

교류-직류 연계계통에 있어서 직류제어방식의 비교연구

論 文
45~4~3

A Study on Comparative Analysis of Direct Current Control in A.C.-D.C. Interconnected Power System

鄭亨煥* · 王龍泌** · 安秉喆*** · 李光雨***

(Hyeng-Hwan Chong · Yong-Peel Wang · Byung-Chul An · Kwang-Woo Lee)

Abstract - In this paper, as a part of the method improving stability, the load-flow calculation in D.C. power system and the models for stability analysis are studied with A.C.-D.C. interconnected power systems transmission performed. Moreover, the theory is established in relation to each control method of D.C. power systems. Then the stability of A.C.-D.C. interconnected power systems is compared and considered by the way of dividing the operating control method of the rectifier inverter converter into ACR-AVR, APR-AVR, AQR-ACR. The dynamics characteristic of terminal voltage, frequency, active-reactive power and rotor angle of the generator with disturbances and load fluctuations is considered. In addition, the characteristic of direct voltage, direct current, power and control systems. From this the comparative analysis of the direct current control method, the possibility of the stability analysis of A.C.-D.C. interconnected power system is considered.

Key Words : A.C.-D.C. Interconnected Power System, Direct Current Control, Rectifier-Inverter

1. 서 론

현재의 교류송전 방식은 전력의 생산과 분배가 쉽기 때문에 널리 사용되고 있으나, 무효전력의 발생, 선로에 의한 전력손실 및 전력제어의 어려운 점 등이 단점으로 되어 있다. 이로 인한 계통의 안정도는 오히려 저하하여 양질의 전력계통에 대한 지속적인 대책의 하나로 직류송전(direct current transmission)을 꼽을 수 있으며, 특징으로는 교류송전에 비해 초기 설비비는 높으나 교류송전의 단점을 보완할 수 있기 때문에 장거리 또는 해저케이블 송전인 경우 더욱 선호대상이 되고 있다. 또한 직류송전은 계통 안정도의 문제가 적고, 비동기 연계가 가능하며, 교류계통의 단락용량을 증가하지 않고 계통을 연계할 수 있으며, 신속한 조류제어가 가능하여 주파수 제어나 안정도 향상에 유효하다[1~5].

오늘날 직류송전의 필요성이 절실히 요구되고 있는 가운데, 교류-직류연계계통의 운용과 안정도 향상에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[6~10].

Y. Yoshida[11] 등은 순·역변환기 제어계를 1차 지연요소로 근사화하여 정상시 평형점 부근에서의 미소 교란에 대해서 교류-직류계통 조건과 변환기의 제어조건이 전압안정도에 미치는 영향을 보고하였다. T. Hayashi[12] 등은 선형화한 상태방정식 모델을 구성하고 고유치 해석에 따라 직류송전 계통과 교류송전 계통의 상호작용에서 일어나는 진동주파수에 대한 불안정 현상을 해석하였다. K. Takenaka[13] 등은 전형적인 교류-

직류 연계모델 계통을 대상으로 하여 고유치 판별법에 의한 진동모델 해석 수법을 이용하여 계통의 안정성을 결정하는 주요 진동을 해석하였으며, 주요 진동모델의 특성과 그 안정한계를 고찰하였다. 吉野輝雄[14] 등은 직류송전에 있어서 교직변환기를 사이리스터 브리지로 해서 순·역변환기에 대한 제어를 아날로그 시뮬레이터를 이용하여 직류계통의 안정성을 보고하였다. E. N. Diaynas[15] 등은 HVDC bipolar transmission system의 확실한 지표를 평가하기 위하여 향상된 계산방법을 제안하고, 개발된 모델과 계산기법으로 시스템 특성과 운전방식을 시뮬레이션하였다.

본 논문에서는 안정도를 향상시키는 방법의 일환으로 교류-직류 연계송전을 함에 있어 직류계통의 조류계산과 안정도 해석용 모델에 대하여 연구하였다. 또한 직류계통의 각 제어방식에 관한 이론을 정립하여 순·역변환기의 운전제어방식을 정전류-정전압제어, 정전력-정역유각제어, 정점호각-정전류제어 방식으로 구분하여 교류-직류연계계통의 안정도를 비교·고찰하였다. 또한 외란 및 부하변동에 따른 발전기의 단자전압과 주파수, 유효·무효전력, 회전자각의 동특성을 고찰하고, 직류계통에 있어서는 직류전압과 전류, 전력 그리고 변환기의 제어각 특성을 검토하였다.

2. 교류-직류연계계통의 방정식

본 연구에서 고찰하고자 하는 대표적인 교류-직류연계계통 모델은 그림 1과 같으며, 동기 발전기에서 2단자 직류선로와 교류선로가 병렬로 연결되어 무한대 모선에 공급하고 있다. 직류계통 모델은 교류-직류변환기가 사이리스터(thyristor) 밸브로 구성되어 있으며, 전력을 양방향으로 전송할 수 있는 two terminal back to back bipolar HVDC 계통으로 국외에서는 표준화되어 있는 실정이다[4,8,16~18].

* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授·工博

** 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程 修了

接受日字 : 1995年 6月 13日

最終完了 : 1996年 3月 8日

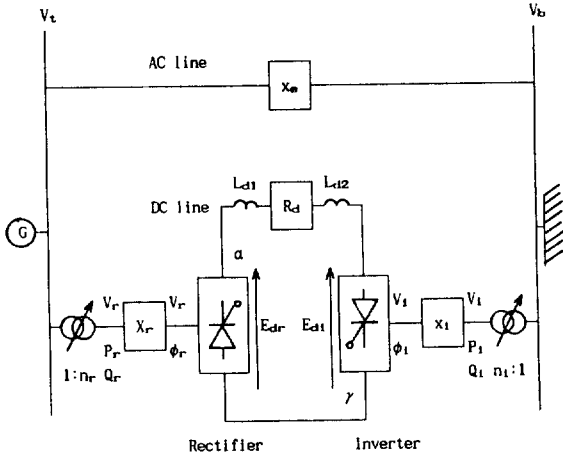


그림 1 교류-직류 연계시스템의 1기 무한대모선 모델
 Fig. 1 Simplified single machine infinite bus A.C.-D.C. interconnected systems

2.1 교류시스템 방정식

동기 발전기 단자에서의 전압, 전류 및 전력을 직축과 횡축 성분으로 나타내면 식(1)~(6)과 같이 표현된다[4,18]. 단, 전기자 저항과 교류선로의 저항은 무시한다.

$$V_d = i_q X_q \tag{1}$$

$$V_q = E_q' - X_d' i_d \tag{2}$$

$$P_e = V_d i_d + V_q i_q \tag{3}$$

$$Q_e = V_q i_d - V_d i_q \tag{4}$$

$$V_i^2 = V_d^2 + V_q^2 \tag{5}$$

$$i_i^2 = i_d^2 + i_q^2 \tag{6}$$

또한 동기 발전기의 운동방정식은 다음의 식(7), (8)로 표현된다.

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \tag{7}$$

$$\frac{d \Delta \delta}{dt} = \Delta \omega \tag{8}$$

2.2 직류시스템 방정식

교류시스템의 유효전력 P와 무효전력 Q의 분포를 지배하는 것은 전압과 위상각이지만 직류시스템은 P만이 전달되고 그 크기는 직류전압과 전류에 좌우된다. 순변환기의 점화각 α 제어에 따라 변환기에 유입되는 교류전류의 기본과 성분의 위상이

변화하기 때문에 교류측에서 본 변환기는 유효전력뿐만 아니라 무효전력도 소비한다고 할 수 있다.

따라서 변환기는 교류계통에 연결되어 있는 하나의 P-Q지정부하라고 가정한다. 교류측에서 본 변환기의 소비전력(P와 Q)을 결정하기 위해서 직류전류(혹은 전력)와 전압을 임의의 값으로 설정한다. 또한 점화각 α 와 여유각 γ 의 초기값을 설정하여 변환기의 교류 공급전압이 변압기의 탭조정 범위내에 수렴하도록 반복 계산한다. 역변환기에서 최소 여유각 γ_{min} 으로 고정시킨 경우는 소호각 β 를 설정하여 계산한다[16~19, 21~23].

2.2.1 교·직변환기의 기본특성

교류-직류계통의 조류계산을 하기 위하여 변환기의 기본특성을 고찰한다. 여기서 변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시한다. 그림 2는 순변환기를 나타내는 등가회로이다.

그림 1과 2를 기초로 하여, 순변환기측에서 점화각 α 로 운전하는 경우, 변환기의 교류전류 I와 직류전류 I_d 는 식(9), (10)과 같이된다.

$$I \cong \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi} \tag{9}$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}(V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma)}{\pi R_d + 3(X_r - X_i)} \tag{10}$$

여기서 X_r, X_i 는 전류(commutation)리액턴스, R_d 는 직류선로 저항, V_r, V_i 는 변환기의 교류측 전압이다.

점화각 α 일 때의 직류발생전압 즉 무부하전압 E_{dro} 는 식(11)과 같다.

$$E_{dro} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_r \cos \alpha \tag{11}$$

변환기에 부하를 걸어서 직류전류 I_d 를 흘리면 전류리액턴스의 강하를 가지므로 순변환기측의 직류전압 E_{dr} 은 식(12)와 같이 얻어진다.

$$E_{dr} = E_{dro} - \frac{3}{\pi} X_r I_d = E_{di} + I_d R_d \tag{12}$$

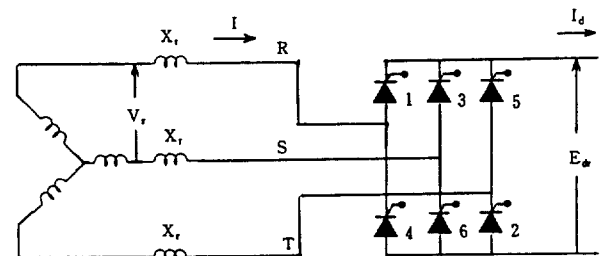


그림 2 순변환기 회로
 Fig. 2 Three phase two way rectifier circuit

따라서 역변환기 측에서도 동일한 방법으로 직류전압 E_{di} 를 얻을 수 있으며, 여유각을 최소 여유각 γ_{min} 으로 고정시키고 소호각 β 로 제어하는 경우는 식(13)으로 구할 수 있고, 이때의 소호각 β 는 식(14)와 같다.

$$E_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_i I_d \quad (13)$$

$$\cos \beta = \cos \gamma_{min} - \frac{\sqrt{2} X_i I_d}{V_i} \quad (14)$$

이제 순변환기는 점호각 α 로, 역변환기는 여유각 γ 로 운전한다고 할 때 순·역변환기의 교류측 전압과 전류, 그리고 이들 간의 위상각을 구하는 과정은 다음의 순서를 밟는다.

가) 순변환기측

그림 2에서 전압 V_r' 와 전류 I 의 역율각을 ϕ_r 이라고 하면 전달되는 전력은 식(15)와 같고, 식(9)와의 관계에서 식(16)을 얻을 수 있다.

$$P_r = \sqrt{3} V_r' I \cos \phi_r = E_{dr} \cdot I_d \quad (15)$$

$$V_r' \cos \phi_r = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} E_{dr} \quad (16)$$

순변환기측에서 변압기의 2차 전압 V_r , 변환기에 가해진 전압 V_r' , 변압기에 흐르는 전류 I 의 벡터도는 그림 3과 같다. 여기서 식(17), (18)이 얻어진다.

$$\left\{ \frac{V_r}{\sqrt{3}} \right\}^2 = \left\{ \frac{V_r'}{\sqrt{3}} \sin \phi_r + I X_r \right\}^2 + \left\{ \frac{V_r'}{\sqrt{3}} \cos \phi_r \right\}^2 \quad (17)$$

$$\frac{V_r}{V_r'} = \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r} \quad (18)$$

또한, 식(12)와의 관계에서 점호각 α 는 식(19)로 표현된다.

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d X_r}{V_r'}}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2 \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r}} \quad (19)$$

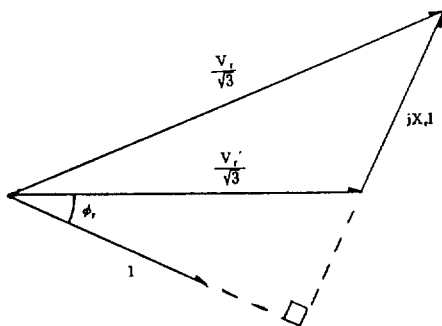


그림 3 교류측 전압, 전류 벡터도
Fig. 3 Phasor used in converter theory

한편, 식(16)에서

$$\frac{1}{V_r'} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\cos \phi_r}{E_{dr}}$$

이므로 이것을 식(19)에 대입하면 위상각 ϕ_r 은 식(20)과 같이 얻어진다.

$$\tan \phi_r = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{dr} + 3I_d X_r}{\pi E_{dr} \cos \alpha} \right\}^2 - 1} - \frac{18I_d X_r}{\pi^2 E_{dr}} \quad (20)$$

따라서 순변환기의 교류측 전압 V_r , V_r' 및 전류 I 는 식(21), (22)의 관계를 구할 수 있고, 또한 소비되는 전력은 식(23)으로 표현된다.

$$V_r' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{dr}}{\cos \phi_r} \quad (21)$$

$$V_r = V_r' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r} \quad (22)$$

$$P_r = \sqrt{3} V_r' I \cos \phi_r \quad (23)$$

$$Q_r = \sqrt{3} V_r' I \sin \phi_r + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_r$$

나) 역변환기측

역변환기에서도 동일한 형태로 구성되는데, 다만 $V_r \rightarrow V_i$, $V_r' \rightarrow V_i'$, $E_{dr} \rightarrow E_{di}$, $X_r \rightarrow X_i$, $\phi_r \rightarrow \phi_i$, $\alpha \rightarrow \gamma$ 로 이루어지며, 역변환기측의 직류전압 E_{di} , 교류측의 변압기 2차전압 V_i 와 위상각 ϕ_i 의 관계는 식(24)~(27)과 같게 된다.

$$E_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i \cos \gamma - \frac{3}{\pi} I_d X_i \quad (24)$$

$$\tan \phi_i = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{di} + 3I_d X_i}{\pi E_{di} \cos \gamma} \right\}^2 - 1} - \frac{18I_d X_i}{\pi^2 E_{di}} \quad (25)$$

$$V_i' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{di}}{\cos \phi_i} \quad (26)$$

$$V_i = V_i' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{I X_i}{V_i'} \right\}^2 + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{I X_i}{V_i'} \right\} \sin \phi_i} \quad (27)$$

여기서 V_i' 는 역변환기의 교류측전압이다. 따라서 역변환기에서 소비되는 전력은 식(28)로 표현된다.

$$P_i = \sqrt{3} V_i' I \cos \phi_i \quad (28)$$

$$Q_i = \sqrt{3} V_i' I \sin \phi_i + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_i$$

이상에서 모든 동작상태가 구해진다. 또한 직류선로에서 계통 방정식은 변환기용 변압기 탭 설정시 변압기의 탭조정 범위 내의 경우와 변압기의 탭조정 범위 외의 경우로 구분할 수 있다.

2.2.2 변압기의 탭조정 범위 내의 경우

역변환기의 직류측 전력 P_{is} , 직류전압 E_{di} 로 지정되어 있다고 하고 순변환기 점호각 α 가 어떤 값으로 고정되고, 역변환기의 여유각 γ 가 최소여유각 γ_{min} 으로 유지되어 있는 것으로 한다(이 경우 변압기의 tap위치 n_r, n_i 는 미정). 이러한 지정조건을 두고 순변환기의 2차측 전압, 전류사이의 위상각 ϕ_r 을 구하여, 변환기에 가해진 전압과 변압기 2차측 전압을 계산한다.

$$I_d = \frac{P_{is}}{E_{di}} \tag{29}$$

$$E_{dr} = E_{di} + I_d R_d \tag{30}$$

역변환기에서도 위상각 ϕ_i 는 식(31)과 같고, 변환기에 가해진 전압, 변압기 2차측 전압을 계산한다.

$$\tan \phi_i = \sqrt{\left(\frac{\pi E_{di} + 3I_d X_i}{\pi E_{di} \cos \gamma_{min}}\right)^2 - 1} - \frac{18I_d X_i}{\pi^2 E_{di}} \tag{31}$$

다음에 변압기의 2차측 단자에서 본 경우, 순변환기는 유효전력, 무효전력을 소비하는 부하로 되고, 역변환기는 유효전력을 발생하고, 무효전력을 소비하는 부하로 되지만, 순·역변환기를 각각의 1개의 부하로 간주하여 순·역변환기에서 소비되는 전력을 계산한다.

이상에서의 P-Q를, 발전기 단자에서의 하나의 지정부하로 보고 교류계통의 조류계산을 행한다. 따라서 각 변환기용 변압기의 2차 전압인 V_r, V_i 가 1차 전압인 V_t, V_b 에 대해 변압기의 탭조정 범위내에 있을 경우, 권수비인 n_r 및 n_i 가 자동적으로 결정된다.

2.2.3 변압기의 탭조정 범위 밖의 경우

변압기의 탭 조정 범위가 좁은 경우, 즉 2차 전압인 V_r, V_i 가 1차 전압에 대해서 조정 범위 밖에 있는 경우는 $V_r/V_t, V_i/V_b$ 를 이용해서, 이 권수비에 가까운 권수비로 탭 위치를 고정시켜 두고 수정계산에 들어간다.

먼저 역변환기측의 교류측 역율을 계산하기 위해서 여유각 γ 를 γ_{min} 으로 고정시킨 다음, 각 직류전압을 새로 계산하고, 순변환기측의 역율은 식(21)을 이용하여 계산한다.

$$\cos \phi_i = \cos \gamma_{min} \sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_i}{V_i'} \right\}^2 + 2 \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_i}{V_i'} \right\} \sin \phi_i} - \frac{I_d X_i}{\sqrt{2} V_i'} \tag{32}$$

$$E_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i' \cos \phi_i \tag{33}$$

한편 $\cos \phi_r$ 에는 제어각 $\alpha=0$ 일 때의 최대치인 $(\cos \phi_r)_{max}$ 가 존재한다. 따라서 식(20)을 변형시키면 식(34)이 얻어진다.

$$(\cos \phi_r)_{max} = \sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2 \left\{ \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r} - \frac{I_d X_r}{\sqrt{2} V_r'} \tag{34}$$

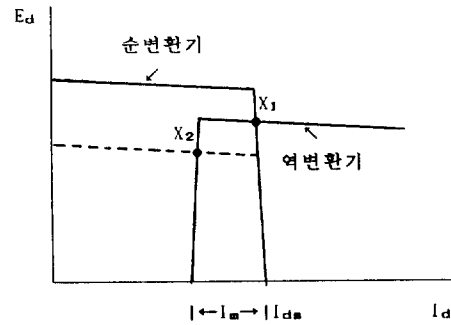


그림 4 순·역변환기의 동작특성

Fig. 4 Operation mode of two terminal d.c. system

정전류제어 및 정여유각제어를 행한 경우의 직류전압과 직류전류의 관계를 그림 4에 나타내었다. 여기서 운전상태를 알 수 있으며, 동작점 X_1 는 순변환기측에서는 정전류제어를 행하고, 역변환기측에서는 정여유각제어를 행하고 있는 상태이다. 동작점 X_2 는 순변환기측의 교류공급 전압이 역변환기의 공급전압에 비해서 너무 낮은 경우는 순변환기측에서 전압제어를 행하고, 역변환기측에서는 정전류제어를 행한다.

가) 순변환기에 의해 정전류가 행해지고 있는 경우

$(\cos \phi_r)_{max}$ 가 $\cos \phi_r$ 보다 크면, 순변환기에 의해 그대로 정전류 제어가 행해진다(그림 4의 X_1 점). 이 경우 역변환기측에서의 지정된 전력 P_{is} 에 따라 새로운 직류전류는 식(35)와 같이 얻어진다. 또한 ϕ_r, ϕ_i 를 기준으로 각 변환기에 소비되는 전력을 계산한다.

$$I_d = \frac{P_{is}}{E_{di}} \tag{35}$$

따라서 새로운 점호각 α 는 식(36)과 같이 구해진다.

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d X_r}{V_r'}}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2 \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r}} \tag{36}$$

나) 전류제어가 역변환기측으로 이동하는 경우

$(\cos \phi_r)_{max}$ 가 $\cos \phi_r$ 보다 적으면, 즉 순변환기측의 교류공급 전압이 역변환기의 공급전압에 비해서 너무 낮은 경우는 순변환기측에서 전압제어를 행한다(그림 4의 X_2 점). 이 때는 순변환기 측의 역율은 $(\cos \phi_r)_{max}$ 으로 유지시키고, 역변환기를 정전류 I_{ds} 제어로 하여, 그림 4와 같이 직류 전류는 기준 전류에서 여유전류 I_m 만큼 감소한 값으로 제어한다. 이 때 직류전압과 위상각은 식(38) ~ (40)과 같이 표현되고, 각 변환기에 소비되는 전력을 계산한다. 또한 여유각 γ 는 식(41)과 같다.

$$I_d = I_{ds} - I_m \tag{37}$$

$$E_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_r' (\cos \phi_r)_{max} \tag{38}$$

$$E_{di} = E_{dr} - I_d R_d \quad (39)$$

$$\cos \phi_i = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{di}}{V_i} \quad (40)$$

$$\cos \gamma = \frac{\cos \phi_i + \frac{I_d X_i}{\sqrt{2} V_i}}{\sqrt{1 + \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_i}{V_i} \right)^2 + 2 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_i}{V_i} \right) \sin \phi_i}} \quad (41)$$

이상의 교류-직류계통의 개략적인 과정인 흐름도를 표시하면 그림 5와 같다.

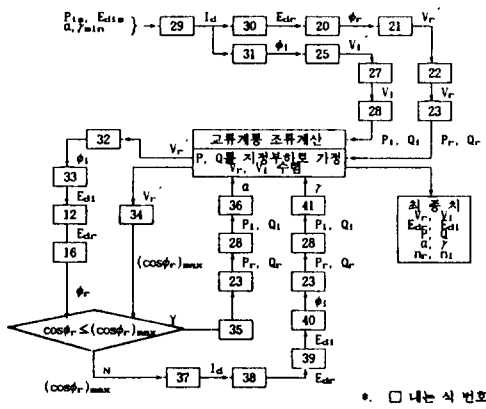
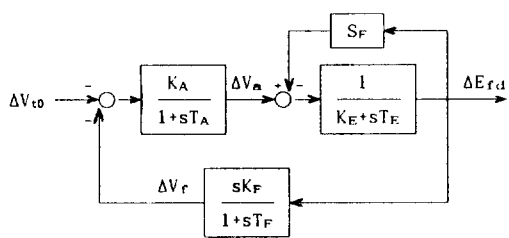


그림 5 교류-직류연계통 조류계산
Fig. 5 Calculation scheme for balancing A.C.-D.C. system power flow

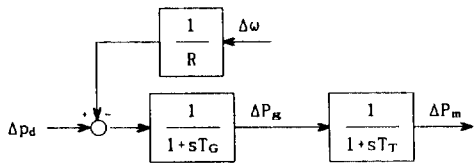
3. 제어계통의 동적 모델

3.1 여자제어계 및 주파수 제어계통

여자기 및 조속기제어 계통은 그림 6과 같다[8,9,18~23].



(a) Excitation control system



(b) Speed governor system

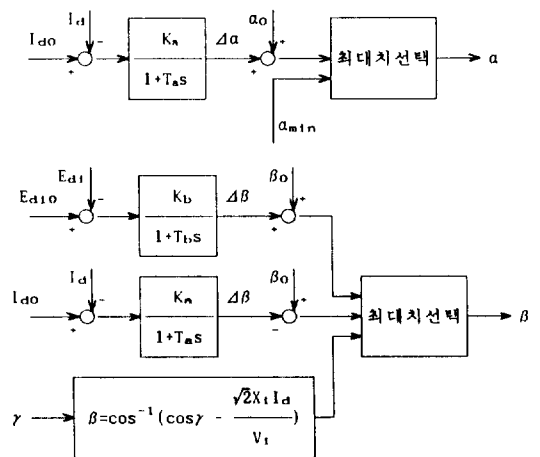
그림 6 여자제어계 및 주파수 제어계통
Fig. 6 Control system-IEEE type

3.2 직류 제어계통

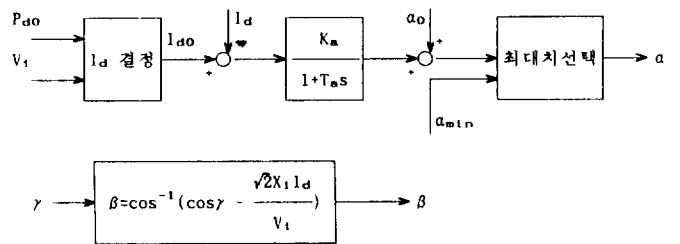
직류 송전계통에서의 송전은 교류 계통과는 전혀 다른 원리로 이루어지고, 직류 송전선의 양단에 설치된 순역변환기의 제어 특성에 의해서 전체적 특성이 크게 영향을 받는다.

통상 직류 계통에 사용되는 운전 형식은 일정전력 제어이고, 이를 위한 순역변환기에서의 제어 방식으로는 정전류 제어 (ACR), 정전압 제어 (AVR), 정점화각 제어 (AαR), 정여유각 제어 (AγR), 정전력 제어 (APR) 등이 있다[4,14~16].

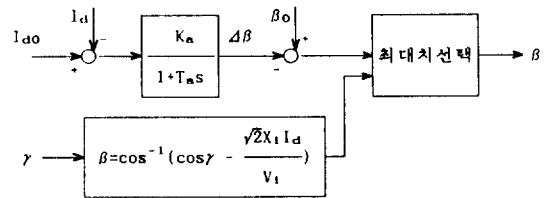
본 연구에서 고찰한 순변환기-역변환기의 운전 제어방식은 정전류-정전압제어, 정전력-정여유각제어, 정점화각-정전류제어 방식이다. 한편, 직류전류의 극한값으로는 변환기의 열적 손상 때문에 정격전류의 20%를 초과하지 않도록 하고, 또한 너무 낮을 경우는 일정전력 운전에 대해 과전압을 초래하여 전류 실패(commutation failure)가 될 수 있으므로 정격전류의 10% 이하로 내려가는 것을 피하고 있다. 그림 7은 각 제어방식의 제어계통의 블록선도이다.



(a) 정전류·정전압제어



(b) 정전력·정여유각제어



※ 순변환기 점화각 α = α_min으로 고정
(c) 정점화각·정전류제어

그림 7 직류제어계통의 블록선도
Fig. 7 Block diagram of control circuit in D.C. system

그림 1에서 평활 코일(smoothing coil) L_d 를 갖는 직류선로의 전압방정식과 그림 7의 블록선도로 부터 점호각 α , 소호각 β 를 상태벡터로 하는 각 제어방식의 동특성 방정식은 식(42)~(44)와 같다.

· ACR- AVR 제어

$$L_d \frac{dI_d}{dt} = E_{dr} - R_d I_d - E_{di}$$

$$\frac{d\Delta\alpha}{dt} = -\frac{1}{T_a} \Delta\alpha + \frac{K_a}{T_a} \Delta I_d$$

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = -\frac{1}{T_b} \Delta\beta + \frac{K_b}{T_b} \Delta E_{di}$$

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = -\frac{1}{T_a} \Delta\beta + \frac{K_a}{T_a} \Delta I_d$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\cos \gamma - \frac{\sqrt{2} X_i I_d}{V_i} \right)$$

· APR- A γ R 제어

$$L_d \frac{dI_d}{dt} = E_{dr} - R_d I_d - E_{di}$$

$$\frac{d\Delta\alpha}{dt} = -\frac{1}{T_a} \Delta\alpha + \frac{K_a}{T_a} \Delta I_d$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\cos \gamma - \frac{\sqrt{2} X_i I_d}{V_i} \right)$$

· A α R- ACR 제어

$$L_d \frac{dI_d}{dt} = E_{dr} - R_d I_d - E_{di}$$

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = -\frac{1}{T_a} \Delta\beta + \frac{K_a}{T_a} \Delta I_d$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\cos \gamma - \frac{\sqrt{2} X_i I_d}{V_i} \right)$$

이상의 1, 2절에서 언급한 특성방정식에서 동적인 안정도를 유지하기 위해서는 평형 운전점에서 발생할 수 있는 미소 외란에 대하여 제어계통이 항상 안정하게 운전할 수 있는지를 판정한다. 따라서 평형 운전점 부근의 미소 변화분을 고찰함으로써 해석할 수 있다.

지금 교류-직류연계계통에서 교류계통의 상태 방정식과 직류계통의 상태방정식은 식(45)로 주어진다 고 하자.

$$\dot{X}_{ac} = A_{ac} X_{ac} + B_{ac} U_{ac}$$

$$\dot{X}_{dc} = A_{dc} X_{dc} + B_{dc} U_{dc}$$

단, $X_{ac,dc}$: 상태 벡터, $U_{ac,dc}$: 제어 벡터

운전점이 $X_{ac0,dc0}$, $U_{ac0,dc0}$ 에서 평형을 이루고 있다면, 상태 방정식을 운전점 부근의 미소 변화분인 식(46)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \dot{X}_{ac} = A_{ac} \Delta X_{ac} + B_{ac} \Delta U_{ac}$$

$$\Delta \dot{X}_{dc} = A_{dc} \Delta X_{dc} + B_{dc} \Delta U_{dc}$$

단, $\Delta X_{ac} = X_{ac} - X_{ac0}$, $\Delta U_{ac} = U_{ac} - U_{ac0}$
 $\Delta X_{dc} = X_{dc} - X_{dc0}$, $\Delta U_{dc} = U_{dc} - U_{dc0}$

4. 컴퓨터 해석 및 결과 고찰

시뮬레이션에 사용한 발전기, 선로 및 제어계의 정수는 표 1와 같고, 또한 전체적인 흐름도는 그림 8과 같다.

교류계통과 직류계통이 연계하는 경우에 직류전력의 변동이 특히 교류계통의 주파수에 영향을 미칠 수 있으므로 주파수를 규정범위내에서 유지시키기 위하여 발전기의 조속기 제어계와 직류 계통간의 협조제어가 필요하다. 즉 직류전력 또는 직류전류를 발전기의 조속기제어계로 보내고 직류전력의 변동에 대응하여 조속기제어계를 동작시켜 계통의 주파수를 제어하도록 한다. 여기에서는 직류전력의 편차를 조속기제어계의 입력신호로

표 1 계통 정수
 Table 1 System parameters

A.C. system			
M = 0.0138 [sec ² /rad]	$\delta_0 = 40.0$ [deg]		
D = 0.0138 [sec/rad]	$X_d = 1.0$ [p.u.]		
$X_q = 0.6$ [p.u.]	$X_d' = 0.4$ [p.u.]		
$T_{d0}' = 8.0$ [p.u.]	$X_e = 0.66$ [p.u.]		
$S_E = 0.3$ [p.u.]	R = 0.3 [p.u.]		
$K_A = 500.0$ [p.u.]	$K_E = -0.02$ [p.u.]		
$K_F = 0.1$ [p.u.]	$K_R = 1.0$ [p.u.]		
$T_A = 0.04$ [sec]	$T_E = -0.1$ [sec]		
$T_F = 1.0$ [sec]	$T_G = 0.01$ [sec]		
$T_R = 0.06$ [sec]	$T_T = 0.3$ [sec]		
$\omega_0 = 377.0$ [rad/sec]	$V_b = 1.0$ [p.u.]		
D.C. system			
$L_d = 0.032$ [p.u.]	$R_d = 0.012$ [p.u.]		
$X_r = 0.1$ [p.u.]	$X_i = 0.1$ [p.u.]		
$K_a = 0.1$ [p.u.]	$K_b = 1.0$ [p.u.]		
$T_a = 1.0$ [sec]	$T_b = 1.0$ [sec]		

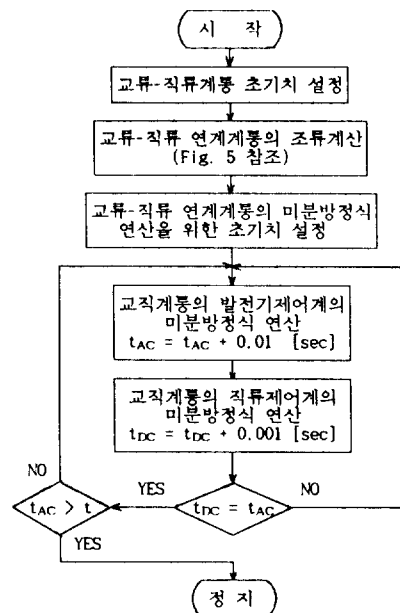


그림 8 교류-직류연계계통의 계산흐름도
 Fig. 8 Flowchart of the dynamic response in A.C.-D.C. system

부가하여 직류계통의 전력변동에 대응하는 주파수 제어가 이루어지도록 하였다. 교류계통에 교류선로와 제어계통을 포함하는 상태변수는 $X_{ac} = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E_q', \Delta V_t, \Delta P_m, \Delta V_a, \Delta E_{fd}, \Delta P_g]^T$ 이고, 직류계통에 직류선로와 제어계통을 포함하는 상태변수는 $X_{dc} = [\Delta I_d, \Delta\alpha, \Delta\beta]^T$, $U_{dc} = [\Delta E_{dr}, \Delta E_{di}]$ 이며, 교류계통의 제어요소는 두지 않았다. 교류 계통의 샘플링 주기는 0.01[sec]로 하였으며, 직류계통의 샘플링 주기는 교류계통의 주기를 다시 10등분한 0.001[sec]로 하였다. 이것은 직류 계통이 교류 계통에 비해서 변화의 속도가 빠르므로 교류계통의 한 시점과 다음 시점 사이를 세분할 필요가 있기 때문에 직류 계통의 샘플링 주기를 짧게 잡는다. 즉 교류 계통의 한 시점에서 다음 시점에 달할 때까지는 교류계통의 전압과 전류는 불변이라 가정하고 직류 계통의 계산을 진행시킨다. 또한 다음 시점의 교류 계통을 계산할 때는 직류 계통의 마지막 시점의 값을 교류 계통 계산에 적용한다. 직류제어계통에서 순·역변환기측이 정전류-정전압제어(case 1), 정전력-정여유각제어(case 2), 정점호각-정전류제어(case 3)를 행하고 있을 때 순변환기측은 α 가 제어되는 반면 역변환기측은 소호각 β 가 제어된다. 또한 case 1, case 2, case 3은 미소외란에 의해 순변환기측의 교류전압이 저하한 경우, 순변환기는 점호각 α 를 적게 함으로써 소요무효전력을 감소시켜 교류전압의 저하를 억제하는 방향으로 동작하고, 역변환기는 소호각 β 를 적게 하여 교류전압의 저하를 억제시키게 된다. 각 경우는 다음과 같은 지정조건 아래에서 시뮬레이션하였다. case 1은 순변환기측 직류전류와 역변환기측 직류전압, case 2는 순변환기측 직류전력과 역변환기측 여유각, case 3은 순변환기측 점호각을 α_{min} 을 고정, 역변환기측 직류전류를 지정하였다. 표 2는 각 경우의 제어설정치를 나타낸다.

case 1의 경우, 순변환기측은 직류전류를 입력으로 한 점호각 α 가 설정 점호각 α_{min} 보다 항상 크게 제어되고, 역변환기측은 직류전압, 전류 및 여유각을 입력으로 최대 소호각 β 를 선택하여 제어된다. case 2의 경우, 순변환기측은 직류전력방정식(직류송전선의 전력방정식)에서 직류전류를 입력으로 하여 case 1인 경우와 같이 제어되고, 역변환기측은 여유각만을 입력으로 해서 소호각 β 가 제어된다. case 3의 경우, 순변환기측은 case 1, case 2와는 달리 점호각 $\alpha = \alpha_{min}$ 일정하게 제어되고, 역변환기측은 직류전류와 여유각을 입력으로 최소소호각 β 를 선택하여 제어된다.

부가가 0.1[sec]사이 정격출력 3% 증가한 경우 case 1, case 2, case 3의 동특성을 그림 9에 각각 나타내었다.

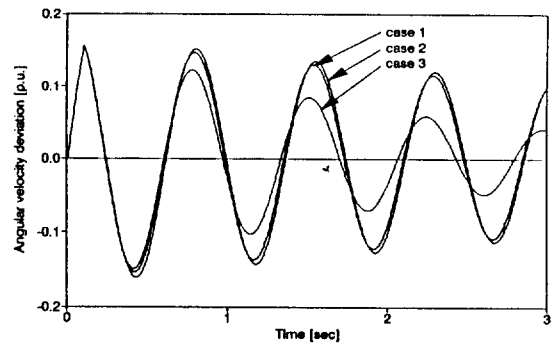
회전자각 편차의 특성을 살펴보면, case 1, case 2는 거의 비슷한 특성을 보이고 있는 반면, case 3은 오버슈트(overshoot),

표 2 직류제어계의 제어설정치

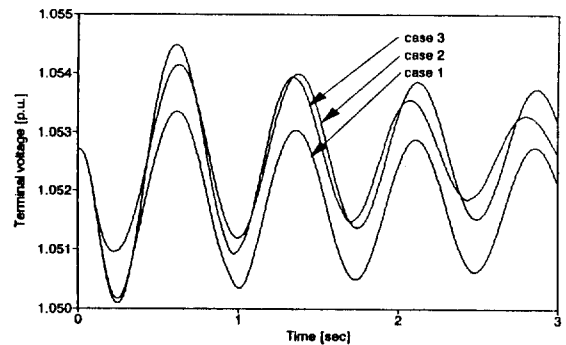
Table 2 Setting control values of direct current control system

제어방식	순변환기측	역변환기측
정전류·정전압제어	0.2[p.u.]	1.0[p.u.]
정전력·정여유각제어	0.3[p.u.]	20.0[deg]
정점호각·정전류제어	20.0[deg]	0.2[p.u.]

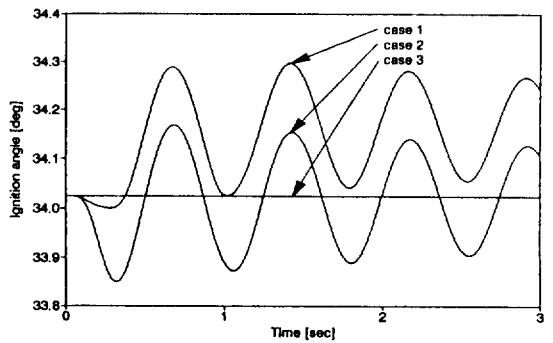
수렴시간(settling time) 및 도달시간(reaching time)에 있어서 우수한 특성을 보이고 있다. 또한 단자전압 특성도 case 3의 경우가 속응성이 우수하게 나타났다. 여기서는 회전자각 편차와는 달리 case 2가 case 1 보다 우수한 특성을 보이고 있는데, 그 이유로는 순변환기측에 정전력 제어로 인하여 직류전압을 높여 변환기에 소비되는 무효전력을 적게 하기 때문이다. 더불어 직류계통의 제어특성을 살펴보면, 순변환기측의 직류전압은 case 3의 경우가 case 1, case 2의 경우에 비해 우수한 특성을 보이고 있으며, 직류전류의 특성도 같은 특성을 보이고 있다. 이와 같은 결과로 교류-직류계통에 있어서 case 3의 경우가 외란시에 우수한 속응성을 가지며, 계통의 안정도를 항상 시켜 안정운전에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 이의 결과에 따라 교류-직류연계계통에서 직류제어방식에 따른 양쪽 변환기의 제어효과에 따라 안정도에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 즉 각 제어방식에서 정점호각-정여유각 제어방식이 교류-직류연계계통의 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있다.



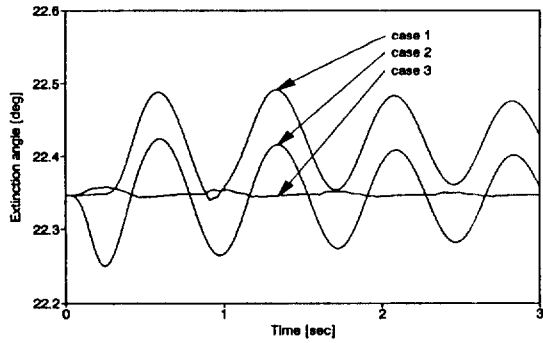
(a) Angular velocity $\Delta\omega$



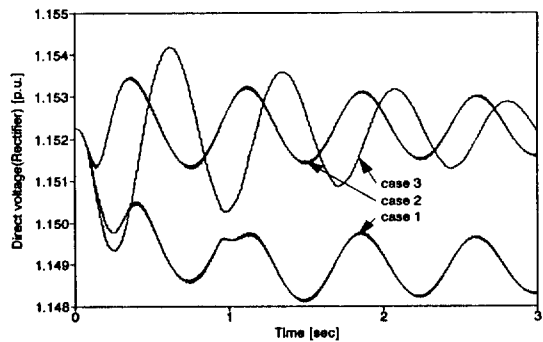
(b) Terminal voltage V_t



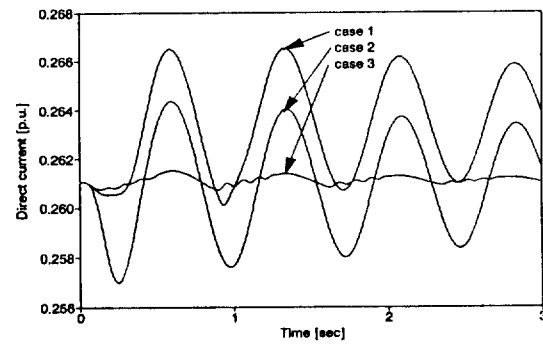
(c) Ignition angle α



(d) Extinction angle β



(e) Direct voltage E_{dr}



(f) Direct current I_d

그림 9 미소 전력 증가시의 응답

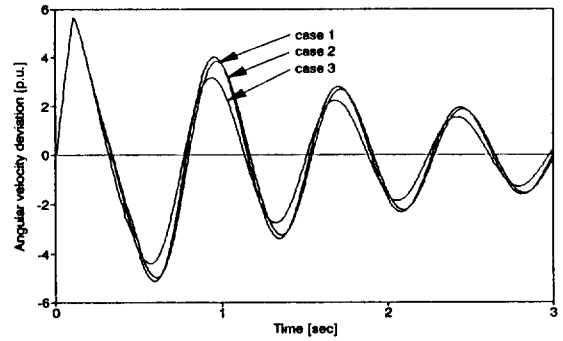
Fig. 9 Response to increasing power 3%, disturbance duration 100ms

그림 10은 교류-직류 연계 계통중 교류선로가 단자모선 근처에서 3상 단락이 발생하여 0.1[sec]후 고장이 회복된 경우의 특성을 나타낸 것이다.

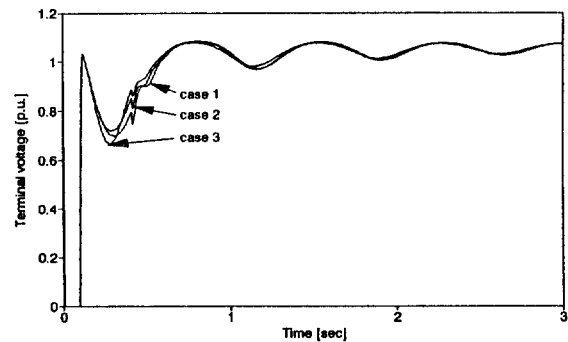
3상 단락과 같은 부하변동이 큰 경우는 미소 변동분만으로 해석할 수 없고, 내부 기전력과 회전자각에 대한 상태변수는 변동분이 아닌 실제값을 변수로 취하고 외란전 상태에 대한 조류계산을 하여 단자전압과 위상각을 구하고 초기값을 선정할 필요가 있다.

고장발생후 교류계통은 바로 송전이 가능하지만, 직류송전 경우에는 재송전을 하는데 수백 ms의 기동시간이 필요하다. 이는 고전압 대전류에 의한 변환장치의 보호에도 관계되지만, 교류계통에 급격한 부하변동 요인이 되어 계통이 다시 무너질 우

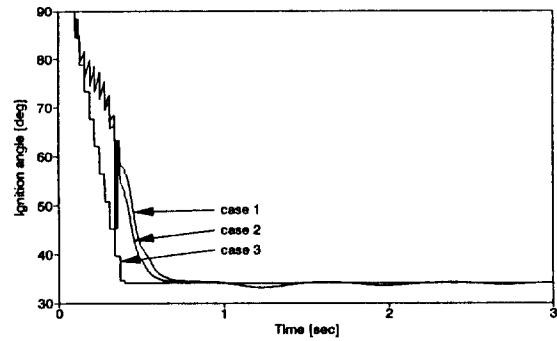
려가 있기 때문이다. 따라서 초기 기동시에도 마찬가지로, 고장발생 후 재기동시에도 수백 ms에 이르는 시간을 두고 기동한다. 기동 또는 재기동을 할 경우 우선적으로 순·역변환기의 제



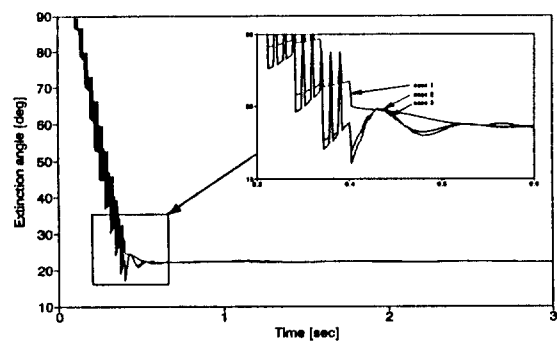
(a) Angular velocity $\Delta\omega$



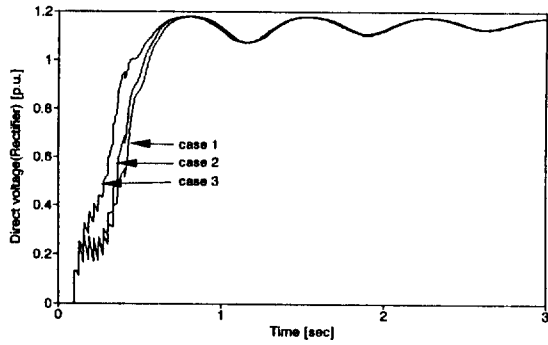
(b) Terminal voltage V_t



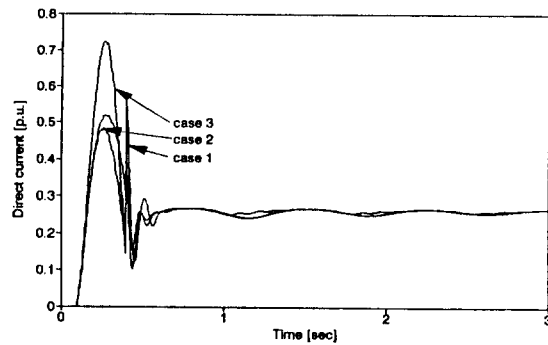
(c) Ignition angle α



(d) Extinction angle β



(e) Direct voltage E_{dr}



(f) Direct current I_d

그림 10 3상 단락 고장시의 응답

Fig. 10 Response to three phase short, fault duration 100m

여가 α 와 β 를 약 90° 에 가깝게 하고 직류전압을 거의 영으로 한 최소의 직류전류를 흐르게하여 운전을 시작한다. 역변환기의 제어각 β 를 서서히 적게하여 직류 전압을 상승시킨다. 동시에 정전류 제어 회로의 직류전류 설정치를 증가시켜 점차 직류 전류를 목표치까지 상승시킨다. 순변환기의 직류 전압은 정전류 제어회로의 동작에 따라 역변환기의 전압 상승과 더불어 자동적으로 상승한다.

5. 결 론

본 논문에서는 교류-직류 연계계통에 있어서 직류제어계통의 순변환기-역변환기 운전제어방식을 정전류-정전압제어, 정전력-정여유각제어, 정점호각-정전류제어의 3가지 경우로 구성하였다. 이에 따른 교류-직류연계계통의 조류계산과 안정도 해석용 모델을 이용하여 외란 및 부하변동에 따른 발전기의 단자전압, 유효·무효전력, 회전자각 특성을 고찰하였다. 또한 직류계통에 있어서는 직류전압·전류, 전력 그리고 양변환기의 제어각 특성을 고찰하여 각 직류제어방식들을 비교연구하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 각 제어방식에 대한 조류계산 및 운전특성을 알 수 있었다.

(2) 각 제어방식에 대한 동적모델 구성으로 미소 외란 및 부하 변동에 대한 동특성을 쉽게 파악할 수 있었다.

(3) 교류계통의 각속도 편차의 특성에 있어서 정전류-정전력

제어와 정전력-정여유각제어가 거의 비슷한 특성을 나타낸 반면 단자전압특성은 정전력-정여유각제어가 우수한 특성을 보였다.

(4) 교류-직류연계계통에서 정점호각-정전류제어는 정전류-정전압, 정전력-정여유각제어 비해서 오버슈트, 도달시간 및 정정시간에서 모두 우수한 제어특성을 나타냈으며, 안정도를 향상시키고 있음을 알 수 있었다.

(5) 3상 단락과 같은 과도시에도 정점호각-정전류제어가 양호한 특성을 보였다.

장차 이 결과를 토대로 교류-직류 다단자연계계통에 대한 연구가 추진되어야 할 것이다.

이 논문은 1994년도 동아대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] E. Uhlmann, "Power transmission by direct current", Springer-verlag, Berlin /Heidelberg, 1975.
- [2] 直流送電専門委員會, "直流送電 技術解析", 日本電氣學會, 1978.
- [3] 직류송전적용 기술조사 전문위원회, "直流送電의 現況と適用技術", 日本電氣學會技術報告(II部), 第 346號, 1990.
- [4] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [5] 長谷川豊, "直流送電의 現況と運轉實績", 日本電氣學會全局大會, S15-1, (1993).
- [6] 韓國電力公社 送變電處, "濟州-陸地間 HVDC 連系事業", 1992.
- [7] B. K. Johnson, "HVDC models used in stability studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PD-4, No. 2, pp. 1153-1163 (1989).
- [8] 정형환 외 3, "교류-직류 병렬송전계통의 동태안정도에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 40, No. 8, pp. 851-858 (1991).
- [9] 정형환 외 3, "고속분할법을 이용해서 D.C.링크를 포함한 전력계통의 조류계산", 대한전기학회 논문지, Vol. 42, No. 5, pp. 52-59 (1993).
- [10] 舟木 剛, "電壓形變換器を用いた直流送電による安定解析", 日本電氣學會研究會資料, PE-92-61, pp. 115-123 (1992).
- [11] Y. Yoshida, "Development of A calculated method of AC voltage stability in HVDC transmission system", IEE J., Vol. 94, No. 4, pp.177-184 (1974).
- [12] T. Hayashi and M. Takasaki, "State space model for AC/DC Transmission System", IEE J., Vol. 105, No. 4, pp. 315-322 (1985).
- [13] K. Takenaka, and K. Kato, "Analysis and control scheme of voltage oscillation in AC/DC power systems", IEE J., Vol. 112, No. 11, pp. 977-986, (1992).
- [14] 吉野輝雄, "直流送電の余裕角制御の安定性に關する考察", 日本電氣學會全局大會, No. 1113, pp. 9-12-13, (1993).
- [15] E. N. Dyalnas and N. C. Koskolas, "Reliability modeling

and evaluation of HVDC power transmission systems”, IEEE Trans. PD., Vol.9. No. 2, pp.872-878, (1994).

[16] 町田武彦, 吉田幸雄, 林 敏之, 中山道夫, 齊藤敏彦, “交直連系系統の電壓安定性”, 日本電力中央研究所 研究報告 177001, 1977.

[17] 直流送電專門委員會, “直流多端子送電技術の現狀”, 日本電氣學會, 1983.

[18] 關根泰次, “電力系統過度解析論”, オーム社, 1983.

[19] 直流送電 適用技術 調査專門委員會, “直流連系系統の動特性”, 日本電氣學會 技術報告(II部), 第 259號, 1987.

[20] 韓國電力公社 發變處, “電力系統 運用資料集”, 1987.

[21] J. Arrillage, “High voltage direct current transmission”, IEE Power Engineering Series 6, Peter Peregrinus Ltd., 1988.

[22] A. A. Found, “Power system Transient stability analysis using the transient energy function methods”, Prentice Hall, 1993.

[23] 정형환 외 4, “교류-직류 계통에 있어서 발전기에 대한 PID 제어기의 적용과 제어특성”, 대한전기학회 전력계통 연구회 학술발표대회 논문집, pp. 173-177, (1994).

[24] 정형환 외 3, “교류-직류연계계통에 있어서 직류제어방식의 비교연구”, 대한전기학회 전력계통 연구회 학술발표대회 논문집, pp. 20-24, (1995).

저 자 소 개



정형환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대 공대 전기공학과 교수



안병철 (安秉喆)

1963년 6월 2일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료



왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



이광우 (李光雨)

1938년 12월 20일생. 1962년 성균관대 물리학과 졸업. 1981년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 부산외국어대학 컴퓨터공학과 교수