

교차자화 포화효과에 의한 발전기 정수와 간략모델에 미치는 영향에 관한 연구

김덕영
군산대학교 전기공학과

권세혁
고려대학교 전기공학과

A study on the effect of cross magnetization to the generator parameters and simplified linear model

Deok-Young Kim
Kunsan National Univ.

Sae-Hyuk Kwon
Korea Univ.

Abstract - This paper presents an effect of cross magnetization to the generator simplified linear model which is used for multi-machine power systems. The formulae of reactances and time constant with saturation effect are presented. The simulation results show that cross magnetization has an effect which can not be ignored, to the reactances, time constant and eigenvalues in one machine infinite bus system of simplified linear model.

여기서,
 $AT_d (\neq i_F + i_D + i_D)$: d축의 기자력성분
 $AT_q (\neq i_q + i_Q)$: q축의 기자력성분
 AT_{ds}, AT_{qs} : 포화특성이 나타나기 시작하는 d축, q축 기자력 값
 α_d, α_q : d축, q축 동일축 포화계수

상세모델로 나타낸 발전기의 인덕턴스 행렬에 식 (1), (2)를 적용하여 선형화하면 다음과 같다.

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

여기서, $L_1 = L_{ms0} - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0})$
 $L_2 = L_{mq0} - \alpha_q L_{mq} i_{q0}$ (3)

1. 서 론

발전기의 계자자속은 계자전류에 대해 포화특성을 가지며, 이 경우 고정자권선에 유기되는 전압은 그만큼 감소하게 된다. 따라서 발전기 특성에 대한 보다 정확한 해석을 하기 위해서는 발전기 모델에 포화특성을 어느 정도까지 적절히 표현할 것인가 하는 문제가 제기된다. 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 원동형구조 또는 다극의 돌극형구조를 갖는 발전기의 경우 동일축 포화특성만을 고려하는 경우 필드 테스트에 의한 발전기의 특성해석과는 무시할 수 없는 정도의 오차가 발생하며, 그 원인은 주로 계자자속의 비대칭성에 기인하는 교차자화 효과에 의한 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 다기계통의 해석에 일반적으로 사용하는 발전기의 간략모델(Simplified Linear Model)에 대하여 동일축 포화특성(Separated Saturation)만을 고려하는 경우와 교차자화에 의한 포화특성까지 고려하는 경우에 발전기 정수와 해석결과에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

식(3)에서 L_1, L_2 의 값은 포화효과를 고려하지 않는 경우 동일축 포화계수인 α_d, α_q 가 0이 되어 포화효과를 고려하지 않은 경우의 인덕턴스와 같은 값이 된다. 또한 동일축 포화특성만을 고려하는 경우 d축과 q축 사이의 인덕턴스 행렬은 비대각 블록요소가 0인 구조를 갖는다.

2.1.2 교차자화 포화특성

발전기의 d축, q축 사이의 교차자화 효과를 고려한 경우의 교차자화 자속은 다음과 같이 정의된다.(3)

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

여기서, C_{od}, C_{oq} : 교차자화 포화가 나타나기 시작하는 d축, q축 기자력 값
 γ_{od}, γ_{dq} : d축, q축 교차자화 포화계수

2. 본 론

2.1 인덕턴스 행렬의 구조

2.1.1 동일축 포화특성

발전기를 상세모델로 나타내고 동일축 포화특성을 고려하는 경우의 상호인덕턴스와 포화계수는 참고문헌(3)에서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} L_{m ds} &= S_d L_{md} \\ L_{m qs} &= S_q L_{mq} \end{aligned}$$
 (1)

$$\begin{aligned} S_d &= \begin{cases} 1.0 & |AT_d| \leq AT_{ds} \\ 1.0 - \alpha_d (AT_d - AT_{ds}) & |AT_d| > AT_{ds} \end{cases} \\ S_q &= \begin{cases} 1.0 & |AT_q| \leq AT_{qs} \\ 1.0 - \alpha_q (AT_q - AT_{qs}) & |AT_q| > AT_{qs} \end{cases} \end{aligned}$$
 (2)

교차자화에 의한 자속쇄교수는 d축, q축의 자속쇄교수를 감소하는 방향으로 작용하며, 식(4)를 발전기 상세모델에 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, $L_1 = L_{m ds0} - K_d - \gamma_{od}(i_{q0} - C_{oq})$
 $L_2 = L_{m qs0} - K_q - \gamma_{dq}(i_{F0} + i_{d0} - C_{od})$
 $L_{12} = -\gamma_{od}(i_{F0} + i_{d0})$
 $L_{21} = -\gamma_{dq} i_{q0}$
 $K_d = \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0})$
 $K_q = \alpha_q L_{mq} i_{q0}$ (5)

식(5)에서 L_1, L_2 의 값은 교차자화 포화를 고려하지 않는 경우 교차자화 계수 γ_{dq}, γ_{qd} 가 0이 되어 식(3)과 같다. 또한 d축과 q축 사이의 인덕턴스 행렬의 비대각 블록요소가 0이 아닌 값을 가짐을 알 수 있다.

2.2 발전기 간략모델

다기계통의 해석시에 발전기의 상세모델을 사용하는 경우 계통상태행렬의 크기가 매우 크게 되어 해석방법과 계산시간에서 문제가 된다. 따라서 다기계통의 해석시에는 행렬의 차수가 작은 축소모델(Reduced Order Model)이 사용되며, 그 중에서 간략모델이 일반적으로 사용된다. 간략모델로 나타낸 발전기의 블록선도는 그림 1과 같다.

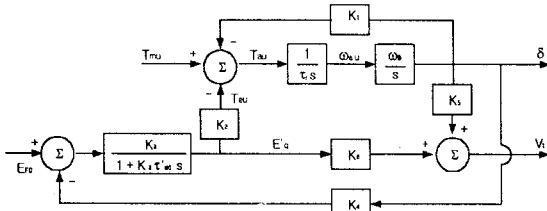


그림 1. 발전기 무한모선계통의 간략모델 블록선도

그림 1의 블록선도로부터 발전기 무한모선 계통의 상태 공간 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{ad} \\ \dot{\omega}_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 \tau_d} & 0 & -\frac{K_4}{\tau_d} \\ -K_2/\tau_j & 0 & -K_1/\tau_j \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ad} \\ \omega_d \\ \delta_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_j} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{FDd} \\ T_{md} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.1 동일축 포화특성

식(6)의 상태방정식에서 동일축 포화특성을 고려하는 경우 리액턴스와 시정수 값이 영향을 받게되며, 이때의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_d &= L_{mdso} + l_d - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0}) \\ &= L_1 + l_d \\ L_q &= L_{mqso} + l_q - \alpha_q L_{mq} i_{q0} \\ &= L_2 + l_q \\ L_d' &= \left\{ L_{dso} - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0}) - \frac{[L_{mdso} - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0})]^2}{L_{Fso} - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0})} \right\} \\ &= L_1 + l_d - L_d^2 / (L_1 + l_F) \\ \tau_{d0}' &= \frac{L_{mdso} + l_F - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0})}{r_F} \\ &= (L_1 + l_F) / r_F \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서 L_1, L_2 의 값은 포화효과를 고려하지 않는 경우 동일축 포화계수인 α_d, α_q 가 0이 되어 포화효과를 고려하지 않는 경우의 인덕턴스와 같은 값이 된다.

2.2.2 교차자화 포화특성

교차자화 포화를 고려하는 경우의 식(6)에서 리액턴스와 시정수의 관계식은 다음과 같이 된다.

식(8)에서 L_1, L_2, L_{12}, L_{21} 의 값은 교차자화 포화를 고려하지 않는 경우 교차자화 계수 γ_{dq}, γ_{qd} 가 0이 되어 식(7)과 같게 된다.

$$\begin{aligned} L_d &= L_{mdso} + l_d - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0}) - \gamma_{qd}(i_{q0} - C_{qd}) \\ &= L_1 + l_d \\ L_q &= L_{mqso} + l_q - \alpha_q L_{mq} i_{q0} - \gamma_{dq}(i_{F0} + i_{d0} - C_{qd}) \\ &= L_2 + l_q \\ L_d' &= \left\{ L_1 + l_d + \frac{L_1(L_{12}L_{21} - L_1L_2)}{(L_1 + l_F)L_2 - L_{12}L_{21}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{L_{12}[L_{21}(L_1 + l_F) - L_1L_{21}]}{L_{12}L_{21} - L_2(L_1 + l_F)} \right\} \\ \tau_{d0}' &= \frac{L_{mdso} + l_F - \alpha_d L_{md}(i_{F0} + i_{d0}) - \gamma_{qd}(i_{q0} - C_{qd})}{r_F} \\ &= (L_1 + l_F) / r_F \end{aligned} \quad (8)$$

3. 사례연구

발전기를 간략모델로 나타내고 일기 무한모선 계통에 대하여 다음의 3가지 경우에 대하여 발전기 정수와 고유치 해석을 하였다. 이때 발전기 정수와 포화계수는 참고 문헌(3)의 값을 사용하였다.

- I. 교차자화 포화효과를 고려한 경우
- II. 동일축 포화효과를 고려한 경우
- III. 포화효과를 고려하지 않은 경우

3.1 발전기 정수에 미치는 영향

발전기의 유효전력을 1.0 pu으로 하고 역률을 0.5 지상조건에서 0.8 진상조건까지 변화시켜 가면서 발전기 정수의 변화를 구하였다.

발전기 정수

식(7),(8)을 사용하여 리액턴스와 시정수를 계산하고 결과를 표 1-4에 나타내었다.

표 1. 발전기 정수 X_d

	0.5지상	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8진상
I	0.491	0.515	0.533	0.550	0.567	0.610	0.693	0.775
II	0.566	0.603	0.634	0.665	0.700	0.785	0.925	1.043
III	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280

표 2. 발전기 정수 X_q

	0.5지상	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8진상
I	0.388	0.393	0.397	0.398	0.400	0.402	0.417	0.442
II	0.738	0.726	0.713	0.700	0.684	0.645	0.590	0.558
III	0.807	0.807	0.807	0.807	0.807	0.807	0.807	0.807

표 3. 발전기 정수 X_d'

	0.5지상	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8진상
I	0.216	0.217	0.224	0.225	0.227	0.233	0.252	0.270
II	0.266	0.270	0.274	0.277	0.281	0.288	0.298	0.305
III	0.315	0.315	0.315	0.315	0.315	0.315	0.315	0.315

표 4. 발전기 정수 τ_{d0}'

	0.5지상	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8진상
I	116.63	120.64	123.81	126.65	129.72	137.13	151.29	165.58
II	129.55	135.8	141.25	146.54	152.58	167.27	191.45	211.76
III	252.59	252.59	252.59	252.59	252.59	252.59	252.59	252.59

표 1-4에서 동일축 포화와 교차자화 포화를 고려한 경우에 자속수의 감소에 의해 리액턴스와 시정수의 크기가 감소한 것을 알 수 있다. 교차자화 포화효과를 고려한 경

우의 리액턴스와 시정수 값이 가장 작은 것을 알 수 있으며, X_d , X_q , τ_{do} 의 값이 상대적으로 크게 감소한 것을 알 수 있다.

간략모델 정수

발전기 포화효과에 의한 간략모델 정수 K_1 , K_2 , K_3 , K_4 의 변화를 그림 2-5에 나타내었다.

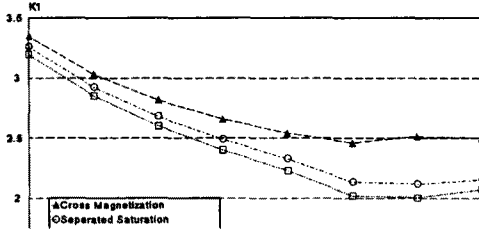


그림 2. 발전기 정수 K_1

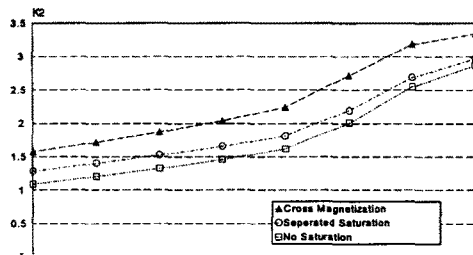


그림 3. 발전기 정수 K_2

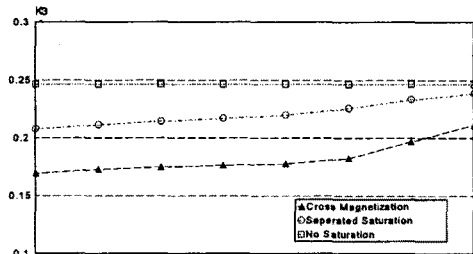


그림 4. 발전기 정수 K_3

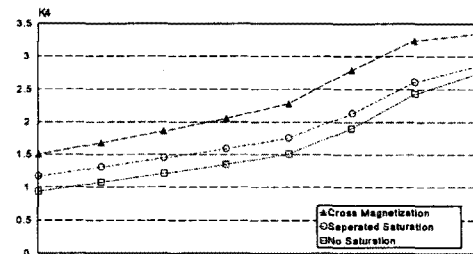


그림 5. 발전기 정수 K_4

그림 2-5에서 교차자화 포화효과에 의한 발전기 간략모델 정수에 미치는 영향이 작지 않음을 알 수 있다.

3.2 간략모델의 고유치 해석결과에 미치는 영향

발전기의 유효전력이 1.0 pu, 역률이 0.5 지상조건에

서 0.8 지상조건까지 변화한 경우의 고유치 해석결과와 SPR(Successive Peak Ratio)값을 그림 6과 표 5에 나타내었다. 이때 SPR은 고유치를 $\alpha \pm j\beta$ 라 할 때 $\exp(2\pi\alpha/|\beta|)$ 의 값을 나타내는 지수로 보통 0.8 이상인 경우 중요(dominant)한 진동모드로 간주한다.

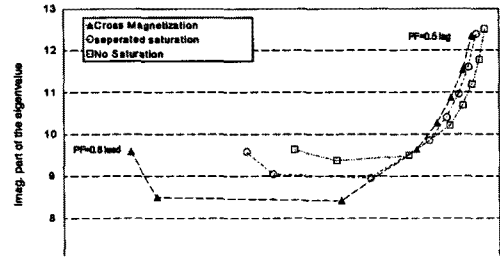


그림 6. 역률 변화시 고유치 해석결과

표 5. 역률 변화시 고유치 SPR

	0.5지상	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8지상
I	0.825	0.759	0.684	0.593	0.476	0.197	0.031	0.036
II	0.851	0.793	0.726	0.646	0.541	0.288	0.115	0.102
III	0.906	0.862	0.809	0.744	0.657	0.436	0.222	0.159

그림 6과 표 5에서 교차자화 포화효과를 고려한 경우의 고유치가 보다 안정한 값으로 해석되었으며 그 차이가 작지 않음을 알 수 있다. SPR값의 경우 포화를 고려하지 않은 경우와 비교하여 0.5 지상조건에서 10%의 오차가 발생하며, 0.8과 0.9 지상조건에서 30% 정도의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

다기계통의 해석에 사용되는 발전기 간략모델에 대하여 동일축 포화효과를 고려한 경우와 교차자화 포화효과를 고려한 경우의 발전기 정수인 리액턴스와 시정수의 일반식을 제시하였으며, 사례연구를 통하여 이들 발전기 정수 값의 변화가 작지 않음을 알 수 있었다.

또한 고유치 해석결과 간략모델을 사용하는 경우에도 포화효과에 의해 해석결과의 차이가 작지 않으며, 따라서 발전기의 간략모델을 사용한 다기계통의 해석시에도 보다 정확한 해석을 위해서는 교차자화 포화효과를 고려한 발전기 모델을 사용하는 것이 바람직함을 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.