

정태안정도 해석에 미치는 발전기 교차자화 포화특성의 영향

(Effect of the Cross Magnetization in Saturated Generators on the Analysis of Steady State Stability)

김덕영*

(Deok-Young Kim)

요 약

본 논문에서는 발전기의 특성을 보다 정확히 해석하기 위해 발전기의 상세모델에 동일축 전류성분에 의한 포화특성과 교차자화에 의한 포화특성을 고려한 상태방정식을 발전기의 전류모델에 대하여 제시하였다. 발전기의 포화특성을 종래의 동일축성분 전류에 의한 포화특성 뿐만 아니라 교차자화 효과에 의한 포화특성까지도 고려할 수 있도록 각 경우의 자속쇄교수와 전류의 관계를 나타내는 인덕턴스 행렬의 표현식을 보였으며, 발전기를 해석하기 위한 기준 좌표계로 발전기의 d축이 q축보다 위상이 90° 앞서는 좌표계를 사용하여 관계식을 재정립함으로써 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기모델과 일치하도록 하였다. 사례연구를 통해서 보다 정확한 안정도 해석을 위해서는 교차자화 효과를 고려한 발전기 모델이 계통해석에 사용되어야 함을 입증하였다.

Abstract

This paper presents a modeling of a synchronous machine infinite bus system of which not only seperated saturation effect but also cross magnetization effect of the saturated generator is included for the more precise analysis of the system. In the process of reforming the flux linkage equations of the state equations which have generator saturation effects, the d · q-axis coordinated system of a generator is fixed that the d-axis proceeds the q-axis in 90° to accord with the generally accepted generator model used before. The simulation results show that cross magnetization has a very important effect to the more precise eigenvalue analysis of steady state stability

1. 서 론

동기발전기의 안정도 문제는 계통의 계획과 운용

면에서 가장 핵심적인 부분으로 인식되고 있으며, 이에 따라 발전기를 실제의 특성을 잘 나타낼 수 있도록 적절히 모델링하는 문제가 안정도 분야의 중요 과제중 하나로 간주되고 있다. 안정도 해석에 사용되는 발전기의 모델은 대규모계통을 해석하는 경우

*정회원 : 군산대학교 전기과 전임강사
접수일자 : 1998. 3. 3.

에는 고전모델이나 이축모델과 같은 간략모델을 사용하고, 발전기 무한모선 계통과 같이 발전기의 특성을 정확히 해석하고자 하는 경우는 가장 복잡한 모델이라 할 수 있는 상세모델을 사용하여 보다 정확한 계통해석이 가능하도록 하고 있다. 발전기의 계자자속은 계자전류에 대해 포화특성을 가지며, 이 경우 고정자권선에 유기되는 전압은 그만큼 감소하게 된다. 따라서 발전기 특성에 대한 상세한 해석결과를 얻기 위해서는 발전기 모델에 포화특성을 어느 정도까지 적절히 표현할 것인가 하는 문제가 제기된다[1,4]. 일반적으로 발전기의 포화특성을 고려하는 경우 동일축(d축, q축) 성분의 전류에 의해서만 자속이 포화특성을 갖는 것으로 간주하고 d축과 q축 사이의 교차자화(Cross Magnetization) 효과는 무시하였다. 그러나 원통형구조 또는 다극의 돌극형구조를 갖는 발전기의 경우 동일축 포화특성만을 고려하는 경우 필드 테스트에 의한 발전기의 특성해석과는 무시할 수 없는 정도의 오차가 발생하며, 그 원인은 주로 교차자화 효과에 의한 발전기 포화특성에 기인하는 것으로 밝혀졌다[2,3].

본 논문에서는 정확한 계통해석결과를 위해 발전기를 상세모델로 나타내고 발전기의 포화특성을 고려하는 경우에 있어서, 동일축 포화특성(seperated saturation)만을 고려하는 경우와 교차자화에 의한 포화특성까지 고려하는 경우의 인덕턴스 행렬과 상태행렬을 제시하고, 계통해석에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이때 발전기의 전류와 자속쇄교수를 회전자 d축성분과 q축성분으로 변환하기 위한 기준 좌표계를 사용하여 관계식을 재정립하고 발전기 모델의 상태변수를 전류로함으로써 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기모델과 일치하면서도 교차자화 포화특성을 고려하여 보다 정확한 해석이 가능하도록 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 동기발전기 모델링

동기발전기가 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 경우를 가정한다. 이러한 발전기 무한모선 계통은 발전기의 특성을 보다 상세히 해석하기 위해 사용되며, 이때의 발전기 모델로는 상세모델이 사용된다. 발전기 등가회로로부터 다음과 같은 전압방정식과 토크방정식을 구성할 수 있다[1].

전압방정식

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{ds} &= -v_d - r_i i_d - \omega \lambda_{qs} \\ \dot{\lambda}_{Fs} &= v_F - r_F i_F \\ \dot{\lambda}_{Ds} &= -r_D i_D \\ \dot{\lambda}_{qs} &= -v_q - r_i i_q + \omega \lambda_{ds} \\ \dot{\lambda}_{Qs} &= -r_Q i_Q \end{aligned} \quad (1)$$

토크방정식

$$\begin{aligned} \delta &= \omega - \omega_o \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_o}{2H} (T_m - T_e) \end{aligned} \quad (2)$$

단, $T_e = i_q \lambda_{ds} - i_d \lambda_{qs}$

또한 발전기가 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 경우 식 (1)의 발전기 단자전압은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} v_d &= -K \sin(\delta - \alpha) + R_e i_d + L_e \dot{i}_d + \omega L_e i_q \\ v_q &= K \cos(\delta - \alpha) + R_e i_q + L_e \dot{i}_q - \omega L_e i_d \end{aligned} \quad (3)$$

단, $K = \sqrt{3} V_{\infty}$

식 (1)~식 (3)을 계통동작점에 대해 선형화 하여 행렬로 나타내면 식 (4)와 같다. 식 (4)는 다음과 같이 간단한 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$[\Delta \dot{\lambda}] = [S][\Delta \lambda] + [R][\Delta I] + [B][\Delta U] \quad (5)$$

2.2 동일축 전류성분에 의한 포화특성

발전기의 포화특성을 해석할 때 일반적으로 누설 인덕턴스와 누설자속의 영향은 무시하고 부하시의 공극자속과 기자력사이의 포화관계는 무부하시와 동

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\lambda}_{ds} \\ \Delta \dot{\lambda}_{Fs} \\ \Delta \dot{\lambda}_{Ds} \\ \Delta \dot{\lambda}_{qs} \\ \Delta \dot{\lambda}_{Qs} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\omega_o & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_o & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_o i_{qo}}{6H} & 0 & 0 & \frac{\omega_o i_{do}}{6H} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(r+R_e) & 0 & 0 & -\omega_o L_e & 0 & K \cos(\delta_o - \alpha) & -(\lambda_{qo} + L_e i_{qo}) \\ 0 & -r_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_o L_e & 0 & 0 & -(r+R_e) & 0 & K \sin(\delta_o - \alpha) & \lambda_{do} + L_e i_{do} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\omega_o \lambda_{qo}}{6H} & 0 & 0 & -\frac{\omega_o \lambda_{do}}{6H} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta v_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\omega_o}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

일한 것으로 취급한다. 발전기의 d축전류 성분과 자속과의 포화특성은 그림 1과 같다. 그림 1의 포화곡선에서 자속쇄교수 λ_{md} 를 발생시키기 위해서는 B-C에 해당하는 전류를 제자권선에 더 공급해야 하는 것을 알 수 있다. 그림 1에서 같은 크기의 d축 전류에 대해 포화현상이 없는 경우의 자속쇄교수와 포화현상에 의한 자속쇄교수의 비를 d축 포화계수 S_d 로 정의하였다.

이때의 포화계수와 상호인덕턴스의 관계는 식 (6), (7)과 같다.

$$\begin{aligned} L_{m ds} &= S_d L_{m d} \\ L_{m q s} &= S_q L_{m q} \end{aligned} \quad (6)$$

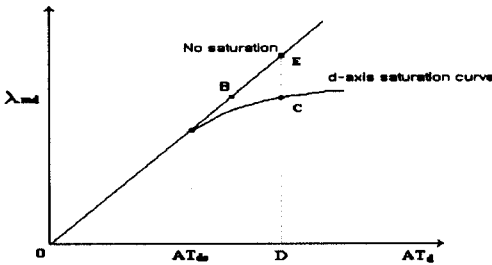


그림 1. 발전기의 d축 포화곡선
Fig. 1. d-axis saturation cure of a generator

$$S_d = \begin{cases} 1.0 & |AT_d| \leq AT_{ds} \\ 1.0 - \alpha_d(AT_d - AT_{ds}) & |AT_d| > AT_{ds} \end{cases} \quad (7)$$

$$S_q = \begin{cases} 1.0 & |AT_q| \leq AT_{qs} \\ 1.0 - \alpha_q(AT_q - AT_{qs}) & |AT_q| > AT_{qs} \end{cases}$$

여기서, $AT_d (= i_F + i_d + i_D)$: d축의 기자력성분
 $AT_q (= i_q + i_Q)$: q축의 기자력성분

동일축성분에 의한 포화특성만을 고려하는 경우 자속쇄교수와 전류의 관계를 나타내는 인덕턴스 행렬은 다음과 같이 비대각 블록이 0인 행렬구조를 갖

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dso} & L_{mdso} & L_{mdso} & 0 & 0 \\ L_{mdso} & L_{Fso} & L_{mdso} & 0 & 0 \\ L_{mdso} & L_{mdso} & L_{Dso} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qso} & L_{mqso} \\ 0 & 0 & 0 & L_{mqso} & L_{Qso} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ 0 & i_{qo} \\ 0 & i_{qo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_{m ds} \\ \Delta L_{m qs} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & 0 & 0 \\ L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{Fso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & 0 & 0 \\ L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{Dso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qso} - \alpha_q L_{mq}(i_{qo}) & L_{mqso} - \alpha_q L_{mq}(i_{qo}) \\ 0 & 0 & 0 & L_{mqso} - \alpha_q L_{mq}(i_{qo}) & L_{Qso} - \alpha_q L_{mq}(i_{qo}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

는다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{Fs} \\ \lambda_{Ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ds} & L_{m ds} & L_{m ds} & 0 & 0 \\ L_{m ds} & L_{Fs} & L_{m ds} & 0 & 0 \\ L_{m ds} & L_{m ds} & L_{Ds} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qs} & L_{mq s} \\ 0 & 0 & 0 & L_{mq s} & L_{Qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)의 인덕턴스 행렬을 선형화하면 식 (9)와 같다. 식 (9)의 인덕턴스 변수에 기자력 성분을 전류로 치환한 식 (7)의 포화계수의 선형화 식을 대입하면 식 (10)과 같은 자속쇄교수와 전류와의 관계를 나타내는 인덕턴스 행렬을 구할 수 있다. 발전기가 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 경우 식 (3)과 식 (4)로부터 자속쇄교수와 전류의 일차미분항은 식 (11)과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{do} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qo} \\ \Delta \lambda_{Qo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + i_d + L_e & L_1 & L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & L_1 + i_F & L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & L_1 & L_1 + i_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_2 + i_q + L_e & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & L_2 & L_2 + i_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix}$$

여기서, $L_1 = L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do})$
 $L_2 = L_{mqso} - \alpha_q L_{mq} i_{qo}$ (11)

식 (10)과 식 (11)의 인덕턴스 행렬을 $[L_{SS}]$, $[L_{SS}']$ 라 하면 식 (4)로부터 동일축성분에 의한 포화특성만을 고려하는 경우 전류모델로 나타난 발전기 무한모선계통의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{I}] &= [L_{SS}^{-1}] \{ [S][L_{SS}] + [R] \} [\Delta I] + [L_{SS}^{-1}] [B][\Delta U] \\ &= [A_{SS}][\Delta I] + [B_{SS}][\Delta U] \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 교차자외에 의한 포화특성

본 절에서는 정확한 안정도 해석 결과를 얻기 위해 발전기의 포화특성을 동일축 성분에 의한 포화뿐만 아니라 d축, q축 사이의 교차자화 효과까지를 고려하는 경우의 발전기 무한모선 계통의 표현식을 살펴보고자 한다. 발전기의 d축과 q축 사이의 상호관계를 나타내는 교차자화 자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{da} = \begin{cases} 0.0 & |AT_d| \leq C_{od} \\ r_{od} AT_d(AT_d - C_{od}) & |AT_d| > C_{od} \end{cases} \quad (13)$$

$$\lambda_{dq} = \begin{cases} 0.0 & |AT_q| \leq C_{od} \\ r_{dq} AT_q(AT_q - C_{od}) & |AT_q| > C_{od} \end{cases}$$

교차자화에 의한 자속쇄교수는 d축, q축의 자속쇄교수를 감소하는 방향으로 작용하며, 이때의 선형화한 자속쇄교수 방정식은 식 (14)와 같다. 식 (13)의 교차자화 자속쇄교수에서 기저력 성분을 전류로 치환하고 선형화한 식과 식 (7)의 포화계수를 선형화한 식을 식 (14)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + I_d & L_1 & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 + I_F & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 & L_1 + I_D & L_{12} & L_{12} \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 + I_q & L_2 \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 & L_2 + I_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix}$$

여기서, $L_1 = L_{mdso} - K_d - \gamma_{od}(i_{qo} - C_{od})$
 $L_2 = L_{mqso} - K_q - \gamma_{dq}(i_{Fo} + i_{do} - C_{od})$
 $L_{12} = -\gamma_{od}(i_{Fo} + i_{do})$
 $L_{21} = -\gamma_{dq} i_{qo}$
 $K_d = a_d L_{md} (i_{Fo} + i_{do})$
 $K_q = a_q L_{mq} i_{qo}$ (15)

식 (15)에서 교차자화에 의한 포화특성을 고려한 경우 인덕턴스 행렬의 비대각블록 요소가 0이 아닌 값을 가짐을 알 수 있다. 또한, 식 (4)로부터 발전기가 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 경우의 자속쇄교수와 전류의 일차미분항은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + I_d + L_e & L_1 & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 + I_F & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 & L_1 + I_D & L_{12} & L_{12} \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 + I_q + L_e & L_2 \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 & L_2 + I_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)의 인덕턴스 행렬을 $[L_{CM}]$, $[L_{CM}']$ 라 하면 식 (4)로부터 교차자화에 의한 포화특성을 고려하는 경우 전류모델로 나타난 발전기 무한모선 계통의 상태방정식은 다음과 같다.

$$[\Delta \dot{I}] = [L_{CM}']^{-1} \{ [S][L_{CM}] + [R] \} [\Delta I] + [L_{CM}']^{-1} [B][\Delta U] = [A_{CM}][\Delta I] + [B_{CM}][\Delta U] \quad (17)$$

3. 사례연구

3.1 계통역률 변화에 의한 포화특성의 영향

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dso} & L_{mdso} & L_{mdso} & 0 & 0 \\ L_{mdso} & L_{Fso} & L_{mdso} & 0 & 0 \\ L_{mdso} & L_{mdso} & L_{Dso} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qso} & L_{mqso} \\ 0 & 0 & 0 & L_{mqso} & L_{Qso} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ 0 & i_{qo} \\ 0 & i_{qo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_{mds} \\ \Delta L_{mas} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{dq} \\ \Delta \lambda_{da} \\ \Delta \lambda_{dq} \\ \Delta \lambda_{qd} \\ \Delta \lambda_{qd} \end{bmatrix} \quad (14)$$

발전기가 송전선을 통해서 무한모선에 연결되어 있는 경우에 대하여 정태안정도해석을 하였다. 다양한 계통조건에 대해 발전기 포화특성이 미치는 영향을 비교하기 위해 발전기의 유효전력을 일정하게 하고 역률을 변화시켜 가면서 계통해석을 하였다. 발전기는 상세모델을 사용하였고 계통조건과 정수값 그리고 포화계수는 참고문헌[3]에 있는 값을 사용하였다. 계통의 역률은 0.5 지상조건에서부터 0.9 진상조건까지 단계적으로 변화시켰으며, 이때 발전기 포화특성에 따른 고유치 해석결과를 그림 2에 나타내었다.

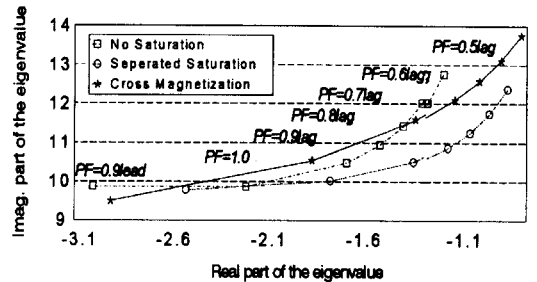


그림 2. 발전기 무한모선계통의 고유치
 Fig. 2. Eigenvalue of the synchronous machine infinite bus system

그림 2에서 계통조건이 0.9 지상조건보다 낮은 저역률의 영역에서는 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치가 그리고 진상영역의 계통조건에서는 동일축 포화특성을 고려한 경우의 고유치가 가장 불안정에 가까운 것으로 판정되었다. 발전기의 포화특성을 무시한 경우는 계통조건에 관계없이 가장 안정한 것으로 해석되었다. 즉, 일반적인 계통운전조건이라 할 수 있는 지상역률의 경우에 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치가 보다 불안정에 가까운 것으로 해석되어 안정도 판정에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 고유치의 허수부는 계통조건이 지상역률인 경우에는 교차자화 효과를 고려한 경우의 진폭이 가장 큰 것으로 해석되었고, 진상역률에서는

가장 작은 것으로 해석되었다. 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치 실수부와 허수부를 기준으로 했을 때 발전기 포화특성을 무시한 경우와 동일축 포화특성만을 고려한 경우의 고유치 실수부와 허수부의 오차율을 그림 3의 (a), (b)에 나타내었다. 그림 3의 계통조건 범위에서는 발전기의 포화특성을 무시한 경우 고유치의 실수부는 최소 3.14%에서 최대 51.65%의 오차율을, 고유치의 허수부는 최소 3.90%에서 최대 9.51%의 오차율을 갖는 것을 알 수 있다. 동일축성분 포화특성을 고려한 경우는 고유치의 실수부는 최소 1.0%에서 최대 13.67%의 오차율을, 고유치의 허수부는 최소 2.94%에서 최대 10.51%의 오차율을 갖는 것을 알 수 있다.

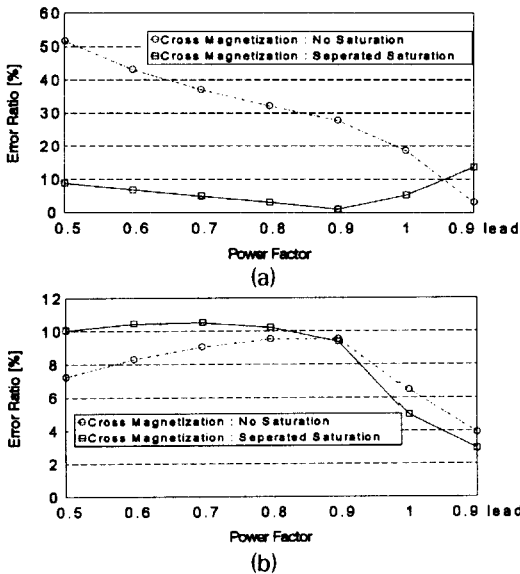


그림 3. 고유치 해석결과의 오차율 (%)
 (a) 고유치의 실수부
 (b) 고유치의 허수부

Fig. 3. Error ratio of the eigenvalue analysis
 (a) real part of the eigenvalue
 (b) imaginary part of the eigenvalue

3.2 발전기 유효전력의 변화에 의한 포화특성의 영향

계통의 역률을 0.85 지상조건으로 하고 발전기의 유효전력을 변화시켜 가면서 계통해석을 하였다. 발전기의 유효전력은 0.2pu에서부터 1.3pu의 중부하까지 단계적으로 변화하였으며, 발전기의 포화특성

에 따른 고유치 해석결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 발전기의 유효전력이 1.1pu 이하의 영역에서는 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치가 그리고 1.2pu 이상에서는 동일축 포화특성을 고려한 경우의 고유치가 가장 불안정에 가까운 것으로 해석되었다. 포화특성을 무시한 경우는 계통조건에 관계없이 가장 안정한 것으로 해석되었다. 또한 진동모드의 진폭은 교차자화 효과를 고려한 경우가 가장 큰 것으로 해석되었다. 이때의 고유치의 오차율을 그림 5의 (a), (b)에 나타내었다.

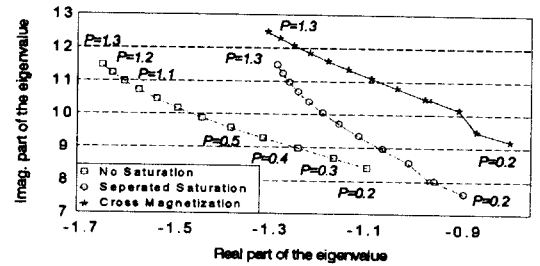


그림 4. 발전기 무한모선계통의 고유치
 Fig. 4. Eigenvalue of the synchronous machine infinite bus system

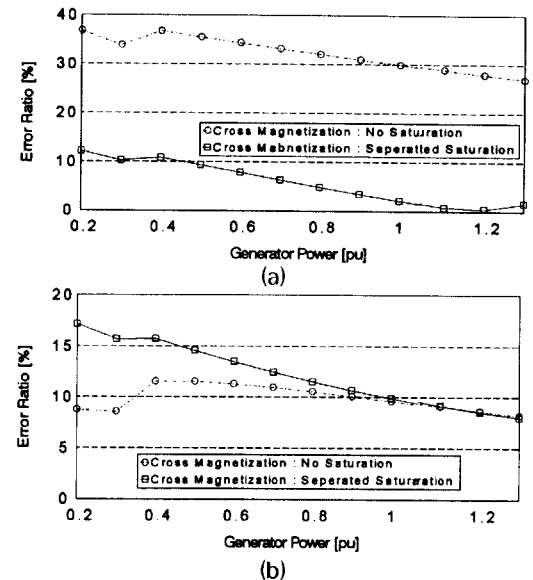


그림 5. 고유치 해석결과의 오차율 (%)
 (a) 고유치의 실수부
 (b) 고유치의 허수부
 Fig. 5. Error ratio of the eigenvalue analysis
 (a) real part of the eigenvalue
 (b) imaginary part of the eigenvalue

그림 5의 계통조건 범위에서 발전기의 포화특성을 무시한 경우 고유치의 실수부는 최소 26.95[%]에서 최대 36.77[%]의 오차율을, 고유치의 허수부는 최소 8.19[%]에서 최대 11.51[%]의 오차율을 갖는 것을 알 수 있다. 동일축성분 포화특성을 고려한 경우는 고유치의 실수부는 최소 0.43[%]에서 최대 12.17[%]의 오차율을, 고유치의 허수부는 최소 7.99[%]에서 최대 17.17[%]의 오차율을 갖는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

정태안정도 해석에 미치는 발전기 교차자화 포화특성의 영향에 관한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 발전기의 특성을 보다 정확히 해석하기 위한 발전기 무한모선계통의 상세모델에 동일축성분 전류에 의한 포화특성과 교차자화에 의한 포화특성을 포함하는 상태방정식을 발전기의 전류모델에 대하여 제시하였다.

2) 발전기의 포화특성을 종래의 동일축성분 전류에 의한 포화특성 뿐만 아니라 교차자화 효과에 의한 포화특성까지도 고려할 수 있도록 각 경우의 자속쇄교수와 전류의 관계를 나타내는 인덕턴스 행렬의 표현식을 보였다. 발전기를 해석하기 위한 기준 좌표계로 발전기의 d축이 q축보다 위상이 90° 앞서는 좌표계를 사용하여 관계식을 재정립함으로써 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기모델과 일치하면서도 교차자화 포화특성을 고려하여 보다 정확한 해석이 가능하도록 하였다.

3) 다양한 계통조건에 대하여 발전기 포화특성에 따른 고유치 해석결과를 비교하였다. 발전기 포화특성을 무시한 경우는 계통조건에 관계없이 가장 안정한 것으로 해석되었으며, 포화특성을 고려한 경우와의 오차가 큰 것으로 판정되어 안정도 해석의 정확도가 매우 낮은 것을 알 수 있었다. 또한 일반적인 계통운전조건 범위에서 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치가 가장 불안정에 가깝고 큰 진폭을 갖는 것으로 해석되어, 발전기의 교차자화 효과가 계

통의 안정도 판정에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

4) 교차자화 효과를 고려한 경우와 동일축 포화특성을 고려한 경우의 고유치의 오차가 무시할 수 없는 정도의 값을 갖는 것을 알 수 있었으며, 보다 정확한 안정도 해석을 위해서는 교차자화 효과를 고려한 발전기 모델이 계통해석에 사용되어야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad : "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2] A.M. El-Serafi, A.S. Abdallah, M.K. El-Sherbiny, E.H. Badawy : "Experimental Study of The Saturation and The Cross-Magnetizing Phenomenon in Saturated Synchronous Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No.4, pp. 815~823, December, 1988.
- [3] A.M. El-Serafi and A.S. Abdallah : "Effect of Saturation on The Steady-State Stability of A Synchronous Machine Connected to An Infinite Bus System", IEEE Transactions in Energy Conversion, Vol. 6, No.3, pp. 514~521, September, 1991.
- [4] P. Kundur : "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994.

수식기호 설명

- L_f, L_d, L_q : 발전기 계자권선, 제동권선의 인덕턴스
 T_m, T_e, H : 발전기의 기계적, 전기적 토크, 관성정수
 α_d, α_q : 발전기 d축, q축 포화계수
 AT_{ds}, AT_{qs} : 포화특성이 시작되는 d, q축 기자력 값
 γ_{dq}, γ_{qd} : d축, q축 교차자화 포화계수
 C_{od}, C_{oq} : 교차자화 포화가 시작되는 d, q축 기자력 값
 $\lambda_{dq}, \lambda_{qd}$: q, d축 전류성분에 의한 d, q축 교차자화 자속쇄교수

◆ 著 者 紹 介 ◆



김 덕 영(金德泳)
 1964년 11월 22일생. 1988년 고려대학교 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 군산대학교 전기공학과 전임강사.