

교차자화 효과를 고려한 동기발전기 포화특성의 모델링에 관한 연구

김 덕 영

군산대학교 전기공학과

A Study on the Modeling of the Synchronous Machine Saturation with the Effect of Cross Magnetization

Deok Young Kim

Department of Electrical Engineering, Kunsan National University

요 약

전력계통의 정태안정도 해석에서 발전기의 특성을 정확히 모델링하는 것은 해석결과의 정확도에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문은 발전기 무한모선 계통을 사용하여 발전기의 특성을 정확히 해석하고자 하는 경우에 발전기의 포화특성을 종래의 동일축 전류성분에 의한 포화특성뿐만 아니라 교차자화 효과에 의한 포화특성까지 고려하여 보다 정확한 해석이 가능하도록 하였다. 동일축 성분의 포화특성과 교차자화 효과에 의한 포화특성을 고려하여 발전기를 해석하기 위한 기준 좌표계로 발전기의 d축이 q축 보다 위상이 90° 앞서는 좌표계를 사용 관계식을 재정립하여 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기모델과 일치하도록 하였다. 사례연구를 통해서 포화특성을 정확히 고려하여 발전기를 모델링하는 것이 해석결과의 정확도에 매우 큰 영향을 미치는 것을 보였고, 다양한 계통조건에 대한 정태안정도 해석을 통해서 계통조건의 변화에 따라 포화특성에 영향을 미치는 요소들의 변화를 파악하였다.

Abstract— In the steady state stability analysis of power systems, an accurate modeling of a generator gives an important effect on the result of eigenvalue analysis. This paper represents a modeling of a synchronous machine infinite bus system for the more precise analysis of a generator characteristics including not only separated saturation effect but also cross magnetization effect. In the process of reforming the flux linkage equations of the state equations which have both saturation effects, the d · q-axis coordinated system of a generator is fixed so 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 there are large differences of eigenvalue analysis between the two cases, neglecting the generator saturation effect and including the saturation effect. The relations of d · q-axis current values, saturation coefficients and flux linkages are investigated as the system operating condition is changed variously.

1. 서 론

전력계통의 정태안정도 해석에서 발전기가 차지하는 비중은 매우 크며 이에 따라 발전기를 실제의 특성을 잘 나타낼 수 있도록 적절히 모델링하는 문제가 전력계통 안정도 분야의 중요 과제중 하나이다. 발전기는 계통의 규모와 계통해석시에 요구되는 해의 정확도에 따라

고전모델로부터 상세모델까지 여러 개의 모델이 사용된다. 즉, 대규모계통의 해석과 같이 계통의 규모가 큰 경우는 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 발전기를 상세모델로 나타낸다 하더라도 계자전류와 유기전압 사이의 포화특성을 정확히 고려하지 않고 단순한 비례관계로 다루게 되면 해석결과의 정확도는 그만큼 낮아지게 된다. 발전기에 대한 상세한 해석결과를 얻기 위해서는 발전기 모델링에 포화특성을 어느 정도까지 적절히 표현할 것인가 하는 문제가 제기된다^{1,4)}.

일반적으로 발전기의 포화특성을 고려하는 경우 동일축(d축, q축) 성분의 전류에 의해서만 자속성분이 포화특성을 갖는 것으로 간주하고 d축과 q축 사이의 교차자화(Cross Magnetization) 효과는 무시하였다. 그러나 원통형구조 또는 다극의 돌극형구조를 갖는 발전기의 경우 동일축상의 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 성분에 의한 포화특성(seperated saturation)만을 고려하는 경우와 교차자화에 의한 포화특성까지 고려하는 경우의 인덕턴스 행렬과 상태행렬을 제시하고, 계통해석에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 동일축상의 포화와 교차자화에 의한 포화특성을 나타내는 포화계수는 참고문헌³⁾에 있는 수식을 사용하였다.

2. 본 론

동기발전기를 모델링하기 위해서는 먼저 발전기의 전류와 자속쇄교수 등과 같은 상태변수들을 Park's Transformation을 사용하여 회전자에 d축성분과 q축성분으로 변환하여야 한다¹⁾. 본 연구에서는 기준좌표계로 발전기의 d축이 q축 보다 위상이 90° 앞서는 좌표계를 사용관계식을 재정립하여 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기모델과 일치하도록 하였다.

2-1. 동기발전기 모델링

동기발전기가 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 경우를 가정한다. 이러한 발전기 무한모선 계통은 발전기의 특성을 상세히 해석하기 위해 사용되며, 이때의 발전기 모델로는 상세모델이 사용된다. 동기발전기의 등가회로는 Fig. 1과 같다¹⁾.

Fig. 1에서 다음과 같은 전압방정식과 토크방정식을 구성할 수 있다.

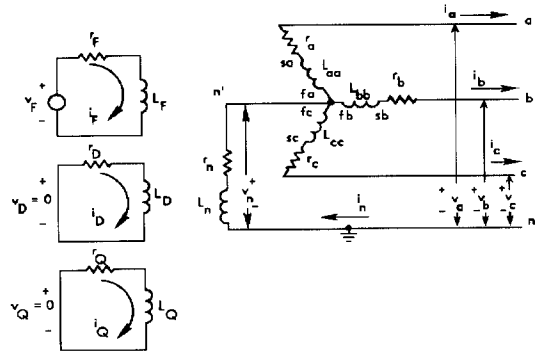


Fig. 1. Equivalent circuits of a synchronous machine.

전압방정식

$$\begin{aligned}
 \dot{\lambda}_{ds} &= -v_d - r_d i_d - \omega \lambda_{qs} \\
 \dot{\lambda}_{fs} &= v_f - r_f i_f \\
 \dot{\lambda}_{Ds} &= -r_D i_D \\
 \dot{\lambda}_{qs} &= -v_q - r_q i_q + \omega \lambda_{ds} \\
 \dot{\lambda}_{Qs} &= -r_Q i_Q
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

토크방정식

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\
 \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{2H} (T_m - T_e) \\
 \text{단, } T_e &= i_q \lambda_{ds} - i_d \lambda_{qs}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

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

$$\begin{aligned}
 v_d &= -K \sin(\delta - \alpha) + R_c i_d + L_c \dot{i}_d + \omega L_c i_q \\
 v_q &= K \cos(\delta - \alpha) + R_c i_q + L_c \dot{i}_q - \omega L_c i_d \\
 \text{단, } K &= \sqrt{3} V_{\infty} \\
 \alpha &= \text{무한모선의 전압각}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

식(1)~식(3)을 계통동작점에 대해 선형화하여 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\lambda}_{ds} \\ \Delta \dot{\lambda}_{fs} \\ \Delta \dot{\lambda}_{Ds} \\ \Delta \dot{\lambda}_{qs} \\ \Delta \dot{\lambda}_{Qs} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\omega_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_0 i_{q0}}{6H} & 0 & 0 & \frac{\omega_0 i_{d0}}{6H} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Qs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} -(r+R_c) & 0 & 0 & -\omega_s L_c & 0 & K\cos(\delta_0 - \alpha) & -(\lambda_{qso} + L_c i_{q0}) \\ 0 & -r_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_s L_c & 0 & 0 & -(r+R_c) & 0 & K\sin(\delta_0 - \alpha) & \lambda_{dso} + L_c i_{d0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\omega_s \lambda_{qso}}{6H} & 0 & 0 & -\frac{\omega_s \lambda_{dso}}{6H} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 & \times \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_o \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta v_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\omega_s}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

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 성분에 의한 포화특성

발전기의 포화특성을 해석할 때 일반적으로 누설인덕턴스와 누설자속의 영향은 무시하고 부하시의 공극자속과 기자력사이의 포화관계는 무부하시의 동일한 것으로 취급한다. 발전기의 d축전류 성분과 자속과의 포화특성은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 AT_d 는 d축 전류성분들에 의한 기자력을 의미하며, Park's Transformation에 의해서 발전기 고정자 전류의 d축성분과 계자전류 그리고 회전자 d축 제동전선에 흐르는 전류의 합으로 표현된다. 포화곡선에서 자속쇄교수 λ_{md} 를 발생시키기 위해서는 B-C에 해당하는 전류를 계자전선에 더 공급해야 하는 것을 알 수 있다. 위의 그림에서 같은 크기의 d축 전류에 대해 포화현상이 없는 경우의 자속쇄교수와 포화현상에 의한 자

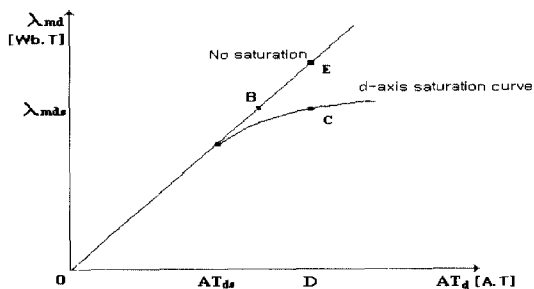


Fig. 2. D-axis saturation curve of a generator.

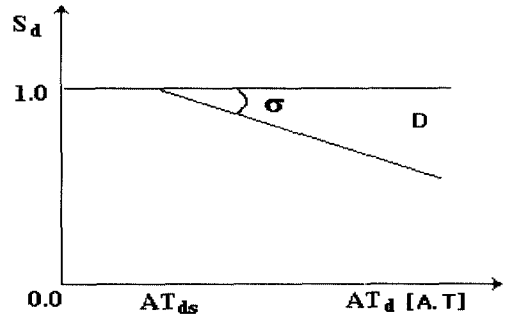


Fig. 3. D-axis separated saturation coefficient S_d .

속쇄교수의 비를 d축 포화계수 S_d 로 정의하였다.

이때의 포화계수와 상호 인덕턴스의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L_{m ds} &= S_d L_{md} \\
 L_{m qs} &= S_q L_{mq} \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서 S_d 와 S_q 는 각각 d축, q축 포화계수로서 Fig. 3과 같이 포화특성이 나타나기 시작하는 동작점에서부터 일정 기울기를 갖는 직선으로 표현된다. α_d , α_q 는 d축과 q축에서의 포화특성을 나타내는 상수이다.

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

여기서, $AT_d (\equiv i_f + i_d + i_b)$: d축의 기자력성분
 $AT_q (\equiv i_q + i_o)$: q축의 기자력성분
 AT_{ds}, AT_{qs} : 포화특성이 나타나기 시작하는 d축, q축의 기자력값
 i_b, i_o : d, q축 제동전선 전류

동일축 성분에 의한 포화특성만을 고려하는 경우의 자속쇄교수와 전류의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{fs} \\ \lambda_{Ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{Os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ds} & L_{m ds} & L_{m ds} & 0 & 0 \\ L_{m ds} & L_{fs} & L_{m ds} & 0 & 0 \\ L_{m ds} & L_{m ds} & L_{Ds} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qs} & L_{m qs} \\ 0 & 0 & 0 & L_{m qs} & L_{Os} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(7)의 포화계수와 식(8)의 인덕턴스 행렬을 선형화 하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta S_d \\ \Delta S_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_d - \alpha_d - \alpha_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_O \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dso} & L_{mbs} & L_{mbs} & 0 & 0 \\ L_{mbs} & L_{Fso} & L_{mbs} & 0 & 0 \\ L_{mbs} & L_{mbs} & L_{Dso} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qso} & L_{mqso} \\ 0 & 0 & 0 & L_{mqso} & L_{Oso} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ i_{Fo} + i_{do} & 0 \\ 0 & i_{qo} \\ 0 & i_{qo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_{mbs} \\ \Delta L_{mqso} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)의 인덕턴스 변수를 식(9)로 치환하고 선형화하면 다음과 같은 자속쇄교수와 전류와의 관계를 나타내는 인덕턴스 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mbs} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mbs} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & 0 & 0 \\ L_{mbs} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{Fso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mbs} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & 0 & 0 \\ L_{mbs} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{mbs} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & L_{Dso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qso} - \alpha_q L_{mq} i_{qo} & L_{mqso} - \alpha_q L_{mq} i_{qo} \\ 0 & 0 & 0 & L_{mqso} - \alpha_q L_{mq} i_{qo} & L_{Oso} - \alpha_q L_{mq} i_{qo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_O \end{bmatrix} \quad (11)$$

발전기가 승전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 경우 식(3)과 식(4)에서 자속쇄교수의 일치미분행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{ds} \\ \Delta \lambda_{Fs} \\ \Delta \lambda_{Ds} \\ \Delta \lambda_{qs} \\ \Delta \lambda_{Os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + l_d + L_e & L_1 & L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & L_1 + l_F & L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & L_1 & L_1 + l_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_2 + l_q + L_e & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & L_2 & L_2 + l_O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_O \end{bmatrix} \quad (12)$$

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

식(11)과 식(12)의 인덕턴스 행렬을 $[L_{SS}]$, $[L_{SS}]'$ 라 하면 식(4)로부터 동일축 성분에 의한 포화특성만을 고려하는 경우의 간단한 행렬식은 다음과 같이 된다.

$$[L_{SS}'] \Delta \hat{I} = [S][L_{SS}] \Delta \hat{I} + [R] \Delta \hat{I} + [B] \Delta \hat{U} \quad (13)$$

식(13)으로부터 발전기 무한모선계통의 상태방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \Delta \hat{I} &= [L_{SS}]^{-1} \{ [S][L_{SS}] + [R] \} \Delta \hat{I} + [L_{SS}]^{-1} [B] \Delta \hat{U} \\ &= [A_{SS}] \Delta \hat{I} + [B_{SS}] \Delta \hat{U} \end{aligned} \quad (14)$$

2-3. 교차자화에 의한 포화특성

본 절에서는 정확한 안정도 해석결과를 얻기 위해 발전기의 포화특성을 동일축 성분에 의한 포화뿐만 아니

라 d축, q축 사이의 교차자화(Cross Magnetization) 효과까지를 고려하는 경우의 발전기 무한모선 계통의 표현식을 살펴보고자 한다. 발전기의 d축과 q축 사이의 상호관계를 나타내는 교차자화 자속은 전압강하의 작용을 하게 되며 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{dq} = \begin{cases} 0 & |AT_q| \leq C_{oq} \\ \gamma_{qd} AT_d (AT_q - C_{oq}) & |AT_q| > C_{oq} \end{cases}$$

$$\lambda_{qd} = \begin{cases} 0 & |AT_d| \leq C_{od} \\ \gamma_{dq} AT_q (AT_d - C_{od}) & |AT_d| > C_{od} \end{cases} \quad (15)$$

여기서, λ_{dq} , λ_{qd} : d, q축의 교차자화 자속쇄교수
 γ_{dq} , γ_{qd} : 교차자화 계수
 C_{od} , C_{oq} : 교차자화가 발생하기 시작하는 기자력값
 $(AT_d - C_{od})$: d축 포화정도
 $(AT_q - C_{oq})$: q축 포화정도

식(15)에서 λ_{dq} 는 q축 전류성분에 의한 d축의 자속쇄교수를 의미하고, λ_{qd} 는 d축 전류성분에 의한 q축의 자속쇄교수를 의미한다. 위의 두 식으로부터 교차자화 현상으로 인한 동기발전기의 한 축의 자속변화는 그 축에서의 기자력 성분과 다른 축의 포화정도에 비례함을 알 수 있다. 식(15)를 전류성분으로 치환하고 동작점에 대하여 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{dq} \\ \Delta\lambda_{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{qd}(i_{q0} - C_{oq}) & \gamma_{qd}(i_{q0} - C_{oq}) & \gamma_{qd}(i_{q0} - C_{oq}) & \gamma_{qd}(i_{d0} + i_{F0}) & \gamma_{qd}(i_{d0} + i_{F0}) \\ \gamma_{dq}i_{q0} & \gamma_{dq}i_{q0} & \gamma_{dq}i_{q0} & \gamma_{dq}(i_{d0} + i_{F0} - C_{od}) & \gamma_{dq}(i_{d0} + i_{F0} - C_{od}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

식(16)의 교차자화에 의한 자속쇄교수는 d축, q축의 자속쇄교수를 감소하는 방향으로 작용하며, 이때의 행렬표현식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{ds} \\ \Delta\lambda_{Fs} \\ \Delta\lambda_{Ds} \\ \Delta\lambda_{qs} \\ \Delta\lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dso} & L_{mdso} & L_{mdso} & 0 & 0 \\ L_{mdso} & L_{Fso} & L_{mdso} & 0 & 0 \\ L_{mdso} & L_{mdso} & L_{Dso} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qso} & L_{mqso} \\ 0 & 0 & 0 & L_{mqso} & L_{Qso} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{F0} + i_{d0} \\ i_{F0} + i_{d0} \\ i_{F0} + i_{d0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_{mds} \\ \Delta L_{mq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{dq} \\ \Delta\lambda_{dq} \\ \Delta\lambda_{qd} \\ \Delta\lambda_{qd} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(16)의 선형화된 교차자화 자속쇄교수를 식(17)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{ds} \\ \Delta\lambda_{Fs} \\ \Delta\lambda_{Ds} \\ \Delta\lambda_{qs} \\ \Delta\lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + l_d & L_1 & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 + l_F & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 & L_1 + l_D & L_{12} & L_{12} \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 + l_q & L_2 \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 & L_2 + l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서, $L_1 = L_{mdso} - K_d - \gamma_{qd}(i_{q0} - C_{oq})$
 $L_2 = L_{mqso} - K_q - \gamma_{dq}(i_{F0} + i_{d0} - C_{od})$
 $L_{12} = -\gamma_{qd}(i_{F0} + i_{d0})$
 $L_{21} = -\gamma_{dq} i_{q0}$
 $K_d = \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0})$
 $K_q = \alpha_q L_{mq} i_{q0}$

식(18)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 자속쇄교수의 일차미분 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{ds} \\ \Delta\lambda_{Fs} \\ \Delta\lambda_{Ds} \\ \Delta\lambda_{qs} \\ \Delta\lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + l_d + L_c & L_1 & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 + l_F & L_1 & L_{12} & L_{12} \\ L_1 & L_1 & L_1 + l_D & L_{12} & L_{12} \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 + l_q + L_c & L_2 \\ L_{21} & L_{21} & L_{21} & L_2 & L_2 + l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (19)$$

식(18)과 식(19)의 인덕턴스 행렬을 $[L_{CM}]$, $[L_{CM}']$ 라 하면 식(4)로부터 교차자화에 의한 포화특성을 고려하는 경우의 간단한 행렬식은 다음과 같이 된다.

$$[L_{CM}']\{\Delta i\} = [S][L_{CM}]\{\Delta i\} + [R]\{\Delta i\} + [B]\{\Delta U\} \quad (20)$$

식(20)으로부터 발전기 무한모선계통의 상태방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{\Delta \dot{i}\} &= [L_{CM}]^{-1}\{[S][L_{CM}] + [R]\}\{\Delta i\} + [L_{CM}]^{-1}[B]\{\Delta U\} \\ &= [A_{CM}]\{\Delta i\} + [B_{CM}]\{\Delta U\} \end{aligned} \quad (21)$$

3. 사례연구

발전기가 송전선을 통해서 무한모선에 연결되어 있는 경우에 대하여 정태안정도 해석을 하였다. 다음과 같이 발전기포화를 무시하는 경우와 동일축 성분에 의한 포화만을 고려하는 경우 그리고 교차자화에 의한 포화현상을 고려한 경우에 대해 상태행렬을 구성하고 고유치 해석을 하였다. 발전기는 상세모델을 사용하였고 계통 조건과 정수값들은 참고문헌¹⁾의 값을 사용하였으며, 포화계수는 참고문헌²⁾의 값을 사용하였다.

사례 1: 발전기 동일축 포화현상과 교차자화 현상을 모두 무시한 경우($\alpha_d, \alpha_q = 0.0, \gamma_{dq}, \gamma_{qd} = 0.0$)

사례 2: 발전기의 동일축상의 포화현상만 고려한 경우($\gamma_{dq}, \gamma_{qd} = 0.0$)

사례 3: 동일축상의 포화현상과 교차자화 현상을 모두 고려한 경우

Table 1은 유효전력이 1.0 pu이고 역률이 0.85 지상조건인 경우의 계통해석결과인 전체 고유치를 나타낸다. 고유치는[1/sec] 단위로 나타내었으며, 복소근의 경우는 공액근을 의미한다.

Table 1에서 4번 진동모드를 제외한 나머지 진동모드들은 진동을 하지 않거나 감쇠가 매우 빠른 진동모드이다. 4번 진동모드는 1.472 Hz에서 1.487 Hz 사이의 주파수를 갖는 제동이 불량한 전기기계적 진동모드이며, 정태안정도 해석시에 주요 관심대상이 되는 진동모드이다. Table 1에서 발전기의 포화를 고려하지 않은 경우의 고유치가 가장 안정한 것으로 해석된 반면에 사례 2와 사례 3의 고유치는 보다 불안정에 가까운 것으로 해석되었다. 즉 발전기의 포화특성을 고려하지 않는 경우 안정도 해석결과와 정확도가 그만큼 낮아지는 것을

Table 1. Eigenvalues of the synchronous machine infinite bus system.

진동모드	고유치					
	사례 1		사례 2		사례 3	
	실수부	허수부	실수부	허수부	실수부	허수부
1	-13.54605	376.32610	-13.55722	376.31430	-13.55723	376.32060
2	-37.52639	0.0	-38.04001	0.0	-38.10396	0.0
3	-47.24751	0.0	-48.39123	0.0	-50.94065	0.0
4	-0.35504	9.34380	-0.30141	9.25121	-0.30530	9.25165
5	-0.20211	0.0	-0.27043	0.0	-0.27464	0.0

알 수 있다. 또한 사례 2의 동일축 성분 포화특성만을 고려한 경우와 사례3의 교차자화 효과를 고려한 경우의 해석결과도 고유치값의 차이가 발생함을 알 수 있다. 그러나, 교차자화 효과를 나타내는 발전기 포화계수들은 각 발전기의 구조와 형태 등에 따라 결정되는 실측값으로 본 연구에서는 실측데이터가 없는 관계로 참고문헌²⁹⁾에 제시된 포화계수를 사용하여 계통해석을 하였으며, 이러한 이유로 교차자화 효과에 의한 고유치 해석 결과에 미치는 영향이 충분히 반영되지 않은 것으로 생각된다. 참고문헌²⁹⁾에 의하면 교차자화 효과에 의한 해석결과의 차이는 대략 10% 정도인 것으로 알려져 있으며, 따라서 발전기 특성을 고려한 정확한 포화계수를 사용하여 계통해석을 하는 경우 교차자화 효과에 의한 해석결과의 차이는 보다 크게 나타날 것으로 생각된다.

3-1. 계통역률 변화에 의한 포화특성의 영향

위의 계통에 대해 발전기의 유효전력을 일정하게 하고 역률을 변화시켜 가면서 계통해석을 하였다. 계통의 역률을 0.5 지상조건에서부터 0.7 진상조건까지 단계적으로 변화시켰으며, 발전기의 포화특성에 따른 고유치 해석결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

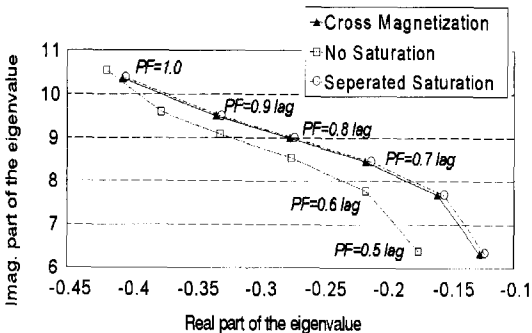


Fig. 4. Eigenvalues of the synchronous machine infinite bus system (Generator power = 1.0 pu, PF is varied in the lagging condition).

Fig. 4는 계통의 역률을 지상조건에서 단계적으로 변화시켜 가면서 관찰한 고유치의 변화를 나타낸 것이다. 계통의 역률이 낮을수록 포화를 고려하지 않은 경우와 포화특성을 고려한 경우의 해석결과의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 동일축 성분의 포화특성만을 고려한 경우와 교차자화 효과를 고려한 경우도 역률이 낮아짐에 따라 고유치의 차이가 보다 크게 됨을 알 수 있다. Fig. 5의 진상계통조건에서는 동일축 성분의 포화특성을 고려한 경우와 교차자화 효과를 고려한 경우의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. Table 2에 이때의 계통조건에 따른 d축, q축 전류성분과 포화계수 그리고 교차자화에 의한 자속쇄교수의 값을 나타내었다.

Table 2에서 동일축 성분 포화특성을 나타내는 포화계수 S_d 는 역률이 0.5 지상조건일 때 가장 작은 값을 갖고 0.9 진상조건에서부터는 1.0의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 역률이 0.9 진상조건 이상에서는 d축 전류성분에 의한 동일축 성분 포화는 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 반대로 포화계수 S_q 는 역률이 0.6 지상조건 이하에서 1.0의 값을 가지며 0.9 진상조건까지 값이 감소하다가 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 포화계수값이 1.0에 가까운 값을 갖게 되어 q축 전류성분에 의

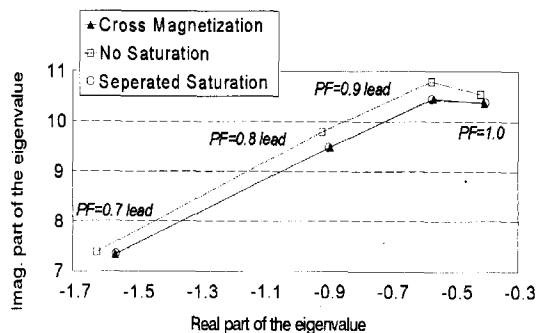


Fig. 5. Eigenvalues of the synchronous machine infinite bus system (Generator power = 1.0 pu, PF is varied in the leading condition).

Table 2. Saturation coefficients.

(a) Power is constant and PF is in the lagging condition						
	PF 지상조건					
	PF = 0.5	PF = 0.6	PF = 0.7	PF = 0.8	PF = 0.9	PF = 1.0
AT_d	1.36100	1.26959	1.18655	1.10153	0.99865	0.72593
AT_q	0.41655	0.48471	0.55346	0.62670	0.71336	0.90244
S_d	0.83565	0.85603	0.87455	0.89351	0.91645	0.97727
S_q	1.0	1.0	0.99756	0.98994	0.98093	0.96127
λ_{dt}	0.0330	0.04463	0.05476	0.06375	0.07164	0.07404
λ_{qt}	0.11361	0.12068	0.12585	0.12865	0.12736	0.09712

(b) Power is constant and PF is in the leading condition				
	PF 진상조건			
	PF = 0.7	PF = 0.8	PF = 0.9	PF = 1.0
AT_d	-0.20286	0.02972	0.29665	0.72593
AT_q	0.97887	1.04727	1.04891	0.90244
S_d	1.0	1.0	1.0	0.97727
S_q	0.95332	0.94620	0.94603	0.96127
λ_{dt}	-0.02317	0.00372	0.03721	0.07404
λ_{qt}	0.0	0.0	0.0	0.09712

한 동일축 포화특성의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 전체적으로 동일축 성분 포화특성에 의한 고유치 해석 결과에 미치는 영향은 계통의 역률이 저역률의 지상조건일수록 크게 나타나고, 진상조건으로 갈수록 작아지는 것을 알 수 있다.

q축 전류성분에 의한 d축의 교차자화 자속쇄교수 λ_{dq} 는 계통의 역률이 0.5 지상조건에서부터 점차로 증가하다가 역률 1.0에서부터 다시 감소하여 0.7 진상조건 이하부터는 고정자의 d축 전류가 계자전류보다 큰 값을 갖게 되어 d축 전류성분의 합이 (-)값을 갖는 것을 알 수 있으며, 고유치 해석에 미치는 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다. d축 전류성분에 의한 q축의 교차자화 자속쇄교수 λ_{qd} 는 계통의 역률이 0.5 지상조건에서 0.8 지상조건까지는 증가하다가 0.9 지상조건 이상에서 급격히 감소하여, 0.9 진상조건에서 부터는 0의 값을 갖는다. 즉 계통조건이 0.9 진상조건에서 부터는 d축 전류성분에 의한 교차자화 포화효과는 발생하지 않음을 알 수 있다.

3-2. 발전기 유효전력의 변화에 의한 포화특성의 영향

계통의 역률을 0.85 지상조건으로 하고 발전기의 유효전력을 변화시켜 가면서 계통해석을 하였다. 발전기의 유효전력은 0.2 pu에서부터 1.2 pu의 중부하까지 단계적으로 변화하였으며, 발전기의 포화특성에 따른 고유치 해석결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 발전기의 유효전력이 작을수록 포화특성

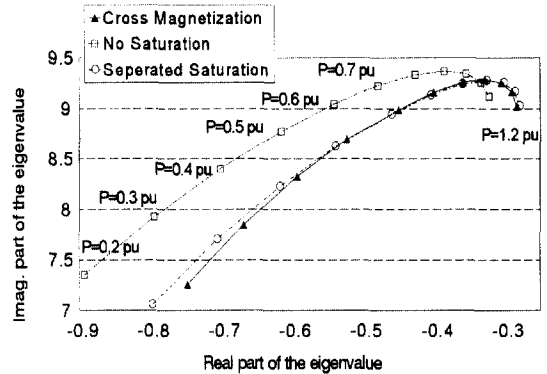


Fig. 6. Eigenvalues of the synchronous machine infinite bus system (PF = 0.85 lag, Generator Power is varied from 0.2 pu to 1.2 pu).

을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 고유치 해석 결과의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 동일축 성분 포화특성만을 고려한 경우와 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치 해석 결과의 차이는 유효전력이 작을수록 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. Table 3에 이때의 계통조건에 따른 d축, q축 전류성분과 포화계수 그리고 교차자화에 의한 자속쇄교수의 값을 나타내었다.

Table 3에서 d축 전류성분에 의한 동일축 성분 포화계수 S_d 는 발전기 유효전력이 증가할수록 서서히 증가하다가 1.0 pu 이상에서 다시 감소하는 것을 알 수 있다. q축 전류성분에 의한 포화계수 S_q 는 유효전력이 0.5 pu

Table 3. Saturation coefficients.

(a) PF is 0.85 lag and Power is varied from 0.2 to 0.7						
PF = 0.85 lag						
	P = 0.2	P = 0.3	P = 0.4	P = 0.5	P = 0.6	P = 0.7
AT _d	1.10721	1.09284	1.07916	1.06791	1.05966	1.05441
AT _q	0.27780	0.37270	0.44659	0.50476	0.55121	0.58884
S _d	0.89224	0.89545	0.89850	0.90101	0.90285	0.90402
S _q	1.0	1.0	1.0	1.0	0.99779	0.99388
λ _{sdq}	0.00227	0.01883	0.03135	0.04097	0.04852	0.05463
λ _{sqd}	0.05744	0.07567	0.08908	0.0920	0.10715	0.11366

(b) PF is 0.85 lag and Power is varied from 0.8 to 1.2					
PF = 0.85 lag					
	P = 0.8	P = 0.9	P = 1.0	P = 1.1	P = 1.2
AT _d	1.05192	1.05190	1.05404	1.05805	1.06368
AT _q	0.61978	0.64556	0.66730	0.68585	0.70182
S _d	0.90457	0.90458	0.90410	0.90321	0.90195
S _q	0.99066	0.98798	0.98572	0.98379	0.98213
λ _{sdq}	0.05971	0.06405	0.06785	0.07124	0.07434
λ _{sqd}	0.11923	0.12419	0.12874	0.13304	0.13716

까지 1.0의 값을 가지며, 유효전력이 그 이상인 경우는 서서히 감소한다. 즉 발전기의 유효전력이 0.5 pu 이하에서는 q축 전류성분에 의한 동일축 성분의 포화효과는 발생하지 않으며, 유효전력이 0.5 pu 이상인 경우도 계통에 미치는 영향이 d축 전류성분에 의한 포화효과보다 작은 것을 알 수 있다.

q축 전류성분에 의한 d축의 교차자화 자속쇄교수 λ_{sdq}와 d축 전류성분에 의한 q축의 교차자화 자속쇄교수 λ_{sqd}는 발전기의 유효전력이 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있으며, 상대적으로 d축 전류성분에 의한 교차자화 포화효과의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

교차자화 효과를 고려한 동기발전기 포화특성의 모델링에 관한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

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

(2) 발전기의 포화특성을 종래의 동일축 성분 전류에 의한 포화특성 뿐만 아니라 교차자화 효과에 의한 포화특성까지도 고려할 수 있도록 각 경우의 자속쇄교수와 전류의 관계를 나타내는 인덕턴스 행렬의 표현식을 보

였다. 발전기를 해석하기 위한 기준 좌표계로 발전기의 d축이 q축 보다 위상이 90° 앞서는 좌표계를 사용 관계식을 재정립하여 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기모델과 일치하도록 하였다.

(3) 계통조건을 다양하게 변화시켜 가면서 정태안정도 해석을 하여 발전기 포화특성이 고유치 해석결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 발전기의 포화특성을 고려하지 않은 경우와 포화특성을 고려한 경우의 고유치 해석결과는 차이가 크게 발생하며, 포화특성을 고려한 경우가 보다 불안정에 가까운 진동모드로 해석되는 것을 알 수 있었다.

(4) 동일축 전류성분에 의한 포화특성만을 고려한 경우와 교차자화에 의한 포화특성까지 고려한 경우의 고유치해석 결과는 계통조건이 저역률의 지상조건일수록 해석결과의 차이가 발생함을 보였다. 교차자화 효과에 의한 포화특성은 계통조건에 따른 전류성분값과 발전기의 구조적 특성에 기인하는 교차자화 포화계수에 영향을 받으며, 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 각 발전기의 구조적 특성을 고려한 정확한 교차자화 포화계수를 구하는 연구가 필요한 것으로 생각된다.

사용기호

- v_{sd}, v_{sq} : 발전기 단자전압의 d축, q축 성분
- v_{∞sd}, v_{∞sq} : 무한모선 전압의 d축, q축 성분

R_e, L_e : 송전선의 임피던스
 δ : 발전기의 위상각
 α : 무한모션 전압각
 ω : 발전기 각속도
 i_d, i_q : 발전기 고정자 권선의 d축, q축 전류
 i_f : 계자전류
 i_D, i_Q : D, Q 제동권선 전류
 L_{mds}, L_{mq} : d축, q축 상호 인덕턴스
 L_{cd}, L_{cq} : 발전기 고정자권선의 d축, q축 인덕턴스
 L_F, L_D, L_Q : 발전기 계자권선, 제동권선의 인덕턴스
 I_d, I_q : d축, q축 누설인덕턴스
 I_f, I_D, I_Q : 계자권선, 제동권선의 누설인덕턴스
 λ_d, λ_q : 발전기 고정자 권선의 d축, q축 자속쇄교수
 λ_f : 계자권선의 자속쇄교수
 λ_D, λ_Q : 제동권선의 자속쇄교수
 r, r_f, r_D, r_Q : 고정자권선, 계자권선, 제동권선의 저항
 T_m, T_e : 발전기의 기계적, 전기적 토크
 H : 발전기 관성정수
 S_d, S_q : 동일축 성분 전류에 의한 d축, q축 포화계수
 α_d, α_q : 발전기 d축, q축 포화계수
 AT_d, AT_q : d축, q축 기자력 성분
 AT_{ds}, AT_{qs} : 포화특성이 나타나기 시작하는 d축, q축 기자력 값

$\lambda_{dq}, \lambda_{qd}$: q, d축의 전류성분에 의해 발생하는 d, q축의 교차자화 자속쇄교수
 γ_{qd}, γ_{dq} : d축, q축 교차자화 포화계수
 C_{rd}, C_{rq} : 교차자화 포화가 나타나기 시작하는 d축, q축 기자력 값

참고문헌

1. Anderson, P.M. and Fouad, A.A.: Power System Control and Stability, Iowa State University Press, Ames, Iowa (1977).
2. El-Serafi, A.M., Abdallah, A.S., El-Sherbiny, M.K. and Badawy, E.H.: "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. El-Serafi, A.M. and Abdallah, A.S.: "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. Kundur, P.: Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc. (1994).