

축약모델을 이용한 HVDC시스템의 안정도 평가

김찬기, 유병우, 정길조, *조성훈
 전력연구원, *한국전력공사

A Stability Estimation Method of HVDC System Using Reduced Model

Chan-Ki Kim, Byeong-Woo Ryu, Gil-Jo Jung, *Seong-Hoon Joe
 KEPRI, *KEPCO

ABSTRACT

본 논문은 HVDC시스템의 안정도와 제어 계인과의 상관관계를 다루고 있다. HVDC와 같은 시스템은 비선형적인 요소를 많이 가지고 있기 때문에 수학적 알고리즘으로 안정도를 판별하고, 제어계인을 구하는 것이 매우 어렵기 때문에 축약된 모델링을 이용하여 제어 계인을 구하였고, 안정도를 분석하였다.

1. 서 론

사이리스터를 가진 HVDC시스템은 관성이 영(零)이면서 외부 콘덴서로부터 무효전력을 공급받는 발전기이다. 이러한 특성을 가진 HVDC시스템은 발전기와 같은 역할을 하면서도 발전기와 상이한 동특성과 과도현상을 가지고 있기 때문에 기존의 AC계통에 적용하여 계통현상을 모의하거나, HVDC시스템의 제어 계인을 결정하기 위해서는 HVDC시스템의 특성을 가진 정량화된 모델이 필요하다.

시스템의 각 제어계층에서 유발될 수 있는 상호작용을 분석해 볼 필요가 있다. 그림 1은 HVDC를 모의 하는 시뮬레이션이 어느 정도까지 그리고 어느 상태를 모의할 수 있는지를 보여주며 시뮬레이션과 실측 그리고 조합의 과정을 보여주고 있다. 그림 2는 HVDC시스템의 제어모드와 제어기형태 그리고 HVDC시스템에서 나타나는 상호 현상(Interaction)을 보여주고 있다. 제어모드 관점에서 바라본다면, 가장 낮은 속응성을 갖는 제어모드는 주파수 제어모드로서 주파수 제어모드는 계통의 Dynamics를 제어하는 것을 목적으로 하기 때문에 주파수 제어기의 샘플링 타임은 10초 이상이 된다. 다음 레벨의 제어모드는 정 전력 제어모드와 정 전류 제어모드로서 이 제어모드에서는 계통의 과도현상을 제어하는 것을 목적으로 하기 때문에 이 제어기의 샘플링타임은 10ms에서 500ms가 된다.

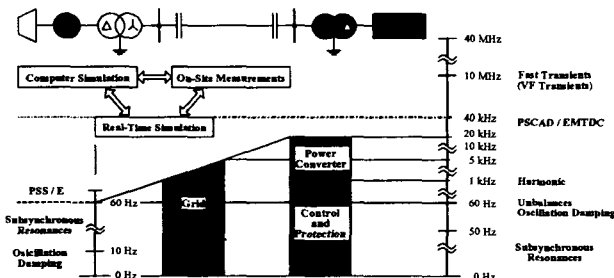


그림 1 교류와 직류계통 모델링
 Fig. 1 AC/DC Power Transmission Modelling

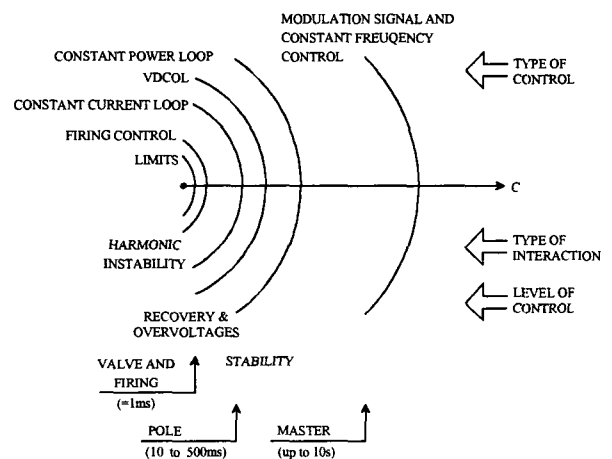


그림 2 시정수를 고려한 HVDC시스템의 계층 구조
 Fig. 2 HVDC Level Structure Considering Time Constant

그림 1로부터 HVDC시스템의 정량화된 모델을 만들기 전에 HVDC시스템의 계층구조와 시정수 그리고 HVDC

본 논문에서 개발하고자하는 축약모델은 HVDC시스템의 점호레벨에서 발생하는 개폐서지와 고조파 불안정과

같은 현상을 검토하는 것이 아니라 PSS/E급에서 사용하거나 HVDC시스템과 연계된 발전기와 저주파진동 그리고 HVDC시스템의 제어제인 안정도를 검토하기 위한 수준의 축약모델을 의미한다.

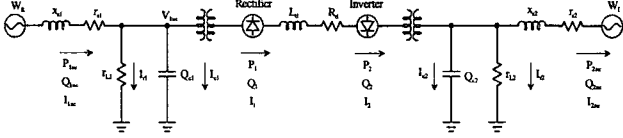


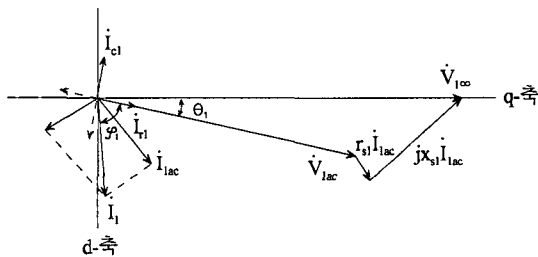
그림 3 교류와 직류계통 모델링
Fig. 3 AC/DC Power Transmission Modelling

2. HVDC시스템의 축약모델

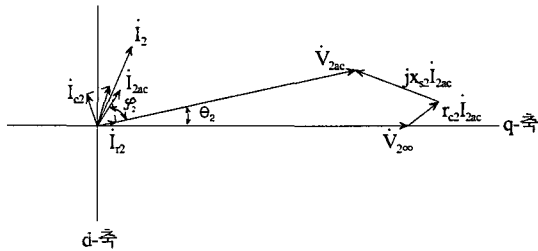
2.1 HVDC제어기를 가진 직류/교류계통의 수학적 모델링

본 논문에서 개발하고자하는 모델은 기존의 전력계통을 해석하는 전력계통해석용 프로그램에 적용이 될 수 있는 수준의 중간급의 프로그램으로써 HVDC 시스템과 연계되는 교류계통의 안정도 해석과 HVDC 시스템의 제어 제인을 정밀하게 튜닝하기 전 단계인 초별튜닝단계에서 사용하는 모델이다. 그림 4는 그림 3에서 보여주고 있는 교류계통과 직류 계통의 단결선도를 이용하여 벡터 도를 그린 것으로 그림 4의 a)는 정류기 그리고 b)는 인버터를 표현하고 있다.

그림 3의 각 부분을 수식적으로 표현하면 다음과 같고, 식(1)~식(7)은 그림 4에서 보여주고 있는 정류기 축 교류계통에 관한 수학적 모델링을 보여주고 있으며, 인버터 축 교류계통에 관한 수학적 모델링도 식(1)~식(7)에서 보여주는 정류기 축 교류계통에 관한 수학적 모델링과 비교해서 다른 점이 없다.



(a) 정류기 축



(b) 인버터 축

그림 4 AC/DC전력계통의 벡터도

Fig. 4 Vector diagram of AC/DC power transmission system

$$\dot{V}_{1\infty} = \dot{V}_{1ac} + (r_{s1} + jx_{s1})\dot{I}_{1ac} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{c1} = jY_{c1}\dot{V}_{1ac} \quad (2)$$

$$\dot{I}_{r1} = \dot{V}_{1ac}/r_{L1} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{1ac} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{r1} \quad (4)$$

$$P_1 = V_{1ac}I_1 \cos \varphi_1 \quad (5)$$

$$Q_1 = V_{1ac}I_1 \sin \varphi_1 \quad (6)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{x_{s1}(P_1 + P_{L1}) - r_{s1}(Q_1 + Q_{c1})}{r_{s1}(P_1 + P_{L1}) + x_{s1}(Q_1 + Q_{c1}) + V_{1ac}^2} \quad (7)$$

식 (8)에서 식(19)은 직류 계통의 모델링과 제어기의 모델링을 미소 변동분에 대하여 정리한 것이다.

$$\begin{aligned} \Delta E_{d1} &= 1.35 \frac{m}{n} \cos \alpha_0 \Delta V_{1ac} - 1.35 \frac{m}{n} V_{1ac0} \sin \alpha_0 \Delta \alpha \\ &\quad - m \left(\frac{3X_1}{\pi} + r_1 \right) \Delta I_d \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{d2} &= 1.35 \frac{m}{n} \cos \beta_0 \Delta V_{2ac} - 1.35 \frac{m}{n} V_{2ac0} \sin \beta_0 \Delta \beta \\ &\quad + m \left(\frac{3X_2}{\pi} + r_2 \right) \Delta I_d \end{aligned} \quad (9)$$

$$L_d \frac{d\Delta I_d}{dt} + R_d \Delta I_d = \Delta E_{d1} - \Delta E_{d2} \quad (10)$$

$$T_1 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + \Delta \alpha = k_1 \Delta I_d \quad (11)$$

$$T_2 \frac{d\Delta \beta}{dt} + \Delta \beta = -k_2 \Delta \delta \quad (12)$$

$$\Delta \beta = \frac{\sqrt{2}X_2 n}{V_{2ac0} \sin \beta_0} \left(\Delta I_d - \frac{I_{d0}}{V_{2ac0}} \Delta V_{2ac} \right) \quad (13)$$

$$T_3 \frac{d\Delta \beta}{dt} + \Delta \beta = k_3 \Delta E_{d2} \quad (14)$$

$$T_4 \frac{d\Delta \beta}{dt} + \Delta \beta = -k_4 \Delta I_d \quad (15)$$

$$T_5 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + \Delta \alpha = k_5 \Delta P_d = k_5 (E_{d10} \Delta I_d + I_{d0} \Delta E_{d1}) \quad (16)$$

$$T_6 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + \Delta \alpha = k_6 \Delta E_{d1} \quad (17)$$

$$\Delta \delta = -c_1 \Delta I_d + c_2 \Delta \beta \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } c_1 &= \frac{\sqrt{2}X_2 n}{V_{2ac0} \sin \beta_0} \left(1 + \frac{g_2 I_{d0}}{g_1 V_{2ac0}} \right) \\ c_2 &= \frac{1}{\sin \beta_0} \left(\sin \beta_0 - \frac{\sqrt{2}g_3 X_2 I_{d0}}{g_1 V_{2ac0}^2 / n} \right) \end{aligned}$$

이상에서 논한 식을 이용하여 교류와 직류계통의 상태 방정식을, $\Delta \alpha$ 와 ΔI_d 그리고 $\Delta \beta$ 에 대하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\Delta I_d}{dt} = \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} \Delta I_d - \frac{B_3}{T_d R_d} \Delta \alpha + \frac{B_4}{T_d R_d} \Delta \beta$$

$$\text{여기서, } B_1 = 1.35 \frac{m}{n} \frac{g_2}{g_1} \cos \beta_0 - m \left(\frac{3X_2}{\pi} + r_2 \right)$$

$$B_2 = 1.35 \frac{m}{n} \frac{f_2}{f_1} \cos \alpha_0 + m \left(\frac{3X_1}{\pi} + r_1 \right)$$

$$B_3 = 1.35 \frac{m}{n} \left(\frac{f_3}{f_1} \cos \alpha_0 + V_{1ac0} \sin \alpha_0 \right)$$

$$B_4 = 1.35 \frac{m}{n} \left(\frac{g_3}{g_1} \cos \beta_0 + V_{2ac0} \sin \beta_0 \right)$$

$$T_d = L_d / R_d \quad (19)$$

2.2 HVDC 제어기의 축약 모델

그림 1에서 보여주는 HVDC 제어블록 중에서 계통의 동특성과 관계되는 부분은 Pole제어기와 Phase 제어기로 Pole제어기는 VDCOL(Voltage Dependant Current Order Limit)과 전력의 전송방향을 결정하고 Phase 제어기는 그림 5에서 보여주는 것과 같이 제어모드를 결정한다. 따라서 실제적으로 HVDC시스템의 제어기 축약은 Phase 제어기의 축약으로 볼 수 있다. 그림 5은 등 간격 점호제어를 행하는 HVDC Phase 제어기를 보여주고 있다.

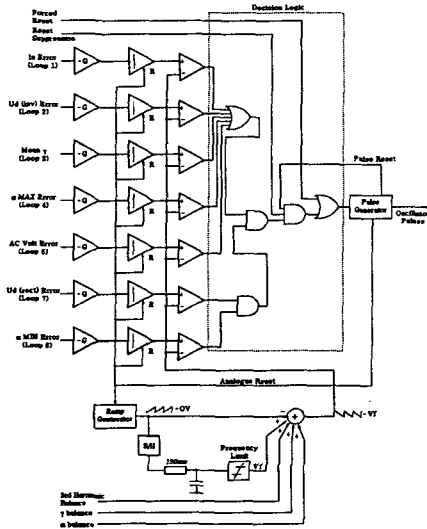
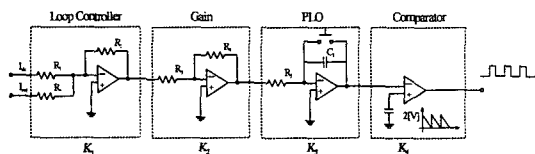


그림 5 Oscillator 블록도
Fig. 5 Oscillator Block Diagram

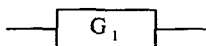
그림 7은 HVDC제어기의 축약 모델을 만들기 위해서 Loop Control과 Oscillator를 함하여 표현한 그림이다.



a) Phase Controller의 실제 회로



b) Phase Controller의 등가모델



$$G_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

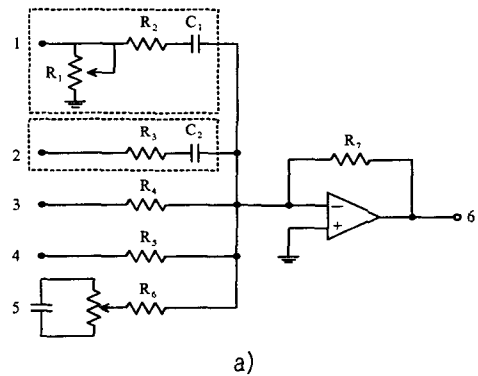
c) Phase Control의 축약 모델

그림 6 Phase Control의 축약 모델
Fig. 6 Reduced Model of Phase Control

그림 6에서 K_1, K_2, K_3, K_4 값은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} K_1 : \text{Loop Control gain 1} &= \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \\ K_2 : \text{Loop Control gain 2} &= \left(-\frac{R_4}{R_3}\right) \\ K_3 : \text{The gain of PLO} &= \frac{1}{(12 \times f_s(60\text{Hz}) \times R_6 \times C_1)} \\ K_4 : \text{Comparator level} &= \frac{1}{2[V]} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)에서 "12"는 12펄스를 의미하며, "2[V]"는 6삼각파의 기준 전압을 표현하고 있다. 그리고 R_6 와 C_1 은 Oscillator내부의 적분기 시정수를 결정하는 소자이다. 그림 6에서 단순히 비례제어기로 표현되는 Loop Control은 실제적으로 전압지령과 전류지령 그리고 α 지령과 γ 지령을 하는 부분으로 그림 7와 같이 표현된다. 이러한 Loop Control을 축약하면 다음과 같이 된다. 식 21은 그림 8의 입출력 관계식을 보여주고 있는 것이며, 그림 8에서 보여주는 전달함수의 각 계인 값을 선정하는 방법을 보여주고 있다.



a)

$$\frac{s \cdot T_{31}}{1 + s \cdot T_{32}}$$

b)

그림 7 Loop Controller
Fig. 7 Loop Controller

* Input | 1: V_{dc} , 3: γ_{ord} , 4: $\gamma_{response}$

* Output | 6: γ_{output}

$$\begin{aligned} \text{Output} = & -\frac{R_7}{R_5} \cdot \gamma_{response} + -\frac{R_7}{R_6} \cdot \gamma_{ord} \\ & + (-A \cdot R_7) / (R_2 + \frac{1}{s \cdot C_1}) \cdot V_{dc} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, $T_{31} = (A \cdot R_7) \cdot C_1$, $T_{32} = R_2 \cdot C_1$

$$A = M_p \cdot R_{35} / (R_{33} \cdot (-7.5 - M_p) + M_p \cdot R_{35})$$

= Setting gain due to variable resistance

2.3 HVDC제어기를 가진 교류/직류 계통의 안정도 해석

● 정류기 : 정전류 제어기, 인버터 : 정소호각 제어기

a) Closed Loop 소호각 제어수식 (18)을 식 (12)에 대입하여 풀면 다음과 같다.

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = \frac{k_2c_1}{T_2}\Delta I_d - \frac{1+k_2c_2}{T_2}\Delta\beta \quad (22)$$

식 (11)과 식 (19) 그리고 식 (22)을 이용하여 상태방정식을 만들면 식 (23)가 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} & -\frac{B_3}{T_d R_d} & \frac{B_4}{T_d R_d} \\ \frac{k_1}{T_1} & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ \frac{k_2 c_2}{T_2} & 0 & -\frac{1+k_2 c_1}{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (24)$$

b) Open Loop 소호각제어의 경우에는 식 (13)과 식 (19)에 의해 다음과 같은 수식을 구할 수 있다.

$$\frac{d\Delta I_d}{dt} = \frac{1}{T_d R_d} (B_1 - B_2 - R_d + \frac{B_4 c_1}{c_2}) \Delta I_d - \frac{B_3}{T_d R_d} \Delta \alpha \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_d R_d} (B_1 - B_2 - R_d + \frac{B_4 c_1}{c_2}) & -\frac{B_3}{T_d R_d} \\ \frac{k_1}{T_1} & -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (27)$$

● 정류기 : 정전류 제어기, 인버터 : 정전압 제어기

이 경우에는 식 (9)과 식 (14)에 의해서 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = -\frac{k_3 B_1}{T_3} \Delta I_d - \frac{1+k_3 B_4}{T_3} \Delta\beta \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} & -\frac{B_3}{T_d R_d} & \frac{B_4}{T_d R_d} \\ \frac{k_1}{T_1} & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ -\frac{k_3 B_1}{T_3} & 0 & -\frac{1+k_3 B_4}{T_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (29)$$

● 정류기 : 정전압 제어기, 인버터 : 정전류 제어기

이 경우에는 식 (13)과 식 (17) 그리고 식 (19)을 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\Delta\alpha}{dt} = \frac{k_6 B_2}{T_6} \Delta I_d + \frac{1+k_6 B_3}{T_6} \Delta\alpha \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} & -\frac{B_3}{T_d R_d} & \frac{B_4}{T_d R_d} \\ \frac{k_6 B_2}{T_6} & \frac{1+k_6 B_3}{T_6} & 0 \\ -\frac{k_4}{T_4} & 0 & \frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (31)$$

식 (24)에서 보여주는 상태 방정식을 이용하여 안정도를 판별하기 위해서 특성 근을 도입하면 다음과 같다.

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (32)$$

따라서 식 (24)의 특성 방정식은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\lambda^3 - (a_{11} + a_{22} + a_{33})\lambda^2 + (a_{11}a_{22} + a_{22}a_{33} + a_{33}a_{11})\lambda - (a_{12}a_{21} + a_{13}a_{31})\lambda + a_{12}a_{21}a_{33} + a_{13}a_{31}a_{22} - a_{11}a_{22}a_{33} = 0 \quad (33)$$

$$\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C = 0 \quad (34)$$

식 (24)에서, 특성 근의 실수부가 전부 부(Negative)가 되어야 한다. 따라서 다음과 같은 조건이 성립해야 한다.

$$A = -(a_{11} + a_{22} + a_{33}) > 0 \quad (35)$$

$$B = a_{11}a_{22} + a_{22}a_{33} + a_{33}a_{11} - a_{12}a_{21} - a_{13}a_{31} > 0 \quad (36)$$

$$C = a_{12}a_{21}a_{33} + a_{13}a_{31}a_{22} - a_{11}a_{22}a_{33} > 0 \quad (37)$$

$$AB - C > 0 \quad (38)$$

식 (27)에서 보여주는 상태 방정식을 같은 방법으로 안정도를 판별하면 다음과 같은 조건이 성립된다.

$$\left. \begin{matrix} A = -(a_{11} + a_{22}) > 0 \\ B = (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) > 0 \end{matrix} \right\} \quad (39)$$

3. 시뮬레이션 및 검토

본 장에서는 2-2장에서 논한 HVDC제어기 축약 모델을 2-1장에서 논한 HVDC제어기 상수를 포함한 교류계통과 직류계통 모델에 적용하여 HVDC 시스템 안정도 평가를 하고자 한다. 안정도를 판별하고자하는 적용대상은 현재 우리나라 제주-해남 간에 설치되어 150[MW]로 운전되고 있는 제주-해남 HVDC로써 정상 상태에서는 해남 정류기 측에서 주제어기로 전압제어기를 가지고 있

으며, 보조제어기로 전류제어기를 가지고 있다. 또한, 제주 인버터 측에서는 주제어기로 전류 제어기를 사용하고, 보조제어기로 v 제어기를 사용하고 있다. 따라서 제어 계인의 타당성을 검증하기 위한 시나리오는 첫째로 정상 상태에서 해남 정류기 측에서 전압제어를 행하고 제주 인버터 측에서 전류제어를 행하는 경우에 AC계통의 강도가 어느 정도 떨어져도 HVDC시스템의 안정도가 유지되는지를 검토하는 것이며, 두 번째로 제주에서 AC계통 사고가 발생하여 제어 모드가 변경되는 경우에 AC계통의 강도가 어느 정도 떨어져도 HVDC시스템의 안정도가 유지되는지를 검토하는 것이다. 세 번째로, 평활 리액터 (Smoothing Reactor)는 DC전류를 평활 하는 기능을 가지고 있는 것으로 평활 리액터 값이 크면 전류제어의 속응성이 떨어지고, 평활 리액터 값이 작으면, 인버터 단에서 돌입전류가 증가하는 단점이 있기 때문에 평활 리액터 값과 전류의 속응성 관계를 검토하는 것이다.

그림 8은 위에서 구한 방식을 이용하여 안정한 영역에서 동작하도록 제어계인을 구한 경우에 제주-해남 HVDC시스템의 응답 파형을 보여주는 것으로 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서도 안정한 동작을 보여주고 있다. 그림 9은 그림 8과 마찬가지로 위에서 구한 방식을 이용하여 불안정한 영역에서 동작하도록 제어계인을 구한 경우에 제주-해남 HVDC시스템의 응답 파형을 보여주는 것으로 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서 HVDC시스템의 동작이 불안한 것을 알 수 있다.

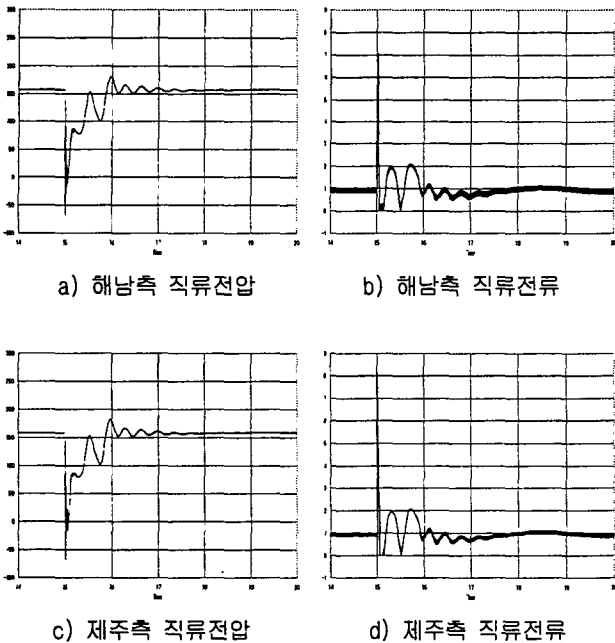


그림 8 안정한 영역에서 제어계인을 선정할 경우의 HVDC응답
Fig. 8 HVDC Responses in case of stable region

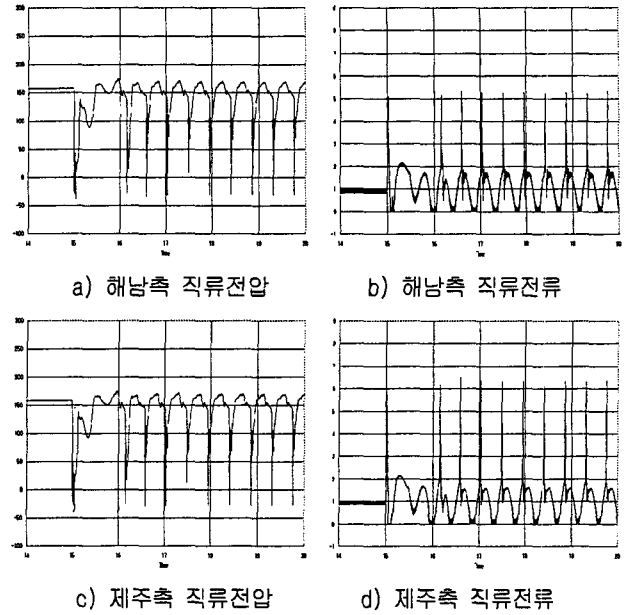


그림 9 불안정한 영역에서 제어계인을 선정할 경우의 HVDC응답
Fig. 9 HVDC Responses in case of unstable region

4. 결 론

본 논문에서는 축약모델에서 HVDC시스템의 안정도와 제어계인을 구하는 방식을 제안하였다. 본 논문에서 구한 방식은 과도현상에서 제어 계인을 정확하게 구하기 전에 대략적인 제어계인의 영역이나 범위를 구하여 상세한 과도모델에 이용할 수 있는 방식을 제안한 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Reeve, J.A Baron and G.A Hnaley, "A Technical Assessment of Artificial Commutation of HVDC Converters" IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-87, no. 10, October 1968, pp 1830-1840.
- [2] A.M. Gole and R.W. Menzies, "Analysis of Certain Aspects of Forced Commutated HVDC Inverters", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, NO. 5, May 1981, pp 2258-2262.
- [3] H.M Turanli and R.W. Menzies, "Feasibility of DC Transmission with Forced Commutation to Remote Loads", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No. 6, June 1984, pp: 1256-1262.
- [4] T. Jonnson and P.Bjorklund, "Capacitor Commutated Converters for HVDC" Stockholm PowerTech, June 1995, Proceedings: Power Electronics, pp 44-51.