

## Excitation System Stress in Synchronous Machine Connected to HVDC System

金 燦 起  
(Chan-Ki Kim)

**Abstract** - This paper deals with overvoltage stresses in the field circuit of synchronous machine connected to HVDC terminal. A load rejection of the HVDC may cause generator in the station to become self-excited, resulting in a severe system overvoltage. This paper shows that violent field current oscillations can be produced by resonance between the machine inductance and the terminal capacitance. As most conventional excitation system do not allow reverse current, new topology of excitation system to allow reverse current is proposed. the proposed system can limit the rate of rise of terminal voltage during conditions of self excitation. Apart from these simulations, the nature(Magnitude and frequency) of the field transient state is explained mathematically. Finally, the EMTDC program is used for the simulation studies.

**Key Words** : HVDC(High Voltage Direct Current), Self-Excitation and EMTDC(Electromagnetic Transient DC)

### 1. 서 론

AC계통에서 발전기가 저 여자 상태에서 동기탈조를 일으키는 현상은 그 동안 많이 검토되어진 현상이다. 그러나 HVDC단에 연결된 동기기(발전기와 동기조상기)가 동기탈조를 일으키는 현상은 그 동안 깊이 검토되어지지 않았으며, HVDC 시스템이 존재하는 AC계통은 순수한 AC계통에서 보다 동기탈조가 일어날 가능성이 더 많다. 그 동안 AC계통에서 동기탈조 현상은 수력 발전소나 장거리 송전과 같이 선로에 용량성 부하가 많은 계통에서 주로 발생하였다. 즉, 부하의 커패시터 성분에 의해 페란티 효과가 발생하고 동기기 단에서는 동기기 단의 전압을 강하하기 위해서 자속을 줄이다 보면, 동기기의 인덕턴스 성분과 AC선로의 커패시터 성분이 균형을 잃어 동기기의 자속이 상실되고 자속상실에 의해서 동기탈조를 일으키는 현상이 주된 원인이었다[1]. 따라서, 수력 발전소나 장거리 선로에 연결된 발전기의 전압조정장치(AVR : Automatic Voltage Regulator)를 AC회전형 AVR을 사용함으로써 전압 제어 범위를 높이는 방법을 취하고 발전기의 출력 단에는 리액터를 설치함으로써 무효전력을 소비하게 하는 방법을 이용하고 있다. 동기기가 동기탈조를 일으키면 발전기자체에 심한 손상을 유발하기 때문에 발전기에서는 동기속도 감시 릴레이나 기타 다른 여러 가지 보호장치를 채용하고 있는데, 우선적으로 동기 탈조가 발생이 되면 가장 먼저 손상을 입는 부분은 동기기의 여자 시스템이다. 동기기의 여자 시스템은 직접적으로 발전기의 전압을 제어하고 AC계통에서 가장 속응성이 빠른 부분이며, 반도체 소자로 이루어져 있

기 때문에 동기 탈조시에 발생하는 과전압에 그대로 노출될 수밖에 없다. 따라서 이러한 동기 탈조에 의해서 수반되는 과전압을 억제하고 이것에 대한 대책을 제시하는 것이 본 논문의 주된 목적이라 하겠다. HVDC시스템에 연결된 동기기의 동기 탈조 현상은 기존에 연구되었던 순수한 AC계통과는 다른 현상을 보이고 있는데, HVDC 시스템이 연결된 AC 계통에서의 동기 탈조의 메카니즘은 다음과 같다.

첫 번째로 HVDC시스템은 정격 전류의 60%정도의 무효전력을 소비하기 때문에 커패시터를 통하여 무효전력을 공급받아야 한다. 따라서 정상 상태에서는 대부분의 무효전력은 커패시터를 통하여 공급하고, 커패시터의 Discrete한 동작에서 오는 부족한 무효전력은 동기기로부터 공급받는다. 이때 순간적으로 HVDC시스템이 전력 전송을 중단하는 경우(정류 실패시)나 트립된 경우에는 AC계통에서 HVDC시스템은 탈락하고 발전기와 무효전력을 공급하기 위한 커패시터만이 남게 되는데, 이 커패시터에 의하여 AC계통의 전압은 증가하고, 동기기는 증가된 전압을 흡수하기 위해서 저 여자 동작을 하는데, 이때 동기기가 충분히 무효전력을 흡수하지 못하면 동기기는 계자 상실과 동기 탈조로 이어진다. 동기기가 동기 탈조를 일으키는 조건을 수식적으로 분석해 보면 동기기가  $X_c < X_q$  ( $X_c$  : 부하의 커패시터 그리고  $X_q$  : 동기기의 q-축 리액턴스)일 경우에 동기 탈조 상태로 들어가고,  $X_c < X_d$  ( $X_d$  : 동기기의 d-축 리액턴스)일 경우에도 동기 탈조 상태로 들어간다.

이러한 개념을 계자 시정수 개념을 도입하여 해석하면 식 1로부터  $X_c < X_q$ 이고,  $X_c < X_d$ 이면, 시정수는 Negative 상태가 되고, Negative 시정수를 갖는 시스템은 Unstable한 특성을 갖게 되고 이것이 동기 탈조를 유발한다 [1].

$$T_d = T_{d0} \frac{X_c - X'_d}{X_c - X'_d} \quad \text{and} \quad T_q = T_{q0} \frac{X_c - X''_q}{X_c - X_q} \quad (1)$$

\* 正 會 員 : 電力研究院 先任研究員  
 接受日字 : 2002年 2月 26日  
 最終完了 : 2002年 7月 23日

HVDC시스템에 연결된 동기기의 동기 탈조 현상은 1995년도에 캐나다의 Manitoba Hydro에서 처음 발생된 문제로서, 1999년 캐나다 Manitoba 대학의 Gole교수는 HVDC시스템에 관계된 동기 탈조 현상을 분석하여 IEEE에 발표하였다. 그러나 그의 논문 내용은 HVDC시스템이 연결된 동기기의 동기 탈조에 대한 원인분석과 동기 탈조에 의해서 여자 시스템이 손상을 받는다는 사실을 규명하고 여자 시스템의 전류가 역으로 흐를 수 있다면, 자기 여자 현상은 둔화되고, 여자 시스템의 과전압에 의한 손상은 막을 수 있음을 제시하였다[2].

본 논문은 Gole 교수가 발표한 내용보다 동기 탈조에 대하여 더 근본적인 수학적 해석과 동기 탈조시에 여자시스템을 미치는 스트레스를 더 근본적으로 해결하고 경제적인 대책을 제시하였다.

## 2. 동기기의 저주파 진동과 자기 여자 현상

### 2-1. 캐패시터 부하를 갖는 동기기의 저주파 진동

커다란 캐패시터 부하가 연결된 동기기는 인덕턴스 부하를 가진 경우와 비교하여 저주파 공진(Subsynchronous Resonance)이나 자기 여자(Self-Excitation)현상을 유발한다. 저주파 공진과 자기 여자 현상은 서로 독립된 현상으로도 나타나고, 합성된 상태로도 나타나는데, 저주파 진동은 경우에 따라서는 AC계통의 고조파 불안정(Harmonic Instability)을 유발시킬 수 있고, 작은 양인 경우에는 무시될 수 있다. 반면에 자기 여자 현상은 1차적으로는 여자시스템에 치명적인 손상을 유발시킬 수 있으며 2차적으로 발전기를 정지시킬 수 있다.

우선적으로 캐패시터가 연결된 동기기의 저주파 공진에 대하여 알아보면 다음과 같다.

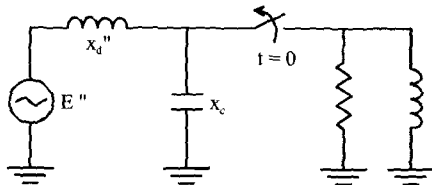


그림 1 부하 차단 후의 동기기 모델.  
Fig. 1 Synchronous Model of Post-load Rejection.

그림 1은 운전 중인 동기기에 부하가 차단된 직후의 동기기 모델을 보여주고 있는 것으로, 이때 발전기에 인가되는 고조파는 그림 1과 같이 동기기의 차과도 동기 리액턴스( $x_d''$ )와 캐패시터( $x_c$ )에 의해서 결정된다. 이때 발전기에는 식 (2)와 같은 고조파가 발생하고 이 고조파는 동기기의 공극 자속에서 식 (3)과 같은 역상분과 식(4)와 같은 정상분으로 분리되어 회전자에는 정격속도( $f_0$ )에 대하여 각각의 고조파가 합성되어 작용을 하게 된다.

$$f_r = f_0 \sqrt{\frac{x_c}{x_d''}} \quad (2)$$

$$f^- = f_r + f_0 \quad (3)$$

$$f^+ = f_r - f_0 \quad (4)$$

이러한 고조파는 시간이 경과됨에 따라 차과도 동기 리액턴스( $x_d'$ )와 동기 리액턴스( $x_d$ )에 따라 변하게 되고, 시스템의 저주파 공진의 원인이 된다. 캐패시터 부하를 가진 동기기의 동작 특성을 보다 정밀하게 분석하기 위해서 다음과 같은 등가 모델을 고려해 보기로 하자.

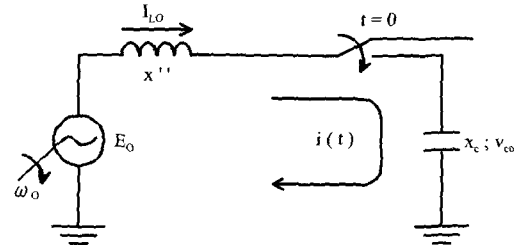


그림 2 급격한 캐패시터 부하를 고려한 등가 모델.  
Fig. 2 Equivalent Circuit for Sudden Capacitive Loading.

그림 2에서 d-q축의 차과도 리액턴스는 같은 값을 가지고 있으며(원통형 동기기), 이 값들은 시간이 경과됨에 따라 변화하지 않는다고 가정하면, 회로에 흐르는 전류는 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$i(t) = \frac{-E_0}{x_c - x''} \sin(\omega_0 t - \phi_0) + \left[ \frac{E_0 \omega_r \cos \phi_0}{(\omega_r^2 - \omega_0^2)l''} - \frac{V_{co}}{x_r} \right] \sin \omega_r t + \left[ I_{LO} - \frac{E_0 \omega_0 \sin \phi_0}{(\omega_r^2 - \omega_0^2)l''} \right] \cos \omega_r t \quad (5)$$

여기서,  $l'' = x''/\omega_0$ ,  $x_r = \omega_r l''$ ,  $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{l''} C}$ ,  $\omega_0$ 은 기본과 주파수,  $V_{co}$ 는 캐패시터의 초기전압,  $I_{LO}$ 는 리액터의 초기전류.  $E_0 \sin(\omega_0 - \phi_0)$ 는 과도 리액턴스에 의한 전압을 나타내고 있다.

$$I^+ = \frac{3}{2} \left[ I_0 + \frac{V_0 - E_0}{x_r} \right] = \left[ 1 + \frac{x''}{x_r} \right] \cdot \frac{3}{2}$$

$$I^- = \frac{3}{2} \left[ I_0 - \frac{V_0 - E_0}{x_r} \right] = \left[ 1 - \frac{x''}{x_r} \right] \cdot \frac{3}{2} \quad (6)$$

그리고, 식 (5)는 다시 정상분 전류와 역상분 전류로 표현될 수 있으며 최종적으로 계산된 결과는 식 (6)과 같다. 정상분 전류와 역상분 전류는 동기기내에서 서로 다른 동작을 하기 때문에 각각 전류가 동기기내에서 어떤 동작을 하는지를 확인하기 위해서는 그림 3과 같은 등가 유도기 모델을 이용하여 고조파의 영향에 대하여 검토하여야 한다[3].

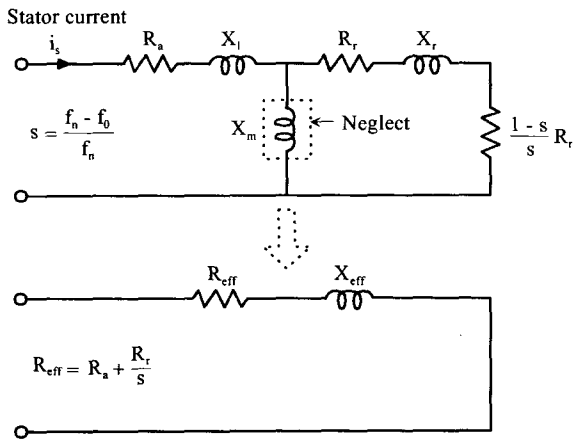


그림 3 등가 유도기 모델.  
Fig. 3 Equivalent Induction Motor Circuit.

그림 3으로부터, 등가 저항은  $|f + f_0|$  보다  $|f - f_0|$  에서 크기 때문에 과도상태에서 저주파 진동은 급격히 사라지게 된다. 그러나, 계통에서 사고가 있는 경우나 고장 시간이 지속되는 경우에는 동기기의 출력이 심하게 왜곡되고 고조파 불안정영역에 들어 갈 수 있다.

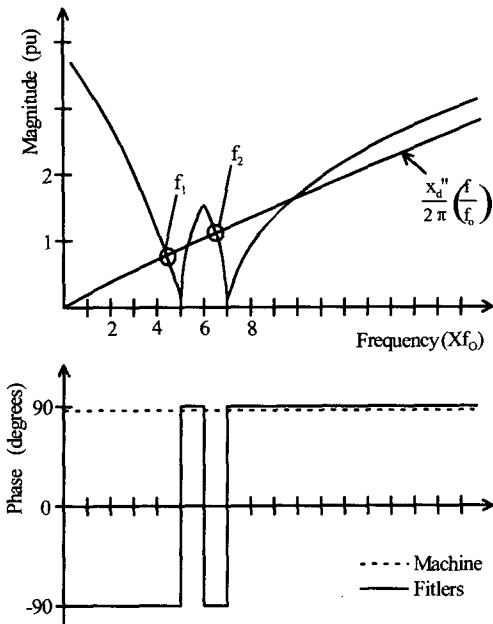


그림 4 동기기의 리액턴스와 5차와 7차 고조파 필터 사이의 임피던스도.  
Fig. 4 Typical Impedance Plots of Machine and Filter with 5th and 7th Filter.

이러한, 저주파 진동 현상은 동기기가 HVDC 단 연결된 경우에는 조금 다른 양상을 보여주고 있는데, 동기기의 리액턴스가 그림 1과 같이 순수한 커패시터와 공진 현상을 일으키는 것이 아니라, 6펄스 HVDC시스템의 고조파 필터와 동작을 하면 HVDC단에 연결된 동기기에서는 시스템의 공진 주파수가 그림 4와 같이 변하게 된다.

2-2. 동기기의 자기 여자 현상

동기기의 최대 송전 능력을 구하기 위하여 다음과 같은 1기 무한대 모선을 고려해 보기로 한다. 그림 5와 같은 1기 무한대 모선에서 발전기와 무한대 모선 사이의 유효전력과 무효전력에 관한 수학적적인 표현은 식 (7)과 식 (8)과 같이 표현된다.

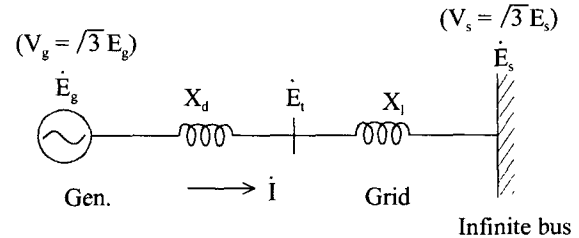


그림 5 발전기와 무한대 모선 사이의 전력 전송.  
Fig. 5 Power Transfer Between a Generator and Infinite Bus.

$$P = \frac{V_g \cdot V_s}{x_d + x_l} \sin \delta \tag{7}$$

$$Q = \frac{(x_l V_g^2 - x_d V_s^2) + (x_d - x_l) V_g V_s \cos \delta}{(x_d + x_l)^2} \tag{8}$$

식 (7)과 식 (8)로부터 발전기와 무한대 모선 사이의 최대 송전 전력은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{V_s \cdot V_g}{x_d + x_l} \tag{9}$$

$$Q_m = \frac{(x_l V_g^2 - x_d V_s^2)}{(x_d + x_l)^2} \tag{10}$$

위 식으로부터 발전기 모선의 선간 전압을 구하면 식 (11)이 되고,

$$V_t^2 = \frac{(x_d V_s)^2 + (x_l V_g)^2}{(x_d + x_l)^2} \tag{11}$$

$V_s^2$ 과  $V_g^2$ 을 구하기 위해서 식 (12)와 식 (13)과 같이 연립 방정식을 도입하면 식 (14)와 식 (15)이 된다.

$$Q_m(x_d + x_l)^2 = x_l V_g^2 - x_d V_s^2 \tag{12}$$

$$V_t^2(x_d + x_l)^2 = (x_l V_g)^2 + (x_d V_s)^2 \tag{13}$$

$$V_g^2 = \frac{(x_d + x_l)(V_t^2 + x_d Q_m)}{x_l} \tag{14}$$

$$V_s^2 = \frac{(x_d + x_l)(V_t^2 - x_l Q_m)}{x_d} \tag{15}$$

그리고 식 (14)와 (15)를 이용하여 발전기의 원선도에 관한 수식을 만들면 식 (16)이 된다.

$$P_m^2 = \frac{v_g^2 \cdot v_s^2}{(x_d + x_1)^2} = \frac{(v_t^2 + x_d Q_m)(v_t^2 - x_1 Q_m)}{x_d \cdot x_1}$$

$$= \frac{v_t^4 + Q_m(x_d - x_1)v_t^2 - x_d x_1 Q_m^2}{x_d x_1}$$

$$P_m^2 + [Q_m^2 - (\frac{v_t^2}{x_1} - \frac{v_t^2}{x_d})Q_m - \frac{v_t^4}{x_d x_1}] = 0$$

$$\therefore P_m^2 + Q_m^2 - Q_m(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_d})v_t^2 = \frac{v_t^4}{x_d x_1} \quad (16)$$

식 (16)으로 부터 동기기의 반경과 원점을 구하기 위해 식 (16)의 방정식을 도입하면, 다음과 같다.

$$\therefore P_m^2 + [Q_m - \frac{v_t^2}{2}(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_d})]^2 = [\frac{v_t^2}{2}(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_1})]^2 \quad (17)$$

식 (17)로 부터 중심 위치는  $[0, \frac{v_t^2}{2}(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_d})]$  이고, 반경은  $\frac{v_t^2}{2}(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_d})$  인 동기기의 원선도가 그려진다. 그림 5는 식 (17)로 부터 구해진 동기기 원선도를 보여주고 있다.

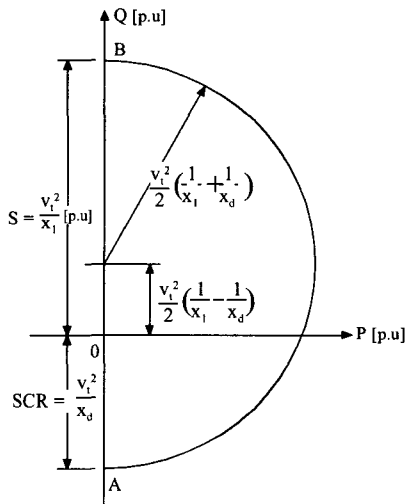


그림 6 동기기의 원선도.  
Fig. 6 Power Curve of Synchronous Machine.

그림 6에서 "A"점은 저 여자 현상에 의하여 동기 탈조가 일어나는 한계 값을 나타내며 "B"점은 동기기의 최대 지상 무효전력을 표현하고 있다. 그림 6에서 "A"점은 무효전력 값으로 표현 될 수 있는데, "A"점에서 무효전력 값(Q)은 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \text{동기기 최대 용량} \times \text{동기기의 단락비} \quad (18)$$

그림 6으로부터 발전기가 전력을 송전하다가 계통의 부하가 차단된 경우에 동기기의 여자 시스템에 일어날 수 있는 현상을 추론해 보면 다음과 같이 3가지가 있다.

첫 번째는 동기기가 동기기에 연결된 부하가 차단된 후에 바로 자기 여자 현상이 일어나는 ISE(Immediate Self-Excitation)조건인 경우이다. 이 경우는 그림 6에서 보여주는 동기기가 운전 중에 동기기의 운전 점이 급속히 "A"점(  $-v^2/X_d$ )밖으로 벗어나는 경우를 말하는 것이다. 일반적으로 AC계통에서는 이러한 현상이 일어날 확률은 없으나 HVDC시스템에서와 같이 부하 차단 전에 동기기에 커다란 용량성 부하가 연결되어 있는 경우에는 발생할 가능성이 많다.

두 번째는 동기기가 부하 탈락 후 바로 자기 여자 현상을 일으키지 않지만, 부하 차단 후 동기기의 주파수가 증가함에 따라 자기 여자 현상이 일어나는 NISE(Non-Immediate Self-Excitation)조건인 경우이다. 이 경우는 동기기에 연결된 HVDC시스템이 트립을 일으킨 후에 AC계통 전압과 주파수는 증가하는데, AC계통의 주파수 변동에 의하여 동기기의 동기 리액턴스와 부하의 커패시터 성분이 공진을 일으키면서 그림 6에서 보여주는 동기 탈조 영역 "A"를 벗어나는 경우를 말한다. HVDC시스템이 트립한 후에 AC계통의 주파수 변화는 정류기 단과 같이 주파수가 증가하는 경우와 인버터 단에서와 같이 주파수가 감소하는 경우로 나눌 수 있는데, 주파수 증가에 의하여 동기기가 동기 탈조 영역으로 들어가는 조건은 다음과 같다. 식 (19)와 식 (20)에서 첨자 "o"는 기준 주파수  $f_0$  에서 커패시턴스와 리액턴스 값을 나타내고 있다.

$$(\frac{1}{x_{co}}) \frac{f}{f_0} \geq (\frac{1}{x_{do}}) \frac{f}{f_0} \quad (19)$$

$$(\frac{1}{x_{co}}) \geq (\frac{1}{x_{do}}) (\frac{f}{f_0})^2 \quad (20)$$

정류기 단에서 HVDC시스템이 탈락한 후에 동기기의 주파수가 올라가는 현상은 동기기가 HVDC시스템을 통하여 계통에 부하를 공급하다가 HVDC시스템이 탈락되면 동기기의 잉여 에너지는 동기기에 가속 에너지로 작용하여 동기기의 속도를 증가시킨다. 동기기의 주파수가 증가하면, 동기기의 등가 임피던스  $X_d$ 는 증가하고 계통의 용량성 등가 임피던스  $X_c$ 는 감소한다. 따라서 동기기의 주파수가 동기기의 임피던스와 계통의 임피던스의 공진 주파수  $f_c$  ( $f_c = f_0 \sqrt{X_{co}/X_{do}}$ )를 초과하면 발전기는 자기 여자 현상을 일으킨다. 일반적으로 부하 차단 후 동기기 주파수는 한없이 증가하지 않는데, 이러한 이유는 터빈의 조속기에 의하여 터빈의 증기를 제어하는 동작 때문이다. 따라서 AC계통 주파수는 동기기가 최고 속도로 가속한  $f_{max}$  후에 점차적으로 감소하게 된다. 따라서 동기기의 주파수가  $f_{max} > f_c$  인 경우에는 자기 여자 현상이 일어나고  $f_{max} < f_c$  인 경우에는 자기 여자 현상은 일어나지 않는다.

세 번째 경우는 동기기의 주파수가  $f_{max} < f_c$ 이고 동기기의 운전 영역도  $-v^2/X_d$ 이내에 존재하는 경우를 말하는 데, 이 경우에는 동기기에는 아무 영향이 없다.

2-3. HVDC 단에 연결된 동기기의 자기 여자 현상

그림 6에서 보여주는 동기기 원선도에서 동기기가 동기조상기로 사용되는 위치를 표시한 것이 "A"점이고 발전기로 사용되는 영역은 "B"점이 된다 이때 "A"점은 동기기가 무효전력을 계통에 공급하는 영역이고 "D"점은 동기기가 무효전력을 흡수하는 영역이 된다. 동기기가 HVDC시스템에 연결된 경우에 발전기로 동작하는 경우에는 즉, "B"점에서 동작하는 경우에는 동기기가 발전기로 동작하여 일정한 값의 유효전력과 일정한 값의 무효전력을 공급함을 표시하는데, HVDC시스템이 갑자기 트립된 경우에는 유효전력은 영(零)이 되고 무효전력은 HVDC 시스템에 무효전력을 공급하는 커패시터가 갑작스럽게 분리되지 않기 때문에 커패시터의 무효전력을 흡수하기 위해 "C"점이나 "E"점 또는 "F"점으로 이동하게 된다.

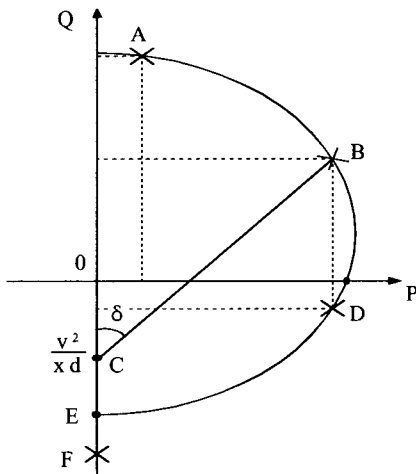


그림 7 동기기의 운전 영역  
Fig. 7 Operating Region of Synchronous Machine

이때 만약 동기 발전기의 운전 영역이 "E"아래로 떨어지는 경우에는 동기 발전기는 동기탈조를 일으키게 된다. 한편, 동기 발전기가 HVDC시스템의 정류기 단에 연결되었는지 아니면 인버터 단에 연결되었는지도 매우 중요한 요소로써, 만약 동기 발전기가 HVDC 시스템의 정류기 단에 연결된 경우에는 HVDC 시스템의 트립에 의해 정류기 단의 AC계통 주파수가 증가하고, 커패시터에 의해 AC계통 전압이 증가하게 된다. 반면에, 동기 발전기가 HVDC시스템의 인버터 단에 연결된 경우에는 AC계통에는 AC 과전압 현상은 일어나나, AC계통의 주파수는 갑작스럽게 공급 전력의 감소 때문에 저 주파수 현상이 일어나게 된다. HVDC단에 연결된 동기기가 자기 여자 현상을 유발하는 조건을 수식적으로 분석하면 다음과 같다.

터빈의 전 부하를  $P_0$ 라 가정하면( $\Delta P = P_0$ ), NISE조건을 피하기 위해서는 발전기의 부하가 탈락된 후에 발전기의 최대 주파수  $f_{max}$ 에서 동기기의 진상 용량 부하 ( $Q = -V^2/X_c$ )는 식 (21)과 같이 동기기의 지상 용량 부하 ( $V^2/X_d$ )보다 커야 한다. 따라서, 식 (21)을 이용하여 NISE를 피하기 위한 조건을 구하면 식 (22)가 된다.

$$Q = \frac{-V^2}{X_{co}/(f_{max}/f)} > \frac{-V^2}{X_{do}/(f_{max}/f)} \quad (21)$$

$$Q_o (= \frac{-V^2}{X_{co}}) \geq \frac{-V^2}{X_{do}/(f_{max}/f)^2} \quad (22)$$

여기서,  $Q_o$ 는 부하가 탈락된 직후에 발전기에 인가된 용량성 부하를 표현하고 있다.

따라서, 부하가 탈락하기 전에, HVDC단에 연결된 발전기의 최소 무효전력은 HVDC시스템이 정격 부하의 50% ~ 60%정도의 무효전력을 소비한다고 가정하면, 다음과 같이 구해질 수 있다. 식 (23)에서  $P_o$ 는 부하가 탈락하기 직전의 발전기의 출력을 말한다.

$$Q_o \geq \frac{-V^2}{X_{do} \times (f_{max}/f)^2} + (50 \sim 60\% \times P_o) \quad (23)$$

식 (23)으로부터 추론되어질 수 있는 또 다른 사실은 동기기가 발전기로 사용되느냐 아니면, 동기 조상기로 사용되느냐에 따라 자기 여자 현상이 일어날 수 조건이 달라지는 것이다. 예를 들어 동기기가 발전기로 사용되면서 정격 부하를 출력하면, 아주 작은 용량의 커패시터에서도 동기 탈조를 일으킬 수 있고, 동기기가 동기 조상기로 사용되어 진다면, 어느 정도 이상의 커패시터 용량에도 동기 탈조를 일으키지 않는다는 사실을 말한다.

3. 동기기가 자기 여자 현상에 들어가는 경우 여자 시스템에 인가되는 스트레스

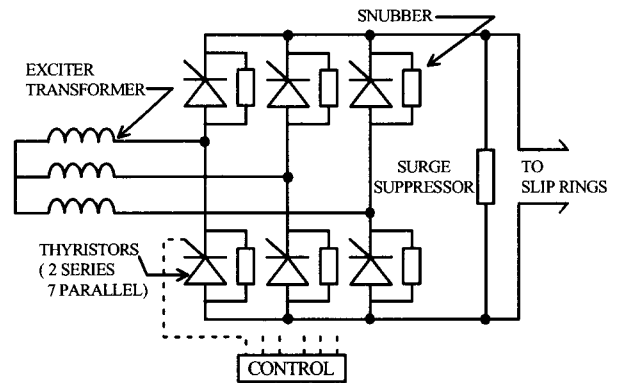


그림 8 반도체 타입 여자 시스템 구성  
Fig. 8 Schematic of the Solid State Exciter

그림 8은 현재 운용중인 여자 시스템의 실질적인 구성을 보여주고 있다. 여자 시스템은 여자 시스템의 구성에 따라 여러 가지가 있으나 그림 8과 같은 반도체 타입 여자 시스템이 용량에 차이는 있으나 모든 시스템에 적용되고 있으며, 그림에 대한 설명은 다음과 같다.

여자 시스템은 동기기의 회전자에 대용량 DC전류를 인가함으로써 일정한 자속을 만들어 주는 장치로써 그림 8과 같이 3상 컨버터를 이용하여 AC전류를 DC전류로 변환한다. 이때 각각의 싸이리스터는 전압과 전류의 용량에 따라 직렬 혹은 병렬로 구성되며 스위칭시 싸이리스터를 보호하

기 위하여 싸이리스터와 병렬로 스너버(Snubber)를 설치한다. 그리고 DC출력 단에는 병렬저항(Surge Suppressor, 혹은 Reverse Resistor라 불리움)을 삽입하여 써지를 억제하는 소자를 가지고 있다. 동기기는 저 여자 현상에 의하여 동기 탈조 현상을 일으키면, 1차 적으로 여자 시스템이 손상되고, 2차 적으로 동기기의 가속에 의해서 터빈이 손상을 입는다. 이중에서 동기기에서 주파수의 가속에 의한 터빈의 손상은 순간적으로 이루어지는 것이 아니라 서서히 증가하기 때문에 터빈에 달려 있는 과-속도 계전기(Over-speed Relay)에 의하여 터빈의 손상 없이 시스템 분리가 가능하다. 따라서 자기 여자 현상 시 가장 문제가 되는 것은 여자 시스템의 손상이 가장 큰 문제로 부각될 수 있다. 일반적인 여자 시스템(싸이리스터 타입)은 Negative전류가 흐를 수가 없기 때문에 전류가 영(零)을 통과하는 지점에서  $dV/dt$ 에 의한 과전압이 발생한다. 이때 발생한 과전압이 식 (24)에서 보여주는 값 보다 크게 되면, 여자 시스템은 손상을 받게 된다.

$$\int |V_{rev}| dt > BD \text{ for } V_{rev} > V_{bd} \quad (24)$$

여기서,  $V_{rev}$ 는 여자 시스템에 인가되는 역전압,  $BD$ 는 여자 시스템의 에너지 흡수 능력 그리고  $V_{bd}$ 는 싸이리스터의 정격 최고 전압을 말한다.

#### 4. 여자 시스템의 손상에 대한 예방책

Gole 교수는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 그림 9에서 보여주는 것과 같은 역전류 도통이 가능한 양 방향성 Crowbar회로를 제안하였고[2], 과전압의 크기와 지속시간을 고려하여 Crowbar회로의 전압 검출 크기와 지속시간을 결정하여야 한다고 주장하였다.

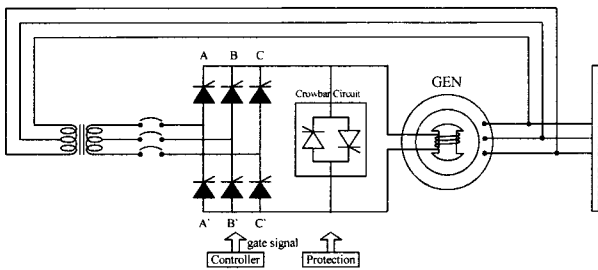


그림 9 Crowbar를 갖고 있는 정지형 여자 시스템  
Fig. 9 Static Excitation System with Crowbar

본 논문에서는 자기 여자 현상을 방지하기 위해 다른 방법을 제시하고자 한다. 그림 9에서 보여주는 전형적인 여자 시스템 이외에 그림 10과 같이 **IGBT나 GTO를 갖는 단상 초퍼를 이용한 여자 시스템의 채용**은 그림 9에서 보여주는 전형적인 정지형 여자 시스템 방법보다도 제어 관점에서 그리고 저 여자 현상 시에도 계자를 보호하는 면에서 탁월하다 할 수 있다.

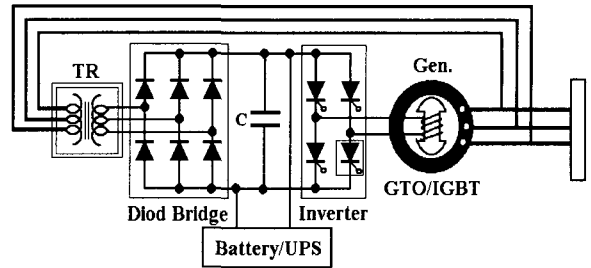


그림 10 단상 초퍼를 갖는 여자 시스템.  
Fig. 10 Excitation System with Single Chopper.

그림 10에서 보여주는 방법은 제안 당시 기존의 여자 시스템이 여자 시스템의 속성성과 AC계통과 여자 시스템 사이의 공진(Resonance)을 가지고 있기 때문에 이를 줄이기 위해 제안된 방법이나 이 방법의 특성상 동기기의 저 여자 현상 시에도 계자를 보호할 수 있는 기능을 가지고 있기 때문에 HVDC 시스템이 연결된 동기기에는 추천할 만한 방법이라 생각된다. 그러나 여자 시스템이 저 전압/대 전류 컨버터를 필요로 하기 때문에 용량에 제한을 받는다는 단점을 가지고 있다.

이상에서 논한 내용은 동기기가 자기 여자 현상을 일으키지 않도록 하기 위해서 그리고 동기기의 여자 제어 시스템을 수정하는 방법을 논한 것이며, 동기기가 자기 여자 현상을 일으키지 않도록 하기 위한 동기기의 운전 조건을 고려해 보면 다음과 같다.

첫 번째로 동기기가 ISE영역으로 들어가는 조건은, 그림 3에서 "E"점은 동기기의 용량에 동기기의 단락비를 곱한 값이 저 여자 상태로 들어가는 무효전력(예를 들어 어떤 동기기의 단락비가 0.69이고, 용량이 706[Mvar]이라면, 저 여자 상태로 들어가는 무효전력은  $706 \times 0.69 = 487$ [Mvar])이 되기 때문에 커패시터에 의한 무효전력 조건과 동기기의 운전조건을 고려하여 운전하여야 한다.

두 번째로는 동기기가 HVDC 단의 정류기 단에 연결된 경우에는 주파수 증가를 고려하여야 하기 때문에, 터빈이 가속을 하면 터빈에 부착되어 있는 과-속도 계전기(일반적으로 터빈의 과-속도 설정 값은  $1.1[p.u] : 3600[rpm]$ (터빈 속도)  $\times 1.1[p.u] = 3960[rpm]$ )가 동작한다. 이때 동작 시간은 과-속도를 검출하는 카운터 입력 시간(25[ms])과 카운터로 입력받은 시간을 처리하는 디지털 프로세서 시간(50[ms]) 그리고 터빈에 입력되는 유압 밸브를 차단하는 시간(200[ms])을 합한 값이 된다. 따라서 터빈의 속도가 증가한 후에 약 0.3초 정도는 터빈의 가속상태가 유지될 수 있는 조건이 된다. 따라서 HVDC단에 연결된 동기기의 리액터와 커패시터 값이 가속 주파수에 의하여 공진점에 들어가지 않도록 **터빈의 과속도 계전기의 설정 값을 설정**하여야 한다.

#### 5. 시뮬레이션 및 결과 검토

본 장에서는 앞장에서 논한 내용을 확인하기 위해서 간략화된 수정된 CIGRE모델을 이용하였으며, 시뮬레이션 프

로그래는 PSCAD/EMTDC를 이용하였다. 그리고 시물레이션 조건에서, 동기기의 파라미터와 필터 용량은 동기기가 자기 여자 현상을 잘 일으키도록 선정하였으며, 동기기의 여자 시스템은 PSCAD/EMTDC에 있는 정지형 여자기 모델(ST1 모델)을 이용하여 기존의 싸이리스터 여자 시스템과 단상 초과형 여자 시스템을 파라미터만 수정함으로써 동일한 효과가 나오도록 조정하였다. 예를 들어 단상 초과형 여자 시스템을 모의하는 경우에는 PSCAD/EMTDC에 있는 ST1모델에서 정상 전압(Ceiling Voltage)을 (+)/(-)제어 영역을 갖게 하고, 여자 시스템의 전원은 "Bus Fed" 방식이 아닌 "Independent" 방식을 선정함으로써 구현하였고, 기존의 싸이리스터 여자 시스템에서 Crowbar회로의 구현은 PSCAD/EMTDC에 있는 ST1모델에서 "Reverse Current Available"을 설정함으로써 구현하였다. 시물레이션에서 이용한 파라미터는 다음과 같다. 그림 11은 시물레이션에서 사용한 간략화된 HVDC 계통도를 보여주고 있다.

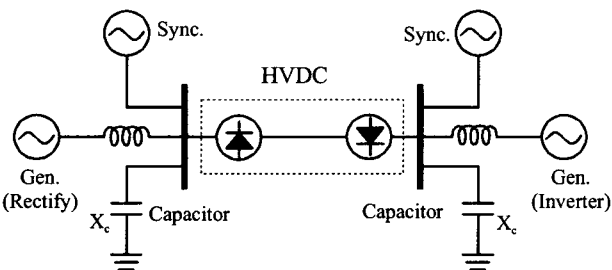


그림 11 시물레이션을 위한 간략화 된 HVDC 계통도.  
Fig. 11 Simplified HVDC Network for Simulation.

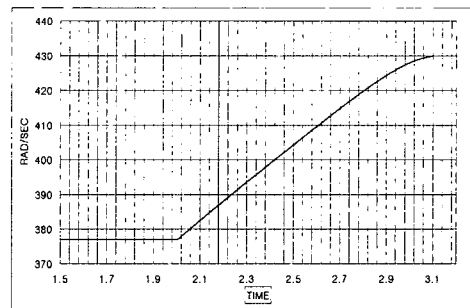
표 1 시물레이션을 위한 발전기 데이터  
Table 1 Data of Generator for Simulation

전압	13.8[kV]	$x_{d''}$	0.28[p.u]
H(관성)	3.41[p.u]	$x_q$	0.071[p.u]
용량	120[MW]	$x_{q''}$	0.375[p.u]
운전 출력	1 [p.u]	$T_{do'}$	6.55[s]
$x_d$	1.014[p.u]	$T_{do''}$	0.039[s]
$x_{d'}$	0.3145[p.u]	$T_{qo''}$	1.071[s]
병렬 콘덴서	1400[ $\mu$ F]		

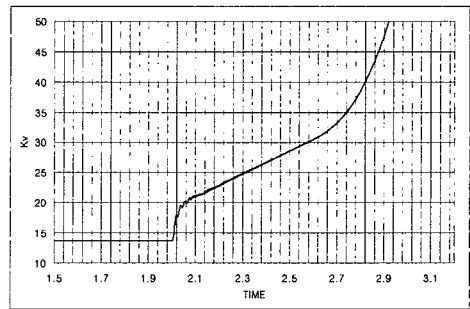
그림 12는 표 1에서 보여주는 조건하에서 여자 시스템의 조건을 여자 시스템의 Reverse Resistor는 15000, 여자 시스템의 형태는 AC 회전형, 그리고 Crowbar회로는 없는 경우의 시물레이션 결과를 보여주고 있다.

그림 12 a)는 발전기의 속도, b)는 발전기의 출력 전압, c)는 여자 시스템의 전류 그리고 d)는 여자 시스템의 전압을 보여주고 있다. 그림 12에서 HVDC시스템의 트립은 2초에서 시작되는 것으로 하였으며, 터빈의 조속기는 일반적인 제어기를 이용하였다. 그림 12에서 발전기의 속도는 트립후에 계속적으로 상승하고 있으며, 전압도 발전기 출력 단의

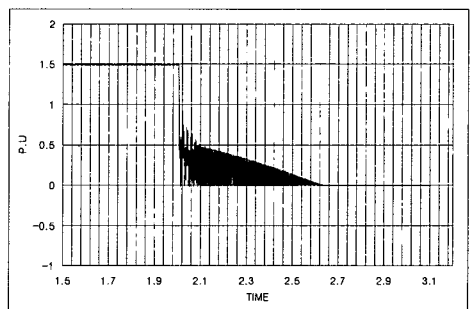
커패시터에 의하여 증가하고, 발전기의 여자 시스템은 발전기 전압을 줄이기 위해 감자작용을 하나, 발전기 트립 후에 발전기는 바로 동기 탈조 현상을 일으킨다. 여자 시스템은 Negative 전류를 흘릴 수 없기 때문에 제어력을 상실하고 여자 전압은 불연속 전류에 의하여 순간적인 썬지 전압을 발생시킨다. 그림 12 e)는 고장 직후의 여자 전류부분을 확대시킨 것으로써 정상분 전류와 역상분 전류가 합성되어 여자 시스템의 전류에 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 12 e)의 여자 전류 고조파를 분석해 보면, 처음 2사이클은 정상분전류와 역상분 전류가 합성되어 나타나나 그 이후에는 역상분 전류만이 지속되는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 12 f)는 고장 직후의 여자 전압을 확대한 것으로써 썬지 형태의 과 전압 지속 기간을 보여주고 있다. 이러한 과전압은 계통 조건이나 부하 조건등 여러 가지 원인에 의해 각각 다르게 나타난다.



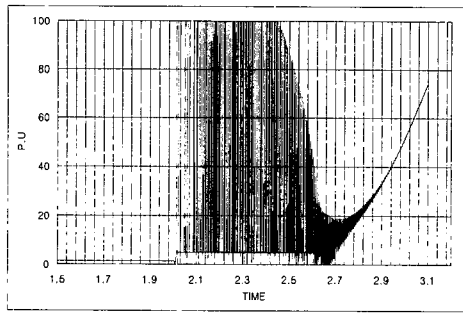
a) 발전기 속도



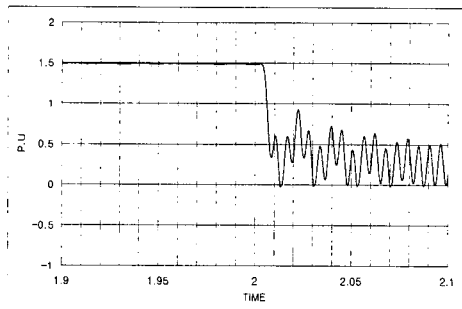
b) 발전기의 출력전압



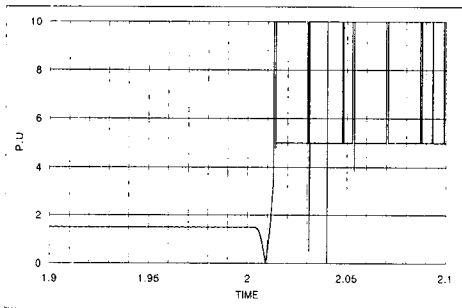
c) 여자 시스템의 전류



d) 여자 시스템의 전압



e) 여자 시스템의 전류(확대)



f) 여자 시스템의 전압(확대)

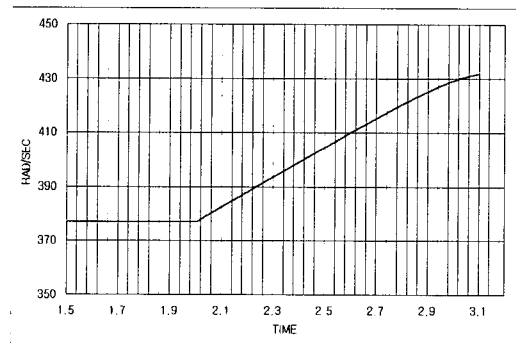
그림 12 ISE조건에 따른 시스템 파형

Fig. 12 System Waveforms according to ISE Condition

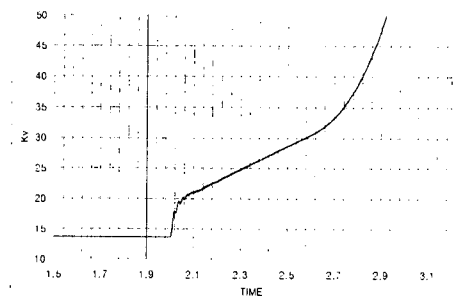
그림 13은 그림 12와 같은 조건에서 여자기의 형태를 정지형(Static Type 혹은 Bus fed 방식)으로 바꾼 상태에서 시뮬레이션한 결과를 보여 주는 것으로써 그림 12와는 조금 다른 형태를 보여 주고 있다.

그림 14는 그림 12와 같은 조건하에서 커패시터의 값을 140 $\mu$ F로 바꾼 상태에서 NISE조건을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. 그림 12는 발전기의 리액턴스와 선로의 병렬 커패시터가 같은 값을 가지는 경우(1400 $\mu$ F)를 시뮬레이션하였는데, NISE조건을 만들기 위해서는 그림 12의 경우보다 10배 작은 값을 선택해야 NISE조건이 성립한다. 이것은 식 (23)에서 보여주는 것 같이 발전기의 부하에 따라 자기 여자 현상이 다르게 나타나기 때문이다. 그림 15는 그림 12와 같은 조건에서 Reverse Resistor를 150으로 바꾼 경우의 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있는 것으로 그림 12

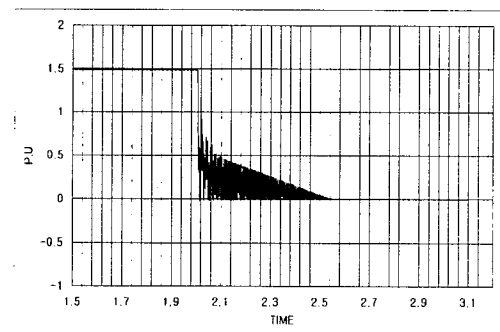
와 비교해서 여자 전압의 과전압 크기는 상당히 줄어들고 있으나 과 전압의 지속기간은 도리어 늘어나는 경향을 보여주고 있다. Reverse Resistor 값의 설정은 계자 저항과 계자 저항에 병렬로 삽입한 저항의 비율로 설정하게 되어 있다. 그림 15의 경우는 여자 시스템의 계자에 병렬로 삽입한 저항 값이 상당히 작고, 정상상태에서도 어느 정도의 손실이 발생하기 때문에 실제로 제작하기에는 무리가 따르는 면이 있으나 병렬 저항의 영향을 분석하기 위하여 상당히 낮은 값을 제시한 것이다. 그림 16은 그림 12와 같은 조건에서 역 전류(Reverse Current)를 흐르게 한 경우의 시뮬레이션 결과를 보여주는 것으로 그림 12의 시뮬레이션 파형과 비교해 보면, 이 경우는 여자 시스템에 역 전류가 흐르는 것이 가능하기 때문에 여자 전압의 과전압은 사라지고, 동기 탈조시의 전압 상승비율이 제한되는 것을 확인 할 수 있다.



a) 발전기 속도

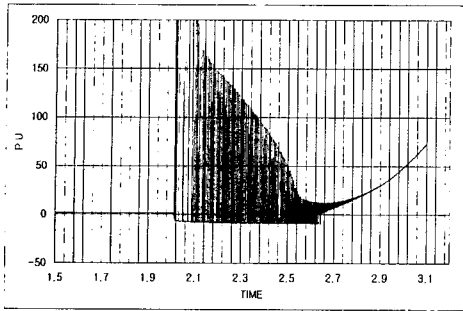


b) 발전기의 출력전압

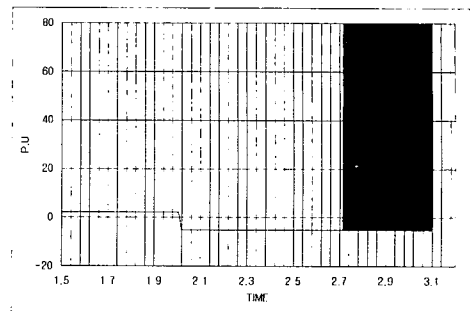


c) 여자 시스템의 전류





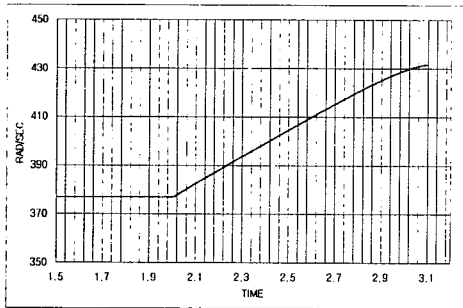
d) 여자 시스템의 전압



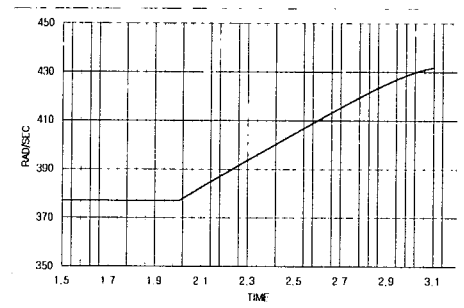
d) 여자 시스템의 전압

그림 13 ISE조건에 따른 시스템 파형(Bus-fed).  
Fig. 13 System Waveforms according to ISE Condition (Bus-fed).

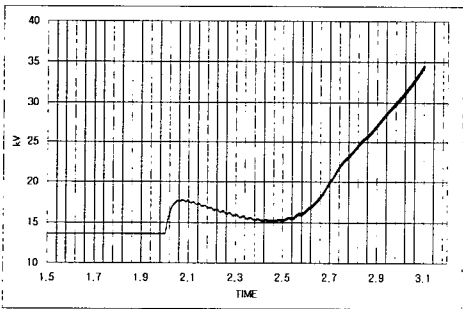
그림 14 NISE조건에 따른 시스템 파형 (140µF).  
Fig. 14 System Waveforms according to ISE Condition (140 µF).



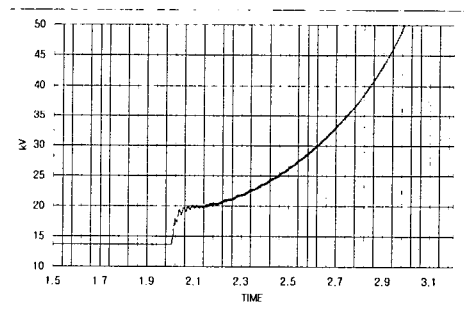
a) 발전기 속도



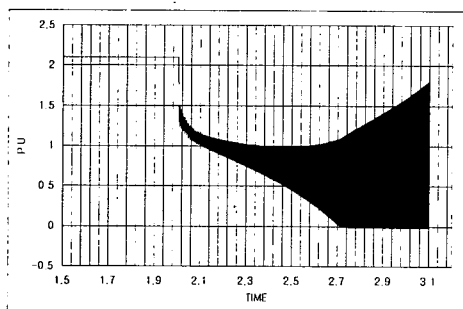
a) 발전기 속도



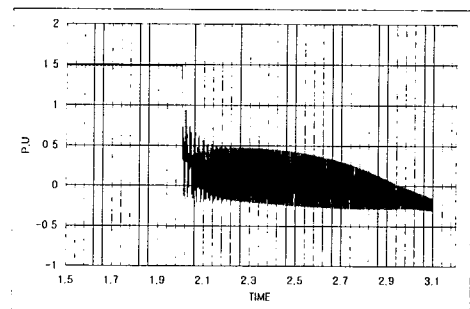
b) 발전기의 출력전압



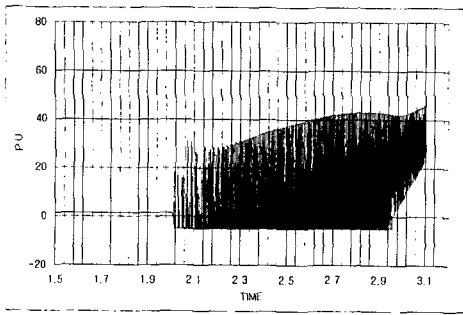
b) 발전기의 출력전압



c) 여자 시스템의 전류

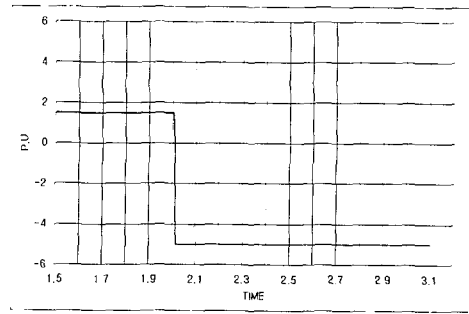


c) 여자 시스템의 전류



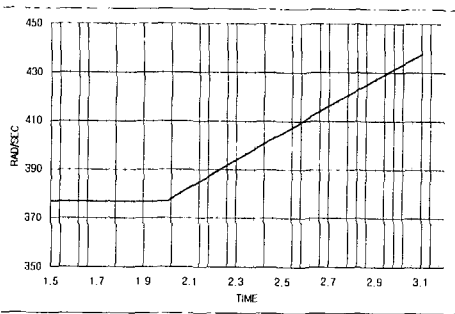
d) 여자 시스템의 전압

그림 15 ISE조건에 따른 시스템 파형(Reverse Resistor).  
Fig. 15 System Waveforms according to ISE Condition (with big Reverse Resistor).

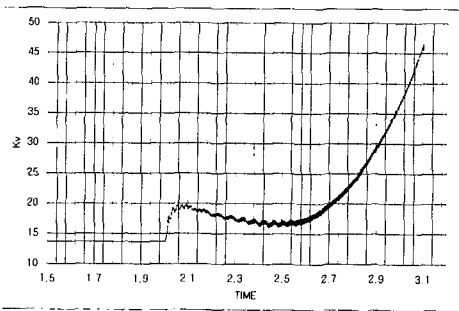


d) 여자 시스템의 전압

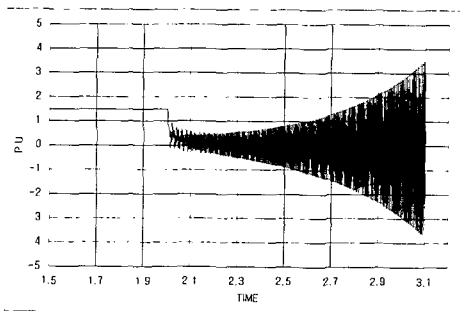
그림 16 ISE조건에 따른 시스템 파형(역전류 도통 허용).  
Fig. 16 System Waveforms according to ISE Condition (with Allowing Reverse Current).



a) 발전기 속도



b) 발전기의 출력전압



c) 여자 시스템의 전류

### 5. 결 론

본 논문에서는 HVDC 단에 연결된 동기기의 자기 여자 현상을 분석하였으며 자기 여자 현상에 의하여 여자 시스템이 손상되는 것을 막기 위한 대책을 제시하였다. 수행된 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 자기 여자 현상이 발생하는 경우에 여자시스템에 역 방향 전류가 도통하는 통로를 만들어 주면 여자 시스템의 과전압을 막을 수 있다.
2. HVDC 단에 연결된 동기기의 여자 시스템을 단상 초과를 갖은 컨버터로 대체하면 복잡한 계산 없이 자기 여자 현상에 의한 과전압을 막을 수 있으며 이 방법이 더 경제적이다.
3. 동기기의 운전조건을 자기 여자 현상을 고려하여 설정한다.
4. 동기기의 단락비와 계통의 커패시터가 공진을 일으키는 주파수 이내로 터빈의 Over-Speed Relay 값을 설정한다.

### 참 고 문 헌

- [1] F.P.de Mello, etc., "Load Rejection Overvoltage as Affected by Excitation System Control", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-94, No. 2, March/April 1975, pp. 280~287.
- [2] Y.Hue, A.M. Gole, etc., "Self-Excitation Operating Constraint for Generators Connected to DC Line", IEEE Tran. on Power System, Vol. 14, No. 3, August 1999, pp. 1003~1009.
- [3] "Power System Stability and Control", Kunder, McGraw-Hill, 1994.
- [4] "High Voltage Direct Current Transmission", Arrillaga, IEE Series, 1988.

Thank Dr. A. Gole of Manitoba Univ. for supporting and advising for this paper.

본 논문에 대하여 지원과 조언을 해준 Manitoba 대학의 Gole 교수에게 감사한다.

## 저 자 소 개



### 김 찬 기 (金 燦 起)

1968년 12월 17일 생, 충북 충주.  
1991년 서울 산업 대학교 전기공학과  
졸업(학사), 1993년 중앙대학교 대학  
원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 중  
양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박  
사), 1996년 전력 연구원 입사, 현재

전력 연구원 선임 연구원.

Tel : (042) 865-5892, Fax : (042) 865-5844

E-mail : cckim@kepri.re.kr