



$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{ds} \\ \Delta\lambda_{Fs} \\ \Delta\lambda_{Ds} \\ \Delta\lambda_{qs} \\ \Delta\lambda_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1+l_d & L_1 & L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & L_1+l_F & L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & L_1 & L_1+l_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_2+l_q & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & L_2 & L_2+l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix}$$

여기서,  $L_1 = L_{mso} - \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do})$   
 $L_2 = L_{mqo} - \alpha_q L_{mq} i_{qo}$  (3)

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

### 2.1.2 교차자화에 의한 포화특성

본 절에서는 정확한 안정도 해석 결과를 얻기 위해 발전기의 포화특성을 동일축 성분에만 의한 포화뿐만 아니라 d축, q축 사이의 교차자화 효과까지를 고려하는 경우의 인덕턴스 행렬의 표현식을 살펴보고자 한다. 발전기의 d축과 q축 사이의 상호관계를 나타내는 교차자화 자속은 다음과 같이 표현된다.[3]

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

$$\lambda_{od} = \begin{cases} 0.0 & | AT_d \leq C_{od} \\ r_{od} AT_d (AT_d - C_{od}) & | AT_d > C_{od} \end{cases}$$
 (4)

교차자화에 의한 자속쇄교수는 d축, q축의 자속쇄교수를 감소하는 방향으로 작용하며, 식(4)를 발전기 무한모선 계통에 적용하여 선형화하면 다음과 같은 인덕턴스 행렬을 구할 수 있다.

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

여기서,  $L_1 = L_{mso} - K_d - \gamma_{od}(i_{qo} - C_{od})$   
 $L_2 = L_{mqo} - K_q - \gamma_{dq}(i_{Fo} + i_{do} - C_{od})$   
 $L_{12} = -\gamma_{od}(i_{Fo} + i_{do})$   
 $L_{21} = -\gamma_{dq} i_{qo}$   
 $K_d = \alpha_d L_{md}(i_{Fo} + i_{do})$   
 $K_q = \alpha_q L_{mq} i_{qo}$  (5)

식(5)에서 교차자화에 의한 포화특성을 고려한 경우 인덕턴스 행렬의 비대각블록 요소가 0이 아닌 값을 가짐을 알 수 있다.

### 2.2 동기화토크와 제동토크 표현식

여자계통을 포함하는 발전기 무한모선계통의 동기화토크와 제동토크는 다음과 같다.

$$T_s = K_1 - \frac{K_2 K_5 K_e [1/K_3 + K_6 K_e - \omega^2 \tau_{do}' \tau_e]}{[1/K_3 + K_6 K_e - \omega^2 \tau_{do}' \tau_e]^2 + \omega^2 (\tau_{do}' + \tau_e / K_3)^2}$$

$$T_d = \frac{K_2 K_5 K_e (\tau_{do}' + \tau_3 / K_3) \omega}{[1/K_3 + K_6 K_e - \omega^2 \tau_{do}' \tau_e]^2 + \omega^2 (\tau_{do}' + \tau_e / K_3)^2}$$
 (6)

식(6)에서  $L_d, L_q, L_d', \tau_{do}'$ 는 포화효과의 영향을 받는 값

이며, 다음과 같이 구해진다.

$$L_d = L_1 + l_d$$

$$L_q = L_2 + l_q$$

$$L_d' = (L_1 + l_d) - \frac{L_1(L_{12}L_{21} - L_1L_2) - L_{12}[L_{21}(L_1 + l_F) - L_1L_{21}]}{L_{12}L_{21} - L_2(L_1 + l_F)}$$

$$\tau_{do}' = \frac{L_1 + l_F}{r_F}$$
 (7)

식(7)에서  $L_1, L_2, L_{12}, L_{21}$ 은 동일축 포화효과를 고려하는 경우와 교차자화 효과를 고려하는 경우 각각 식(3), 식(5)와 같다. 식(7)은 교차자화 효과를 고려하는 경우와 동일축 포화만을 고려하는 경우 또는 포화효과를 고려하지 않는 경우에 상관없이 동일한 표현식을 가지며, 각 경우에 인덕턴스의 값만이 바뀌게 된다.

## 3. 사례연구

### 3.1 고유치해석에 미치는 영향

#### 3.1.1 계통역률변화에 의한 영향

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 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.

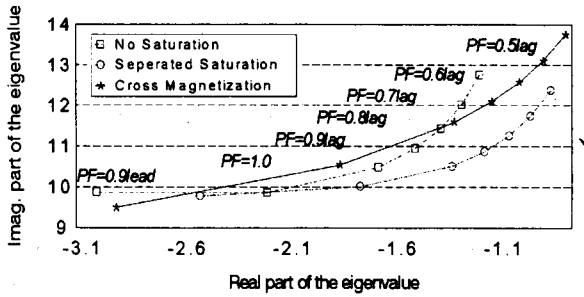


그림 2. 발전기 무한모선계통의 고유치

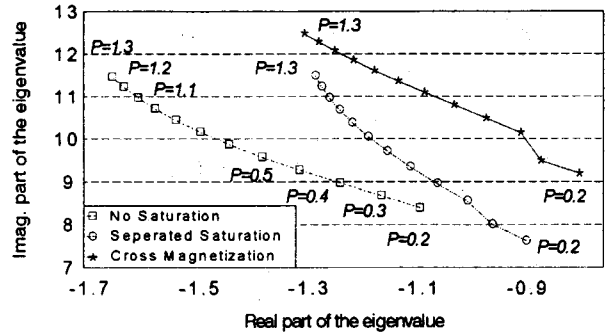
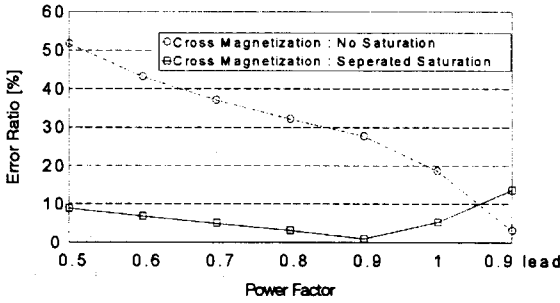
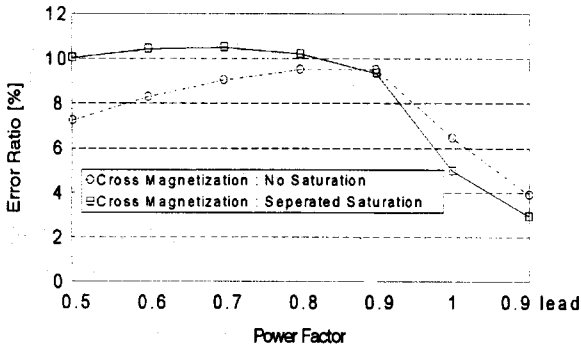


그림 4. 발전기 무한모선계통의 고유치

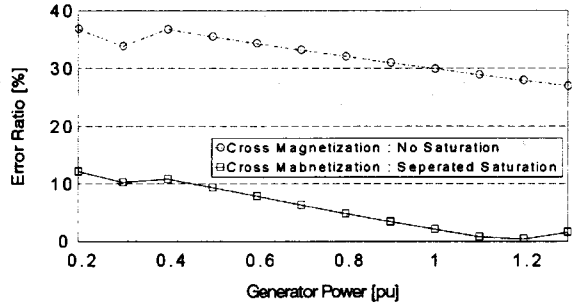


(a)

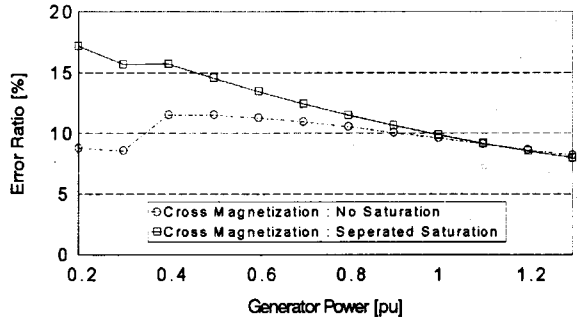


(b)

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



(a)



(b)

그림 5. 고유치 해석결과의 오차율 [%]  
(a) 고유치의 실수부  
(b) 고유치의 허수부

### 3.1.2 발전기 유효전력의 변화에 의한 영향

계통의 역률을 0.85 지상조건으로 하고 발전기의 유효전력을 변화시켜 가면서 계통해석을 하였다. 발전기의 유효전력은 0.2 pu에서부터 1.3 pu의 중부하까지 단계적으로 변화하였으며, 발전기의 포화특성에 따른 고유치 해석결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 발전기의 유효전력이 1.1 pu 이하의 영역에서는 교차자화 효과를 고려한 경우의 고유치가 그리고 1.2 pu 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. 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.

### 3.2 동기화토크와 제동토크에 미치는 영향

발전기의 유효전력을 1.0 pu으로 고정시키고 역률을 0.5 지상조건에서 0.2 진상조건까지 변화시켜 가면서 동기화토크와 제동토크의 변화를 해석하였다.

그림 6과 7에서 동기화토크는 역률이 0.9 진상조건인 경우에 동일축 포화효과만을 고려한 경우와는 15.64%, 포화효과를 고려하지 않은 경우와는 20.11%의 오차를 갖는

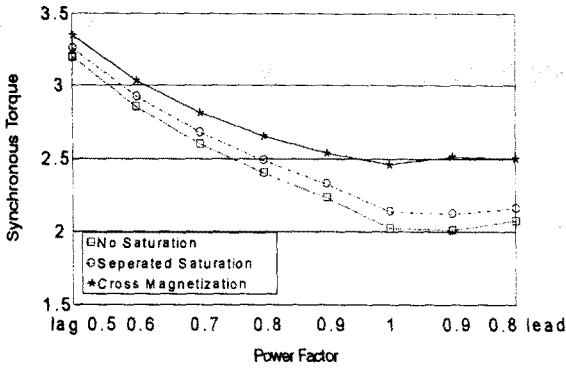


그림 6. 동기화토크에 미치는 포화효과의 영향

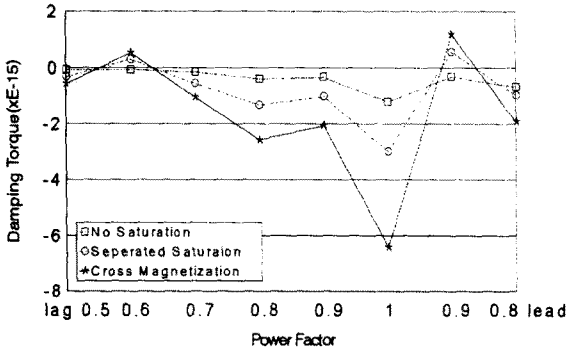


그림 7. 제동토크에 미치는 포화효과의 영향

것을 알 수 있다. 제동토크는 역률이 1.0인 경우에 동일 축 포화효과만을 고려한 경우와는 53.34%, 포화효과를 고려하지 않은 경우와는 81.03%의 오차를 갖는다. 또한 일반적인 계통운용조건이라 할 수 있는 역률 0.8, 0.9 지상조건에서 교차자화 효과를 고려한 경우의 동기화토크와 제동토크의 해석결과에 차이가 많이 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

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

(1) 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  $90^\circ$  앞서는 좌표계를 사용하여 관계식을 재정립함으로써 정태안정도 해석에 사용하던 기존의 발전기 모델과 일치하면서도 교차자화 포화특성을 고려하여 보다 정확한 해석이 가능하도록 하였다.

(2) 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 계통의 안정도 판정에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(3) 여자계통을 포함하는 발전기 무한모선계통의 동기화토크와 제동토크를 계산하기 위한 과도인덕턴스와 시정수의 포화효과를 고려한 경우의 일반 표현식을 제시하였으며, 해석결과 교차자화 포화효과를 고려한 경우와 동일 축 포화효과만을 고려한 경우 그리고 포화효과를 고려하지 않은 경우의 동기화토크와 제동토크 값의 차이가 많이 발생하는 것을 알 수 있었다.

(4) 이상의 결과로부터 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 교차자화 효과를 고려한 발전기 모델을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

#### [참고 문헌]

- [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.