

## 포화현상을 고려한 동기발전기의 모델링에 관한 연구

권세혁\* 김덕영\*\* 장병훈\* 강태현<sup>①</sup>

\*고려대학교 전기공학과

\*\*안양전문대학 제어계측과

## A Study on Synchronous Machine Modeling with the Effect of Saturation

S.H. Kwon\* D.Y. Kim\*\* B.H. Jang\* T.H. Kang\*

\*Korea University

\*\*Anyang Technical College

### Abstract

This paper represents an accurate evaluation method in the eigenvalue analysis of the synchronous machine which has the characteristics of separated saturation and cross-magnetized one. The cross-magnetizing effect is included in the reactance and state matrix of the machine. And the machine with excitation system is simulated in the cases of those two saturations. The simulation results show the existence of the differences between the separated saturation and the cross-magnetized one in the analysis of power system.

### 1. 서론

전력계통의 안정도 해석시 발전기가 차지하는 비중은 매우 크며 이에따라 발전기를 실제의 특성을 잘 나타낼 수 있도록 어떻게 모델링을 하는가 하는 문제가 안정도 분야의 중요 과제 중 하나이다. 발전기는 상세모델(상태변수 7개)로부터 고전 모델(상태변수 2개)에 이르기까지 계통해석정도에 따라 달리 표현하여 왔으며, 이 중 상세모델은 발전기의 특성을 실제와 가장 유사하게 나타낸 것이라 할 수 있다.

발전기의 계자자속은 계자전류가 증가함에 따라 포화특성을 갖게되며 이에따라 고정자권선에 유기되는 전압도 포화특성을 나타내게 된다. 발전기를 상세 모델로 나타낸다 하여도 계자자속과 계자전류의 관계를 포화 특성이 아닌 단순한 비례관계로 다루게 되면 해석결과에서의 정확도는 그만큼 떨어지게 되며, 따라서 발전기에 대한 상세한 해석 결과를 얻기 위해서는 발전기 모델링에 포화특성을 어느정도까지 표현할 것인가 하는 문제가 제기된다. 일반적으로 발전기의 포화특성을 고려하는 경우 동일축(d축, q축) 성분의 전류에 의해서만 자속성분이 포화특성을 갖는 것으로 간주하고 d축성분과 q축성분 사이의 교차자화(Cross-Magnetization)는 무시하였다. 그러나 최근의 관련문헌에 의하면 동일축상의 포화특성만을 고려하는 경우 발전기의 실제 필드 테스트 결과와는 무시할수 없는 정도의 오차가 발생하였으며, 교차자화 효과를 고려하는 경우 그 오차는 훨씬 작아지는 것을 보였다. 본 논문에서는 정확한 계통해석결과를 필요로 하는 경우에 발전기를 상세모델로 나타내고 발전기의 포화특성을 고려하는 경우에 있어서, 동일축 성분에 의한 포화특성(seperated saturation)만을 고려하는 경우와 교차자화에 의한 포화특성까지 고려하는 경우의 리액턴스 행렬과 상태행렬의 변화를 살펴보자 한다. 또한 사례연구에서 발전기만을 고려한 경우와 발전기와 여자계통을 고려한 경우의 포화효과가 고유치 해석결과에 미치는 영향을 보이고자 한다. 동일축상의 포화와 교차자화에 의한 포화특성

을 나타내는 포화계수는 참고문헌[4]에 있는 수식을 사용하였다.

### 2. 정식화

#### 2.1 동일축 성분에 의한 포화특성

본 절은 동일축 성분의 전류에 의한 자속체교수의 포화특성에 대해 살펴보고자 한다. 일반적으로 안정도 해석시의 포화특성은 누설인력턴스와 누설자속의 영향을 무시하고 부하시의 공극자속과 기자력(mmf)사이의 포화관계는 무부하시와 동일한 것으로 취급한다. 발전기의 계자자속의 포화특성은 그림1과 같다. 본 연구에서는 기준좌표계를 d축이 q축보다 위상이 90° 앞선 것으로 하였다.

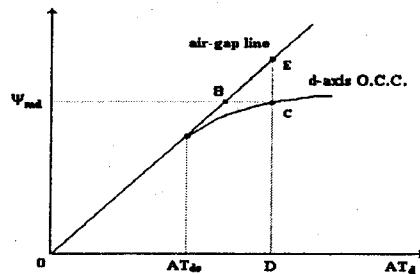


그림1 동기 발전기의 d축 포화곡선

위의 그림에서 목표전압(자속수)을 얻기 위해서는 포화특성에 의한 C-B에 해당하는 전류를 계자권선에 더 공급해야 한다. 본 연구에서는 포화특성을 나타내는 포화계수를 포화특성이 나타나기 시작하는 동작점에서부터 일정 기울기를 갖는 직선형태로 나타내었다. 이때의 포화계수와 상호리액턴스의 관계는 다음과 같다.

$$X_{md} = S_d X_{md} \quad (2.1)$$

$$X_{mq} = S_q X_{mq}$$

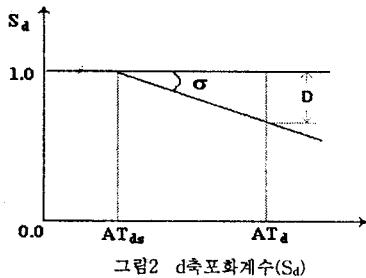
여기서  $S_d$ 와  $S_q$ 는 각각 d축, q축 포화계수로서 다음과 같이 표현된다.

$$S_d = \begin{cases} 1.0 & |AT_d| \leq AT_{d\alpha} \\ 1.0 - \alpha_d(AT_d - AT_{d\alpha}) & |AT_d| > AT_{d\alpha} \end{cases} \quad (2.2)$$

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

여기서,  $AT_d (\neq i_F + i_d + i_p)$  : d축의 기자력성분(mmf)  
 $AT_q (\neq i_q + i_o)$  : q축의 기자력성분  
 $AT_{ds}$ ,  $AT_{qs}$  : 비선형특성이 나타나는 기자력값  
 $i_p$ ,  $i_o$  : d, q축 제동권선 전류

$\alpha_d$ ,  $\alpha_q$ 는 d축과 q축에서의 O.C.C.의 기울기를 나타내는 상수로서 그림2에서  $\alpha_d = \tan \sigma = D/(AT_d - AT_{ds})$ 와 같이 표현된다.



리액턴스 행렬 표현식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{F_s} \\ \Psi_{Ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ds} & X_{mds} & X_{mds} & 0 & 0 \\ X_{mds} & X_{Fs} & X_{mds} & 0 & 0 \\ X_{mds} & X_{mds} & X_{Ds} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{qs} & X_{mqs} \\ 0 & 0 & 0 & X_{mqs} & X_{Qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

위의 식(2.3)에 식(2.1)을 대입 정리하여 선형화하면 (2.4)식과 같은 리액턴스 행렬을 얻게 된다.

## 2.2 교차자화에 의한 포화특성

본 절에서는 정확한 안정도 해석 결과를 얻기 위해 발전기의 포화특성을 동일축 성분에 의한 포화뿐만 아니라 d축, q축 사이의 교차자화(Cross-Magnetizing)현상까지를 고려하는 경우의 발전기 표현식을 살펴보고자 한다. 발전기의 d축과 q축 사이의 상호관계를 나타내는 교차자화자속은 전압강하의 작용을 하게 되며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Psi_{dq} &= \begin{cases} 0.0 & |AT_q| \leq C_{eq} \\ r_{qd} AT_d (AT_q - C_{eq}) & |AT_q| > C_{eq} \end{cases} & (2.5) \\ \Psi_{qd} &= \begin{cases} 0.0 & |AT_d| \leq C_{od} \\ r_{qd} AT_q (AT_d - C_{od}) & |AT_d| > C_{od} \end{cases} \end{aligned}$$

여기서,

$\Psi_{dq}$ ,  $\Psi_{qd}$  : d, q축의 Cross-Magnetizing 자속제교수  
 $r_{qd}$ ,  $r_{dq}$ ,  $C_{eq}$ ,  $C_{od}$  : Cross-Magnetizing 상수

$$\begin{bmatrix} \Delta \Psi_{ds} \\ \Delta \Psi_{F_s} \\ \Delta \Psi_{Ds} \\ \Delta \Psi_{qs} \\ \Delta \Psi_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & X_{mds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & X_{mds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & 0 & 0 \\ X_{mds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & X_{Fs} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & X_{mds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & 0 & 0 \\ X_{mds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & X_{mds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & X_{Ds} - \alpha_d X_{md} (i_{F_0} + i_{d0}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{qs} - \alpha_q X_{mqs} i_{q0} & X_{mqs} - \alpha_q X_{mqs} i_{q0} \\ 0 & 0 & 0 & X_{mqs} - \alpha_q X_{mqs} i_{q0} & X_{qs} - \alpha_q X_{mqs} i_{q0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \Psi_{dq} \\ \Delta \Psi_{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qd} (i_{q0} - C_{eq}) & r_{qd} (i_{q0} - C_{eq}) & r_{qd} (i_{q0} - C_{eq}) & r_{qd} (i_{d0} + i_{F_0}) & r_{qd} (i_{d0} + i_{F_0}) \\ r_{dq} i_{q0} & r_{dq} i_{q0} & r_{dq} i_{q0} & r_{dq} (i_{d0} + i_{F_0} - C_{od}) & r_{dq} (i_{d0} + i_{F_0} - C_{od}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$(AT_d - C_{od})$  : d-축 포화정도  
 $(AT_q - C_{eq})$  : q-축 포화정도

$AT_d$ 와  $AT_q$ 는 2.1절에서의 정의와 같다. 위의 두식으로부터 교차자화현상으로 인한 동기발전기의 한 축의 자속변화는 그 축에서의 기자력 성분과 다른 축의 포화정도에 비례함을 알 수 있다. 식(2.5)를 전류로 치환하고 상태행렬의 표현식으로 나타내기 위해 동작점에 대하여 선형화하면 식(2.6)이 된다.

교차자화현상으로 인한 d축, q축의 자속제교수의 감소를 나타내기 위해 식(2.3)을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{F_s} \\ \Psi_{Ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ds} & X_{mds} & X_{mds} & 0 & 0 \\ X_{mds} & X_{Fs} & X_{mds} & 0 & 0 \\ X_{mds} & X_{mds} & X_{Ds} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{qs} & X_{mqs} \\ 0 & 0 & 0 & X_{mqs} & X_{Qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{F_s} \\ \Psi_{Qs} \\ \Psi_{ad} \\ \Psi_{qd} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

위의 선형화된 교차자화 관련항 (2.6)을 식(2.4)의 동일축상의 포화특성만을 고려한 전류, 자속제교수 관련식에 d축 성분과 q축 성분에 각각 추가하여 정리한다.

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_{ds} &= [X_{ds0} - \alpha_d X_{md0} (i_{F_0} + i_{d0}) + r_{qd} (i_{q0} - C_{eq})] \Delta i_d \\ &\quad + [X_{mds0} - \alpha_d X_{md0} (i_{F_0} + i_{d0}) + r_{qd} (i_{q0} - C_{eq})] \Delta i_F \\ &\quad + [X_{mds0} - \alpha_d X_{md0} (i_{F_0} + i_{d0}) + r_{qd} (i_{q0} - C_{eq})] \Delta i_D \\ &\quad + [r_{qd} (i_{F_0} + i_{d0})] \Delta i_q \\ &\quad + [r_{qd} (i_{F_0} + i_{d0})] \Delta i_Q \end{aligned} \quad (2.8)$$

나머지 상태변수도 같은 방법으로 선형화된다. 간략한 리액턴스 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \Psi_{ds} \\ \Delta \Psi_{F_s} \\ \Delta \Psi_{Ds} \\ \Delta \Psi_{qs} \\ \Delta \Psi_{Qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{AD} + X_{Ia} & X_{AD} & X_{AD} & X_{DQ} & X_{DQ} \\ X_{AD} & X_{AD} + X_{IF} & X_{AD} & X_{DQ} & X_{DQ} \\ X_{AD} & X_{AD} & X_{AD} + X_{ID} & X_{IQ} & X_{DQ} \\ X_{QQ} & X_{QQ} & X_{QQ} & X_{AQ} + X_{Ia} & X_{AQ} \\ X_{QQ} & X_{QQ} & X_{QQ} & X_{AQ} & X_{AQ} + X_{IQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } X_{AD} &= X_{mds0} - K_d + r_{qd} (i_{q0} - C_{eq}) \\ X_{AQ} &= X_{mqs0} - K_q + r_{qd} (i_{F_0} + i_{d0} - C_{od}) \\ X_{DQ} &= r_{qd} (i_{F_0} + i_{d0}) \\ X_{QD} &= r_{qd} i_{q0} \\ K_d &= \alpha_d X_{md0} (i_{F_0} + i_{d0}) \\ K_q &= \alpha_q X_{mqs0} i_{q0} \end{aligned}$$

식(2.9)에서 교차자화에 의한 포화특성을 고려한 경우 리액턴스행렬의 비대각블록 요소가 0이 아닌 값을 가짐을 알 수 있다. 식(2.9)의 리액턴스행렬을  $M$ 이라 하면 일반적인 상태 방정식으로부터 행렬 연산에 의해 상태행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} M\dot{X} &= -KX + U \\ \dot{X} &= -M^{-1}KX + M^{-1}U \\ &= AX + BU \end{aligned} \quad (2.10)$$

### 3. 사례연구

참고문헌 [1]의 1기무한모선 계통에 대하여 동일축 성분에 의한 포화현상과 교차자화에 의한 포화현상을 고려한 경우에 대해 고유치 해석을 하였다. 발전기는 상세 모델로 하였으며 IEEE type1 여자기와 PSS를 투입하였을 때의 계통의 전기기계적 진동모드의 고유치 변화를 여러가지 계통 조건에 대하여 살펴보았다. 각 경우는 다음과 같다.

CASE 1. 발전기 동일축 포화현상과 교차자화현상을 모두 무시한 경우 ( $\alpha_d, \alpha_q = 0.0, r_{dq}, r_{qd} = 0.0$ )

CASE 2. 발전기의 동일축상의 포화현상만 고려한 경우 ( $r_{dq}, r_{qd} = 0.0$ )

CASE 3. 동일축상의 포화현상과 교차자화현상을 모두 고려한 경우

표1, 2는 유효전력이 0.8 pu이고 역율이 0.9 지상인 경우의 전기기계적 진동모드의 고유치의 변화를 보여주고 있다. 이로부터 교차자화현상을 고려한 경우 고유치의 실수부의 값이 증가하여 제동이 가장 나빠지는 것을 알 수 있다. 이때 주파수의 변화는 CASE 2가 CASE 3보다 더 증가한 것을 알 수 있다. 표1에서 고유치의 실수성분은 CASE 1과 CASE 2가 4.47%, CASE 1과 CASE 3이 5.27%의 오차를 갖는 것을 알 수 있다. 즉 교차자화에 의한 포화특성을 고려한 경우 발전기만 고려한 경우보다 발전기와 여자계통을 고려한 경우의 오차 값이 약간 더 증가한 것을 알 수 있다.

표1. 발전기만 고려한 경우 (P=0.8 pu, PF=0.9 지상)

	고 유 치		S.P.R.
	실 수 부	허 수 부	
CASE 1	-0.1197e-02	0.2527e-01	0.7426
CASE 2	-0.1140e-02	0.2537e-01	0.7439
CASE 3	-0.1137e-02	0.2534e-01	0.7544

표2. 발전기와 여자계통을 포함한 경우(P=0.8, PF=0.9 지상)

	고 유 치		S.P.R.
	실 수 부	허 수 부	
CASE 1	-0.1202e-02	0.2531e-01	0.7419
CASE 2	-0.1152e-02	0.2541e-01	0.7476
CASE 3	-0.1141e-02	0.2539e-01	0.7540

그림3, 4는 발전기만 고려한 경우와 발전기와 여자계통을 모두 고려한 경우의 동작점의 변화에 따른 고유치의 케이스를 나타낸다. 두 경우 모두 포화특성을 무시하는 경우가 가장 안정하고, 교차자화에 의한 포화특성을 고려한 경우가 가장 제동이 나쁜것을 알 수 있다.

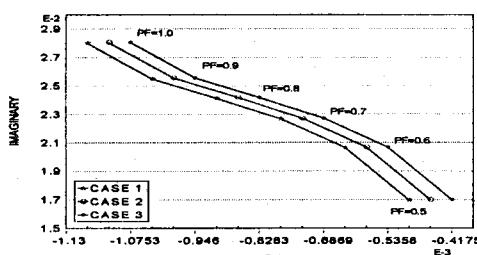


그림3. 전기기계적 진동모드의 케이스 (발전기만 고려, P=1.0)

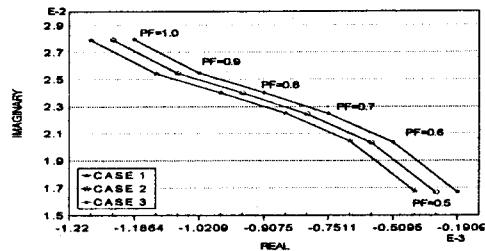


그림4. 전기기계적 진동모드의 케이스(발전기·여자계통 고려, P=1.0)

그림5는 역률을 일정하게 놓고 계통의 유효전력값을 변화시킨 경우이다. 그림에서 유효전력값이 0.8 pu를 기준으로 중부하 조건인 경우는 여자계통을 모두 고려한 경우의 고유치 오차가 발전기만을 고려한 경우보다 오차가 더 작고, 경부하시에는 반대의 특성이 나타나는 것을 알 수 있다.

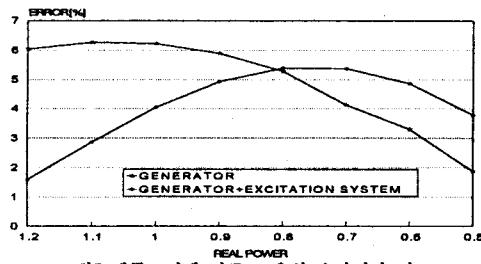


그림5. 계통조건에 따른 고유치 오차변화 비교

### 4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 발전기의 포화특성을 종래의 동일축상의 포화 뿐만 아니라 교차자화에 의한 포화특성까지도 고려할 수 있도록 각 경우의 자속쇄교수와 전류의 관계를 나타내는 리액턴스행렬의 표현식을 보였다. 이때 기준좌표계는 d축이 q축 보다 위상이 90° 앞서는 것으로 하였다.
- (2) 발전기의 포화특성을 고려한 경우가 포화를 무시한 경우보다, 교차자화에 의한 포화특성까지 고려한 경우가 동일축 성분에 의한 포화만을 고려한 경우보다 진동모드의 제동이 불량해지는 일반적인 특성이 있음을 보였다.
- (3) 발전기의 정확한 해석을 위해서는 동일축상의 포화 뿐만 아니라 교차자화에 의한 포화특성까지도 고려해야 한다.
- (4) 발전기의 정확한 해석을 위해서는 동일축상의 포화 뿐만 아니라 교차자화에 의한 포화특성까지 고려해야 한다.

### 5. 참고문헌

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994.
- [3] 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, December 1988.
- [4] A.M.El-Serafi, A.S.Abdallah, "Effect of Saturation on The Steady-State Stability of A Synchronous Machine Connected to An Intinite Bus System", IEEE Transactions in Energy Conversion, Vol. 6, No.3, September 1991.