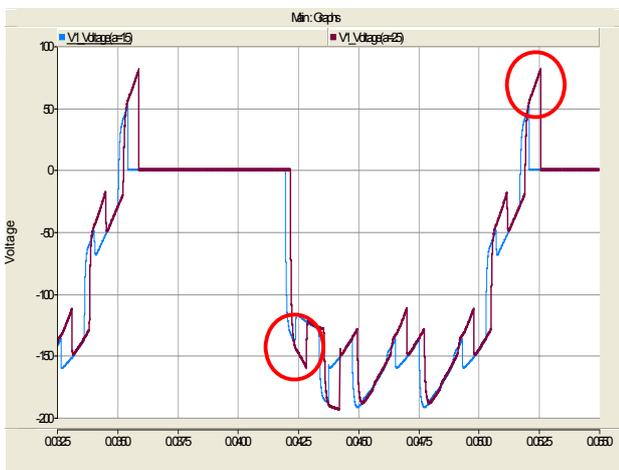
(b) $\gamma_{min}:16^\circ$ $\gamma_{max}:40^\circ$, $\alpha_{min}:5^\circ$, $\alpha_{max}:35^\circ$

그림 1 운전각 변화에 따른 유,무효전력 제어범위
Fig. 1 Active & Reactive power range due to control angle

2.1 점호각 변동이 HVDC 시스템에 미치는 영향

또한, 그림 2에서는 운전각에 따른 사이리스터 밸브 전압의 크기를 보여주고 있는데, 그림에서 보는바와 같이 컨버터가 Rectifier 또는 Inverter로 동작하는 경우, 운전각이 커짐에 따라 턴-온, 턴-오프 시 밸브에 인가되는 스위칭 전압이 더 크게 발생함을 알 수 있다. 이 오버슈트 전압은 스너버 회로에 스트레스로 작용하게 되고, 이를 견디기 위해 스너버 회로의 정격이 커지고 이에 따라 발생하는 손실 또한 증가된다.

본 논문의 본문에서는 운전각 변동에 따른 추가적인 설비용량 증가를 분석해보고, HVDC 운전특성 및 기기특성으로 인해 불가피하게 운전각을 증가시켜야 하는 요소를 포함한 최적의 운전각을 도출 과정을 구체적으로 기술하였다.



(a) $\alpha : 15^\circ$ 및 25° (Rectifier)



(b) $\gamma : 15^\circ$ 및 25° (Inverter)

그림 2 운전각에 따른 사이리스터 온-오프 시 전압크기
Fig. 2 Thyristor turn on, turn off voltage overshoot due to control angle

2.2 점호각 변화에 따른 HVDC 기기정격

HVDC 시스템에서 점호각과 소호각이 증가함에 따라 무효전력이 증가하면, DC정격전압과 전송하고자 하는 전력량을 맞추기 위해 변압기 밸브 측 AC전압이 증가된다. 그리고 높은 밸브 측 2차 전압에 의해서 밸브는 더 높은 정격으로 설계 되어야 하고 높은 점호각으로 인해 피뢰기의 가격과 스위칭 손실이 증가하게 되고 냉각과 필터의 용량이 커지게 된다. 점호각의 변화에 따른 HVDC 기기의 정격과 가격의 변동은 다음과 같다.

본 논문에서 사용한 데이터는 DC 500[kV], DC전류 2000[A], 밸브 측 선간 전압 190[kV] 인 HVDC 시스템[5]을 가정하여 계산하였다.

2.2.1 운전 각 증가에 따른 무효전력 증가

무효전력은 HVDC 시스템의 운전각에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

kim1391

$$\begin{aligned}
 Q(\alpha) &= P_{ac} \tan\phi \\
 &= P_{dc} \tan\phi \\
 &= V_{dc} \times I_{dc} \times \tan\phi
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, P_{dc} : DC 전송전력, P_{ac} : AC 유효 전력

V_{dc} : DC 전압, I_{dc} : DC 전류

식 2에 따라 운전각의 변화에 따른 무효전력의 소모량은 그림 3과 같이 그려지며, 운전각이 18도~27도로 변화함에 따라 소비되는 무효전력은 325Mvar~510Mvar로 변화되기 때

문에 1도의 변화에 따른 계통의 무효전력은 20[MVAR]로 계산될 수 있다. 무효 전력 변화는 곧 필터 용량 변화를 의미하기도 한다.

$$[Mvar/1^\circ] = \frac{510Mvar - 325Mvar}{27 - 18} \quad (2)$$

$$= 20[Mvar/1^\circ]$$

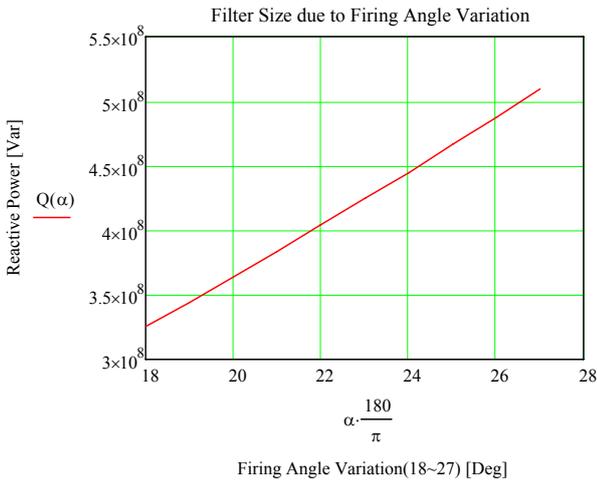


그림 3 운전각 변화에 따른 무효전력량(필터용량) 변화
Fig. 3 Reactive power(Filter rating) due to Firing angle variation

이러한 무효전력의 증가는 운전각을 1도 잘못 선정하는 경우에 20[MVAR]정도의 추가적인 무효전력보상장치(주로 필터용량)의 용량을 증가시켜야 한다는 것을 의미하며, 약한 계통에서는 추가적인 절연등급을 올려야한다는 것을 의미한다.

2.2.2 운전각 증가에 따른 컨버터와 변압기의 정격증가

점호각에 관련된 컨버터용 변압기 용량을 구하는 수식은 식 3 과 같다. 식 3 을 이용해서 점호각이 증가함에 따라 변압기의 용량이 증가하는 패턴은 그림 4에서 보여주고 있으며 운전 각이 18~27도 변함에 따라 변압기 및 밸브용량은 1189[MW]~1276[MW]으로 증가한다. 즉, 운전 각이 1도 증가함에 따라 변압기와 밸브의 용량은 9.7[MW]증가된다고 볼 수 있다.

$$S_T = \sqrt{2} \times V_L \times I_d, \quad V_L = \frac{\frac{\pi}{3\sqrt{2}} \times V_{dN}}{\cos\alpha - \frac{X_c}{2}}$$

$$S_T = \sqrt{2} \times \frac{\frac{\pi}{3\sqrt{2}} \times V_{dN}}{\cos\alpha - \frac{X_c}{2}} \times I_d \quad (3)$$

여기서, V_L : 변압기 2차측 선간 전압(rms)
 I_d : 공칭 DC 전류, V_{dN} : 공칭 DC 전압
 X_c : 변압기 1상 임피던스 [p.u.]

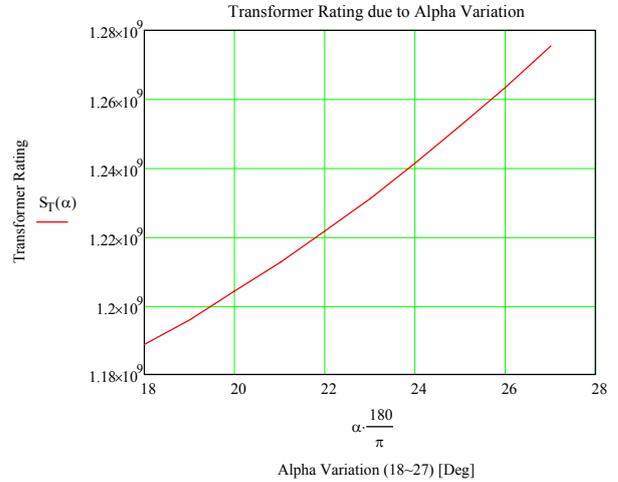


그림 4 운전각 변화에 따른 컨버터 변압기 용량 변화
Fig. 4 Converter transformer rating due to Firing angle variation

2.2.3 점호각 증가에 따른 밸브 손실증가

HVDC 시스템의 손실은 다양한 곳에서 발생할 수 있으나 점호각의 증가에 따라 밸브의 손실이 현저하게 증가하는 부분은 사이리스터 밸브를 들 수 있다. 사이리스터 밸브는 스너버회로와 DC grading 저항을 포함하여 도통 손실과 온-오프 손실로 구성되어 있다. 이러한 손실이 점호각에 따라 변하는 곡선은 그림 5에서 보여주고 있다.

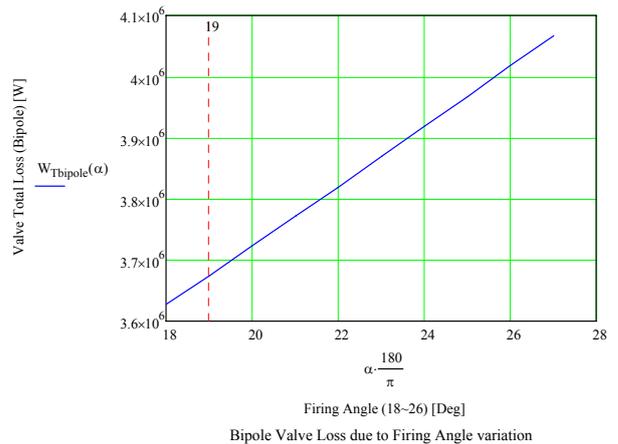


그림 5 운전각 변화에 따른 사이리스터 밸브 손실
Fig. 5 Thyristor valve loss due to Firing angle variation

그림 5에서 운전 각이 18~27도로 변화함에 따라 컨버터 밸브에서 발생하는 손실은 4.4 [MW]임을 알 수 있다. 즉, 운전각이 1도가 변함에 따라 0.5[MW]의 전력이 추가적으로

소모되고 있으며, HVDC 시스템의 수명을 30년을 기준으로 하고, 계통한계가격(SMP)을 150원/kWh : 2010년도 현재)으로 계산한다면, 대단히 큰 금액임을 알 수 있다.

2.2.4 점호각 증가에 따른 손실 검토

전력설비는 고정비와 변동비로 나눌 수 있는데, 고정비는 일종의 투자비 즉, 건설비로 볼 수 있으며, 변동비는 연료비로 볼 수 있다. 건설비의 50% 이상을 차지하는 컨버터 변압기, 밸브 그룹, 스위치 야드 및 필터 설비에 대해 점호각 변동에 따른 가격증가를 검토하였다. 검토한 항목을 경제성 검토 차원에서 현가화하면 다음과 같이 계산된다. [MVA]당 단가는 1000MW HVDC 설비를 기준으로 했을 때 전체 설비 비용에서 각각의 설비가 차지하는 비용으로 계산한 후 이를 [MVA]당 가격으로 환산하고 물가상승률을 반영한 값이다[1].

점호각 변화에 따른 가격증가

= 필터가격 + 변압기가격 + 컨버터 밸브가격 + 손실분
 = 0.4억원 × 20[MVA/1°] + 1.5억원 × 9.7[MVA/1°]
 + 1.5억원 × 3.4[MVA/1°] + 손실 (4)

여기서, 밸브가격은 1.5억원/MVA, 변압기 가격은 1.5억원/MVA, 필터는 0.4억원/MVA로 계산

2.3 최적의 운전각 결정

HVDC시스템의 운전각을 결정하는 요소는 다음과 같다.

1. 절대 소호각
2. 역상분 전압으로 인한 보정각
3. 기기의 측정오차
4. 변압기 임피던스불균형으로 인한 보정각
5. 계통의 스위칭현상에 의한 보정각
6. Control 테드밴드에 의한 보정각 (최소값, 정상상태값, 최대값)

2.3.1 절대 소호각

사이리스터는 특성상 그림 6과 같이 소호되는 순간에 역전류가 흐르고 이 값이 완전히 사라진 후에 턴-오프동작을 한다. 이러한 절대시간을 사이리스터의 절대 소호각(Absolute extinction angle) 혹은 최소 감마(Minimum Gamma)라 불리우며, 사이리스터를 구성하는 웨이퍼의 크기에 따라 결정된다.

사이리스터의 역방향 회복시간과 턴-오프 시간은 다음과 같이 결정된다. 여기서 역방향 회복시간은 역회복전하(Qrr)과 순방향전류의 감소율에 의해서 결정되는 것으로써 제작사의 실험식에 의하여 결정된다.

- 역회복 전하 : 역방향 충전전하량(Qrr)

$$\Delta Q_{rr} = 750 \times \left[\left(\frac{di}{dt} \right)_{off} \times 0.25 \right]^{0.53} \times \left[\frac{PRV}{n_T \times 3.5} \right]^{0.154} \times e^{0.01 \times (T_j - 90)}$$

$$= 233.38 [\mu C] \tag{5}$$

여기서, n_T : 0.5, PRV : Peak Reverse Voltage(역방향 최대 전압)

T_j : 사이리스터의 접합점의 온도로서 사이리스터의 접합점의 최대 운전가능온도는 90도

- 충전전하 제거시간(ΔT_c) : 역방향 충전전하가 제거되는데 필요한 시간으로 이 값은 사이리스터의 역회복전하(ΔQ_{rr})와 사이리스터의 스너버 커패시터(Cd) 그리고 전압의 변화량으로서 다음 식과 같이 결정된다.

$$\Delta T_c = \frac{\Delta Q_{rr}}{C_d \times \frac{dv}{dt}} \tag{6}$$

여기서, $\frac{dv}{dt} = 2 \times \pi \times f \times U_{vw-pk-min}$
 $U_{vw-pk-min}$ 는 최소선간전압

위의 수식을 이용하면, $\Delta T = 164.35 \mu s$ (3.55°)가 된다.

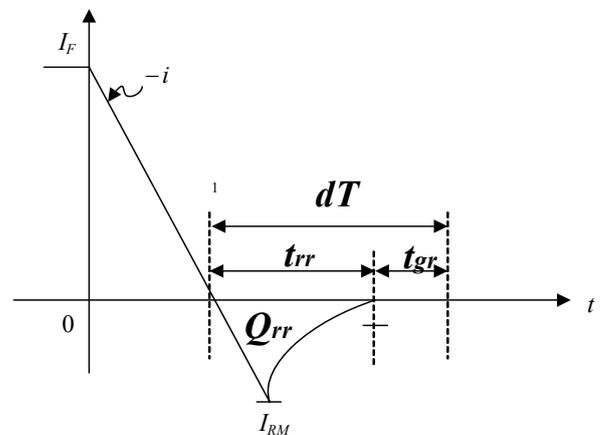


그림 6 사이리스터 턴-오프 특성
 Fig. 6 Thyristor Turn-off characteristic

- 사이리스터 턴-오프 시간: 125 mm, 8.5 kV인 사이리스터를 기준으로 90도 접합온도에서의 턴-오프 보호 시간은 363 μs 이다. 턴-오프시간과 접합온도 간의 선형 관계를 가정하면 고장 전 정상 운전시 접합온도 62도에서의 턴-오프 시간은 250.06 μs (5.4°) 가된다. 그러나, 접합온도가 90도까지 증가될 수 있기 때문에 이를 고려하면, 363 μs (7.84°)가 된다.

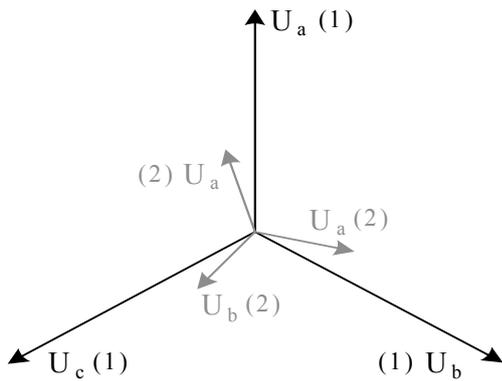
- Measurement Error : 일반적으로 $\leq 1^\circ$ 으로 한다.

결론적으로 충전전하 제거시간, 턴-오프 시간, 측정 오차를 고려한 절대소호각은 다음과 같이 결정된다.

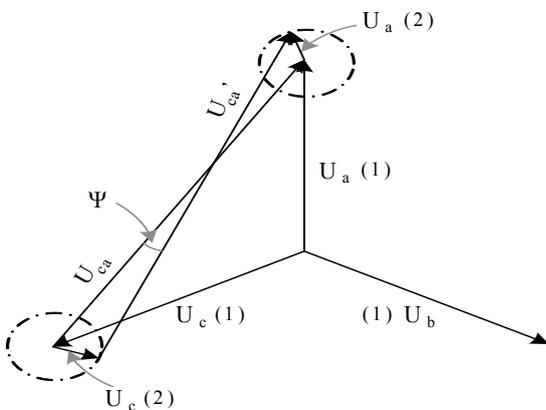
절대 소호각 = 충전전하 제거시간 + 싸이리스터의 턴-오프시간 + 측정오차
예) 절대 소호각 = $3.55^\circ (164.35[\mu s] + 7.84^\circ (363[\mu s]) + 1^\circ (\text{소호각 측정오차}))$ $= 12^\circ$

2.3.2 역상분 전압으로 인한 보정각

AC계통은 이론적으로 3상이 평형하나 실제적으로는 상간에는 불평형이 존재하며 이러한 불평형의 비율은 역상분 전압(NPS : Negative Phase Sequence Voltage)으로 표현된다. 역상분 전압은 그림 7(a)에서와 같이 크기는 같고 120°의 위상차를 가지며 정상분과 상회전이 반대인 성분을 말하며, NPS에 대한 위상 차이는 그림 7(b)에서 볼 수 있다. 그림 7(b)는 NPS성분이 있을 때와 없을 때 선간 전압의 위상차(ψ)를 보여주고 있으며 ψ는 NPS성분에 대한 점호각 혹은 소호각에서의 보정각을 나타낸다.



(a) 역상분 전압의 개념



(b) 역상분 전압에 대한 위상각 계산

그림 7 역상분 전압에 대한 벡터도
 Fig. 7 3-phase vector diagram for NPS

그림 7(b)에서 보여주는 역상분 전압에 대한 보정 각은 다음 식 7 로 계산할 수 있다.[1] 그리고, 역상분 전압의 변화에 따른 보정 각은 그림 8과 같다. 역상분에 의한 점호각 변동은 다음 수식을 통해 계산할 수 있다. AC 삼상전압을 각각 다음으로 가정하면,

$$E_a = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{3}} \sin \omega t$$

$$E_b = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{3}} \sin (\omega t + 120^\circ)$$

$$E_c = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{3}} \sin (\omega t - 120^\circ)$$

여기서 A상또는 B상의 NPS를 가정한다. 정상분만 존재하는 경우 A상과 B상은 일반적으로 30도와 210도에서 교차하게 된다. 역상분이 존재로 인해 최대 ΔV 만큼의 전압이 감소한 경우를 고려해보면, 전압 감소로 인해 A상과 B상의 교차점은 30도 또는 210도에서 조금 변하게 된다. 변화된 교차점을 이용해 각도를 계산할 수 있다. 즉,

$$\sin \omega t = (1 - \Delta V)(\sin (\omega t + 120^\circ))$$

$$= (1 - \Delta V)(\cos 120^\circ \sin \omega t + \sin 120^\circ \cos \omega t)$$

$$= (1 - \Delta V)\left(-\frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t\right)$$

따라서, $\omega t = \tan^{-1}\left[\frac{\sqrt{3}/2}{1/2 + 1/(1 - \Delta V)}\right]$ 가 되고 변화된 운전각은 다음 식7 로 계산 할 수 있다.

$$\psi = 30^\circ - \tan^{-1}\left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{0.5 + \frac{1}{1 - \Delta V}}\right] \tag{7}$$

여기서, ΔV : 3상 평형인 전압과 역상분을 포함한 3상 전압과의 선간전압의 차이

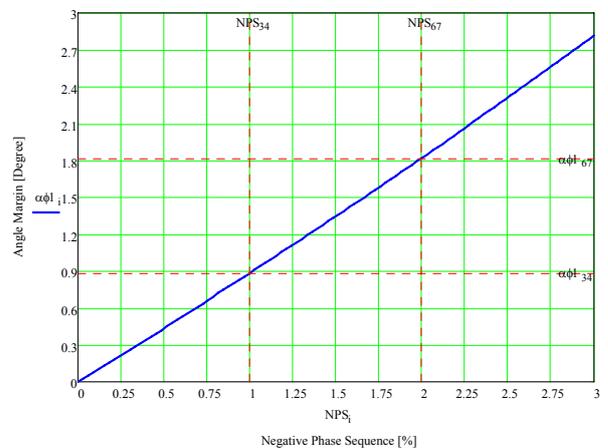


그림 8 NPS에 따른 보정각 변화
 Fig. 8 Control angle due to NPS

역상분 전압에 대한 보정각 : NPS 1%에 대하여 0.88도

2.3.3 기기오차를 포함한 측정오차 보정각

대부분의 기기는 100% 정확성을 가진 것은 없기 때문에 IEC에서는 모든 기기는 1%이하의 정밀도를 만족시켜야 한다고 규정하고 있다. 따라서, 우리가 사용하는 측정기와 진단기기는 최대 1%의 오차를 가지고 있으며, 이러한 값을 고려해서 HVDC 시스템을 설계하는 경우에는 1도의 측정오차를 고려하고 있다. 여기에서 말하는 측정오차는 측정하려는 기기의 오차와 측정하는 기기의 오차 그리고 중간에 생길 수 있는 오차를 모두 포함한다.

측정오차에 대한 보정각 : 1도

2.3.4 변압기 공통 임피던스로 인한 보정각

HVDC용 변압기가 1차 측이 Y결선이고 2차 측이 Y/Δ결선인 경우에는 즉, 한상의 Y권선이 있는 곳에 한상의 Δ권선이 동일 철심에 감겨 있어 공통인 임피던스가 존재한다. 그림 6에서 컨버터 변압기 1차측에 존재하는 공통 임피던스를 확인할 수 있다.

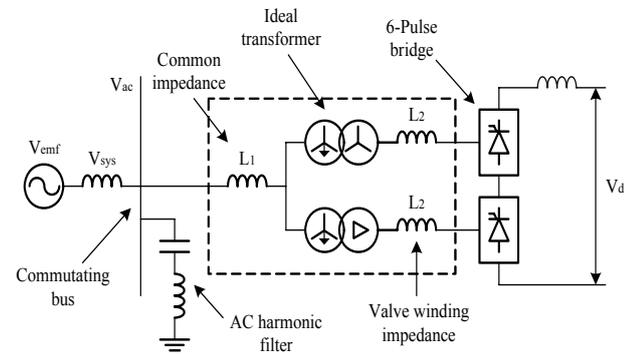


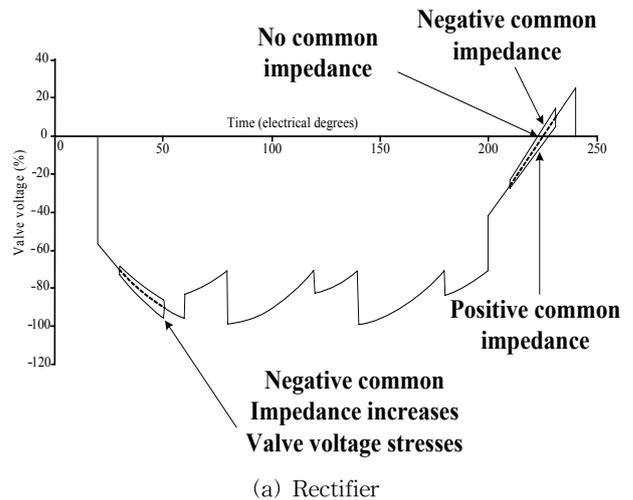
그림 9 컨버터 변압기 1차측에 존재하는 공통 임피던스
Fig. 9 Common Impedance at AC side of Converter Transformer

이 컨버터 변압기의 공통 임피던스(Common Impedance)를 가능한 작게 만들면 컨버터 정격에는 거의 영향이 없지만, 전류가 도통 함에 따라 공통 임피던스 양단에 형성되는 전압은 Y 결선에 연결된 밸브와 Δ결선에 연결된 밸브에 다르게 영향을 미쳐서, 즉 정류 시에 Y결선측 6펄스 정류회로는 순간적으로 선간단락 현상이 발생하고 이러한 전압의 변화는 Δ결선측 6펄스 회로에 인가되는 전압에 영향을 미친다. 공통 임피던스의 영향을 분석할 때, Mutual factor로 나타내면 편리하다. Mutual factor는 다음으로 정의한다.

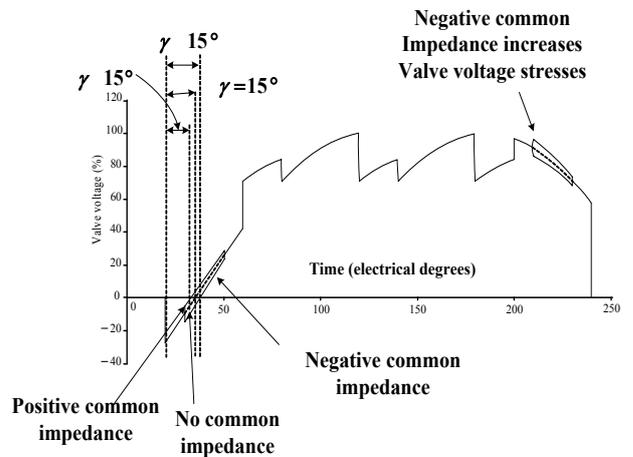
$$m = \frac{L_1 \cdot N^2}{L_2 + L_1 \cdot N^2} \tag{8}$$

여기서, m= 상호 임피던수 계수
L1=두 권선 간의 공통임피던스
L2=각 권선의 누설임피던스
N=컨버터 변압기의 권수비

중첩 각이 30° 이하인 12펄스 브리지 단일 중첩 모드인 경우, 두 개의 6펄스 회로에서 동시에 정류현상이 발생하지는 않는다. 따라서 단일 중첩모드에서 공통 임피던스로 인한 영향은 밸브 전압 파형에서의 파형왜곡이 일어나는 위치인데, 예를 들어, 컨버터가 공통임피던스가 있는 정류기모드로 운전 중일 때를 고려하면, Mutual factor는 양수가 된다. 예를 들어, X2=0.14p.u. 이고 X1=±0.014p.u. 점호각 15°, 중첩 각 20°인 컨버터를 가정하면, 그림 8(a)와 같은 밸브전압이 나타나게 되는데, 이 파형으로부터 공통 임피던스의 영향을 볼 수가 있다. 반대로 컨버터가 인버터 모드로 동작하는 경우(X2=0.14p.u., X1=±0.014p.u., 소호각 γ가 15°, 중첩 각이 20°)에는 양(positive)의 공통임피던스이면 소호각 γ가 감소하고, 음(Negative)의 공통임피던스이면 γ가 증가함을 알 수 있다.



(a) Rectifier



(b) Inverter

그림 10 공통임피던스에 의한 밸브전압의 왜곡
Fig. 10 Valve voltage distortion by common impedance

따라서, 정류기 모드에서는 고려할 필요가 없지만, 인버터의 경우에는 소호각의 크기가 정류실패를 유발시키기 때문에 변압기의 공통임피던스의 크기를 고려하여 최소 소호각을 결정해야 한다. 현재 공통 임피던스 값은 제작 상으로 2.5%까지 줄일 수 있으며, 공통 임피던스 2.5%에 대한 보정각(ψ_Z)은 수식적으로 다음 식 9 와 같이 계산될 수 있으며, 보정 각은 1.5도로 계산된다.

$$\psi_Z = 30^\circ - \tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{3} \cdot (1-m)} \right] \quad (9)$$

$$m = \frac{L_1 \cdot N^2}{L_2 + L_1 \cdot N^2}$$

- 여기서, m = 상호 임피던스 계수
- L1 = 두 권선 간의 common 임피던스
- L2 = 각 권선의 누설 임피던스
- N = 컨버터 변압기의 권수비

공통 임피던스에 대한 보정각 :
공통 임피던스 2.5%에 대하여 1.5도

2.3.5 계통의 스위칭현상에 의한 보정각

HVDC시스템은 운전 중에 필터스위칭 혹은 계통의 사고로 인하여 전압변동이 생긴다. 이러한 전압변동으로 인하여 운전 각이 변할 경우 정류실패를 유발할 수 있기 때문에 전압변동에 대한 보정 각을 고려해야 한다. 다음 식 10 은 계통전압 변화에 대한 보정각을 수식적으로 표현한 것으로 $OV_{filter-switching}$ 은 필터의 스위칭 시 AC계통의 전압 변동분이나 계통의 사고시의 전압 변동값 중에서 최대값을 선정하여 결정한다.

$$\psi_{OV} = \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\gamma_{min} + \gamma_{NPS} + \gamma_{Com.Im})}{1 + \Delta OV_{filter-switching}} \right) \quad (10)$$

- 여기서, $\Delta OV_{filter-switching} = \frac{SCR + Q_{filter-size}}{SCR}$
- SCR = 계통의 단락용량
- $Q_{filter-size}$ = 필터의 단위용량
- γ_{min} = 절대소호각
- γ_{NPS} = 역상분 전압에 의한 보정 각

AC계통에서 필터 스위칭 시 전압의 변동율을 3%로 가정한다면 보정각은 다음과 같이 계산된다.

$$\psi_{OV} = \cos^{-1} \left(\frac{\cos(12^\circ + 1^\circ + 1.5^\circ)}{1 + 0.03} \right) - 14.5^\circ = 5.5^\circ \quad (11)$$

AC계통의 전압변동에 대한 보정각 :
전압 변동율 3%에 대하여 5.5도

필터 스위칭 보정 각은 경우에 따라서는 생략할 수 있다. 예를 들어 필터를 투입하고자 하는 경우에 일시적으로 소호각을 증가시키는 제어(Gamma Kick)나 전압을 감소시켜 소호각을 증가시키는 제어(DC전압 Kick) 혹은 전류를 일시적으로 감소시켜 소호각과 중첩각을 감소시켜 소호각을 확보하는 제어(DC전류 Kick)를 행하는 경우에는 필터 스위칭 보정 각은 제외 할 수 있다.

2.3.6 Control 데드밴드에 의한 여유각

Control 데드밴드는 탭 조정없이 운전각 만을 조정해 HVDC 시스템이 안정적인 전압 범위내에서 동작할수 있게 조정 가능한 운전각의 범위를 말한다. 이러한 범위를 넘어서는 경우에는 탭 체인저가 동작하여 DC전압을 증가시키거나 감소시킨다. 그림 11에서는 Rectifier와 Inverter에서 나타나는 전압 형태를 보여준다.

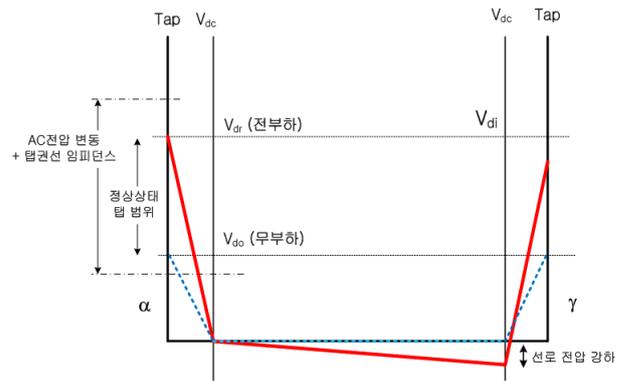


그림 11 Rectifier와 Inverter 단의 전압 형태
Fig. 11 Voltage profile between Rectifier and Inverter terminal

Control 데드밴드는 탭-스텝과 관계가 있고, 탭-스텝은 탭의 조정범위와 탭 수에 관계한다. 우선적으로 탭의 범위는 식12 에 의해서 결정된다.

$$T_{max} = \frac{V_{dr} + \frac{X_c}{2} \cdot I_{d-max}}{V_{ac-min} \cdot \cos\alpha} \quad (12)$$

$$T_{min} = \frac{V_{dr} + \frac{X_c}{2} \cdot I_{d-min}}{V_{ac-max} \cdot \cos\alpha}$$

- 여기서, V_{dr} = 정류기측 DC전압
- X_c = 변압기 %임피던스
- I_{d-max} = 최대 DC전류
- V_{ac-max} = AC측 최대전압
- α = 운전각
- I_{d-min} = 최소 DC전류

$$V_{ac-min} = AC\text{측 최소전압}$$

그리고, 탭-스텝은 최대 탭범위와 최소 탭범위를 합한 탭 동작 영역에서 제작상의 관점에서 21탭으로 할 것인지 17탭으로 할 것인지를 결정한다.

$$\text{탭-스텝} = \frac{(\text{최대 탭 범위} + \text{최소 탭 범위})}{21\text{탭 or } 17\text{탭}} \quad (13)$$

Control 데드밴드는 다음과 같이 탭-스텝의 1.5배 혹은 2배 이하가 되도록 결정한다.

$$\begin{aligned} \text{Control Deadband} & \quad (14) \\ &= \text{탭-스텝} \times 1.5 \text{ or } 2 \\ &= 1.25 [\%] \times 1.5 \text{ or } 2 = 1.875 [\%] \text{ or } 2.5 [\%] \end{aligned}$$

Control 데드밴드를 결정하는 경우에 어느 시점에서 탭을 증가시키고 탭을 감소시키는 경우에는 채터링 현상(chattering 현상)을 유발할 수 있기 때문에 ±1도 정도의 폭을 가진 히스테리시스 밴드구조를 갖게 설계하여야 한다. 여기서 ±1도의 히스테리시스는 측정오차와 시지연요소를 포함하여 결정한 값이다.

Control 데드밴드에 의한 보정각 : 2%의 Control 데드밴드에 대하여 2도

Control 데드밴드를 결정하기에 앞서 HVDC 시스템의 안정도를 검토해야 한다. 즉, HVDC시스템이 제어범위 내에서 임의적으로 동작할 수 있다는 가정 하에서 AC전압의 변동율이 5%이하 그리고 무효전력의 변동율이 5%이하를 만족해야 한다는 제한 조건을 검토해야 한다. Control 데드밴드에 대한 제한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{lim} &\leq \sin^{-1}(0.05 \cdot SCR) \quad (15) \\ \Delta\alpha_{lim} &\leq 3^\circ \quad (SCR=2.5) \end{aligned}$$

3. 검토 및 결론

본 논문에서는 운전각 변동에 따른 경제성을 검토해보고, 최적의 운전점을 도출하는 방법을 기술하였다. 최종적인 인버터 측의 운전각은 23도로 결정하였으며 이 운전각은 시스템 정격을 결정하는 기본 데이터로 사용된다. HVDC 시스템은 결정된 운전각에서 운전될 것이고, 미세한 전압 변동과 과도상태 시 제어기에 의 운전각 제어로 HVDC는 안정적인 운전을 하게 된다. 본문에서 설명한 결과를 종합하면 표 1과 같다. 여기서는 AC 계통 특성과 설비 운전 특성으로 인해 발생할 수 있는 주요 전압 변동요인을 모두 운전각으로 환산하였다. 앞서 언급한 대로 필터 스위칭으로 인한 운전각 보정 같은 경우에 Gamma Kick, DC전압 Kick, DC전류 Kick 같은 보조 기능을 행하는 제어 알고리즘을 사용하면 운전각을 증가시키지 않고 제어 동작으로 이를 해결할 수 있다.

표 1 최적 운전각 결정 절차

Table 1 Determination of optimal control angle

절대 소호각	12도
NPS에 의한 보정각(1%)	1도
변압기 권선의 공통 임피던스에 의한 보정각	1.5도
필터 스위칭을 고려한 보정각	5.5도
정상상태 최소 소호각(오차 미고려)	20도
측정오차	1도
결정된 정상상태 최소 소호각(측정오차 포함)	21도
Control 데드밴드	2%
결정된 최적 운전각	23도
정상상태 최대 운전각	24도
측정 오차	1도
정상상태 최대 소호각(측정오차 포함)	25도

HVDC 기술은 신재생에너지의 보급과 계통연계 및 분할의 필요성이 대두되는 현재 전력분야에서 핵심 기술로 부상하고 있으나 ABB와 Siemens 그리고 Alstom과 같은 소수 기업에서 오랫동안 독점한 기술로 기술의 공개나 이전을 회피하는 경향이 있다. 따라서 이러한 분야의 국내 기술력 선진화 차원에서 본격적인 연구를 시행하고 있으며 본 논문은 이러한 과정중의 일부분으로 연구된 결과임을 알려준다.

참 고 문 헌

- [1] Chan-Ki Kim, "HVDC Transmmission, power conversion applications in power system"
- [2] Kundur, "Power System Stability and Control", 1993.
- [3] "Cheju-Haenam HVDC manual", AREVA, 1996.
- [4] "Economic Assessment of HVDC Links", Working Group 14.20, CIGRE Brochure 186, June 2001
- [5] "High-Voltage Direct Current Handbook", EPRI TR-104166S, 1994
- [6] "HVDC Connecting to the future : 1st edition", Alstom Grid, 2010.
- [7] E. Kimbark, "Direct Current Transmission", Wiley Interscience, 1971.
- [8] "USE OF DC CONVERTERS FOR VAR CONTROL" Task Force 01.05 of Study committee 38, CIGRE, 1994.

저 자 소 개



김진영 (金鎭伶)

1981년 8월 30일 생, 2008년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(학사), 2007년 한국전력공사 입사, 현재 전력연구원 일반연구원.

Tel : (042) 865-5847

Fax : (042) 865-5844

E-mail : kgy9043@kepcoco.kr



김 재 한 (金宰韓)

1979년생, 2008년 2월 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2007년 12월 한국전력공사 입사, 2009년 12월~현재 전력연구원 근무.

Tel : (042) 865-5849

Fax : (042) 865-5844

E-mail : 07105011@kepco.co.kr



김 찬 기 (金燦起)

1968년 12월 17일 생, 충북 충주. 1991년 서울 산업 대학교 전기공학과 졸업(학사), 1993년 중앙대학교대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1996년 전력 연구원 입사, 현재 전력연구원 책임연구원.

Tel : (042) 865-5892

Fax : (042) 865-5844

E-mail : ckkim@kepri.re.kr