

운영 데이터를 이용한 동기발전기 포화 모델링에 관한 연구

°김경열*, 유일도*, 서장철**, 문승일*
 * 전북대학교 전기공학과, ** 서울대학교 전기공학과

A Study on Saturation Modeling of Synchronous Generator using Operating Data

Kyung-Yul Kim, Il-Do Yoo*, Jang-Cheol Seo**, Seung-Il Moon*
 * Chonbuk National University ** Seoul National University

Abstract

This paper presents a new saturation modeling technique of synchronous generators using the operating data. With the stator voltages, currents and the field current directly measured on the field winding at different steady state operating conditions, it can estimate the saturated stator mutual inductances, stator resistance and the field-stator equivalent turns ratio. Effects of the measurement noises on the estimated parameters are also investigated.

1. 서론

동기 발전기의 과도 및 정상상태의 동작 예측과 성공적인 제어를 위해서 발전기의 동적특성을 정확히 표현할 수 있는 모델과 파라미터를 구하는 것이 필수적인 선결과제라 할 수 있다. 동기발전기는 비선형적인 요소를 포함하고 있음에도 불구하고, 종종 단순화된 선형모델을 사용하여 그 동작을 예측하고 있는데 이는 부정확한 예측결과를 초래할 수밖에 없었다.

동기발전기가 비선형특성을 가지는 중요한 이유는 자기포화현상에 기인한다. 따라서 정확한 동기발전기의 동작 예측에는 자기 포화현상이 고려된 모델이 요구된다. 이러한 포화현상을 고려한 모델은 오랜동안 많은 연구의 대상이 되어 왔으며, 포화현상을 표현하는 함수의 선택에 따라 여러 형태의 모델이 사용되었다[1,3,5,7]. 초기에는 d축, q축을 동일한 포화함수로 표현하였으나, q축의 포화현상이 d축과 다르다는 사실이 밝혀짐으로써 각기 다른 포화함수로 나타내는 방법이 제안 되었다 [5,7].

본 논문은 정상상태 운영데이터로부터 포화된 동기발전기의 파라미터를 추정하는 새로운 방법을 제안한다. 이 방법은 별도의 시험을 수행 할 필요없이 과거의 측정된 운영 데이터를 이용하여 파라미터를 찾을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 컴퓨터를 이용 시뮬레이션된 운영데이터를 사용하여 본 방법의 타당성을 고찰하고 측정잡음에 의한 파라미터 추정의 영향을 분석하였다.

2. 동기발전기의 등가회로 및 정상상태방정식

일반적으로 동기발전기의 동적특성을 나타내는 d축과 q축의 등가회로는 아래의 그림 1 및 2와 같다.

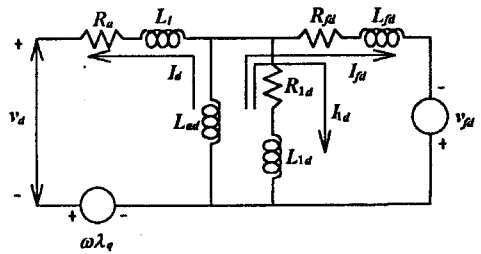


그림 1. d축 등가회로

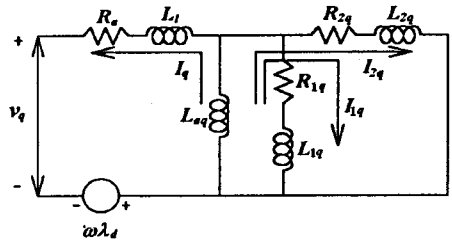


그림 2. q축 등가회로

정상상태에서는 등가회로의 모든 damper winding 전류와 미분항이 0이 되므로 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_d = -R_s I_d + (L_{\sigma q} + L_l) I_q \tag{1}$$

$$V_q = -R_s I_q - (L_{\sigma d} + L_l) I_d + L_{ad} I_{fd} \tag{2}$$

윗식에서 모든 변수량들은 고정자축으로 환산된값으로서 I_d, I_q, V_d, V_q 는 직접 측정 가능하나 계자전류 I_{fd} 는 직접 측정할 수 없고, 계자권선에서 직접 측정할 수 있는 전류 I'_{fd} 와 고정자로 환산된 전류 I_{fd} 사이에는 다음

과 같은 관계식이 성립된다.

$$I_{fd} = \frac{2}{3} a I_{fd}^* \quad (3)$$

여기서 a 는 고정자와 회전자 사이에 유효권선비를 나타낸다[6]. 이 방정식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_d & 0 & I_q & 0 \\ -I_q & -I_d & 0 & \frac{2}{3} I_{fd}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a \\ L_d \\ L_q \\ aL_{ad} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 포화모델

본 논문에서는 Kundur의해 제안된 포화모델을 사용하였다[4]. 이 모델에서는 누설자속은 포화에 영향을 미치지 않고, 공극자속 포화로 인해 고정자 상호인덕턴스 L_{ad} 및 L_{aq} 만이 영향을 받는 것으로 가정하였다. 이와 같은 가정하에서 포화영향은 다음과 같이 표시된다.

$$L_{ad} = K_{sd} L_{adu} \quad (5)$$

$$L_{aq} = K_{sq} L_{aqu} \quad (6)$$

윗식에서 L_{adu} , L_{aqu} 는 포화되지 않을 때의 L_{ad} 및 L_{aq} 의 값이고, K_{sd} , K_{sq} 는 각각 d, q축의 포화정도를 나타내는 포화 계수이다. 여기에서 제시된 포화모델은 아래의 그림과 같은 개방회로 포화곡선으로부터 결정된다.

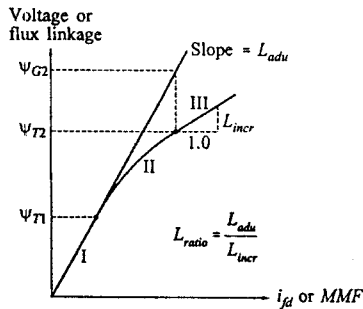


그림 3. 개방회로 포화곡선

그림 3의 개방회로 포화곡선에서 포화계수는 공극선과 포화 곡선의 차인 Ψ_I 의 값에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$K_{sd} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at0}} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at} + \Psi_I} \quad (7)$$

포화정도에 따라 Ψ_I 는 세영역으로 나누어지며, 각 영역에서 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Psi_I &= 0 && \text{(영역 I)} \\ &= A_{sat} e^{B_{sat}(\Psi_{at} - \Psi_{T2})} && \text{(영역 II)} \\ &= \Psi_{G2} + L_{ratio}(\Psi_{at} - \Psi_{T2}) - \Psi_{at} && \text{(영역 III)} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A_{sat} , B_{sat} 는 포화정도에 따라 결정되는 상수이다. 포화영역은 공극 자속 Ψ_{at} 에 의하여 결정되는데 이는 단위법에서는 공극전압 E_a 와 같고 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$E_a = E_t + (R_a + jX_s)I_t \quad (9)$$

여기서 E_t 는 단자전압, R_a 는 전기자 저항, X_s 는 전기자 누설리액턴스, I_t 는 전기자 전류를 나타낸다.

4. LSM Estimation algorithm.

본 논문에서는 식(4)의 파라미터 R_a , L_d , L_q , aL_{ad} 를 추정하기 위하여 Least Square Method (LSM)을 사용하였다. 만약 시스템이 아래와 같은 식으로 표현되면

$$y_m(k) = A(k) \cdot \theta + \varepsilon(k) \quad (10)$$

여러 샘플의 합으로서 정의되는 목적함수는 식(11)과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{LSM}(\theta) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{ [y_m(k) - A(k) \cdot \theta]^T \cdot [y_m(k) - A(k) \cdot \theta] \} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{ \varepsilon^T(k) \cdot \varepsilon(k) \} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 ε 는 측정잡음을 나타낸다.

LSM을 이용하여 추정될 파라미터 벡터 $\hat{\theta}_{LSM}$ 는 목적함수를 최소화하는 조건으로부터 다음과같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{LSM} &= \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A^T(k) \cdot A(k) \right]^{-1} \cdot \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A^T(k) \cdot y_m(k) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식을 동기발전기의 정상상태방정식 식(4)와 비교하면

$$A = \begin{bmatrix} -I_d & 0 & I_q & 0 \\ -I_q & -I_d & 0 & \frac{2}{3} I_{fd} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} R_a \\ L_d \\ L_q \\ aL_{ad} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$y_m = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

로 놓을 수 있다. 여기에서 A 는 측정된 벡터, θ 는 추정된 파라미터 벡터, y 는 시스템 출력을 나타낸다.

5. 연구결과

시뮬레이션 프로그램에서 동기발전기는 변압기를 통해 계통에 연결되어 있고, 정상상태조건에 있다고 가정하였다. 이때 L_{ad} , L_{aq} 의 포화된 값을 계산하기 위해 d 축 및 q축의 포화함수를 아래와 같이 선택하였다.

$$\begin{aligned} \Psi_{Id} &= 0.0003 e^{21.0250(\Psi_a - 0.9)} \\ \Psi_{Iq} &= 0.003 e^{18.8069(\Psi_a - 0.8)} \end{aligned} \quad (16)$$

파라미터 추정을 위해 필요한 변수 I_d , I_q , V_d , V_q , I_{fd} 는 포화를 고려한 다양한 운영 조건하에서 400개를 얻었으며, 각case에는 포화정도가 비슷한 20-30개의 데이터를 포함 시켰다. 또한 시뮬레이션 데이터에 정도가 다른 측정잡음을 더하여 잡음이 파라미터 추정에 미치는 영향을 분석하였다. 여기서 사용한 측정잡음은 표준편차가 각각 1%, 3%, 5%인 정규분포의 잡음을 사용하였다. 시뮬레이션에서 사용한 실제의 데이터는 다음의 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션에 사용한 발전기 파라미터

파라미터	R_a	L_l	L_{adu}	L_{aqu}	a
값	0.01	0.2	1.66	1.44	10

그림 4 ~ 그림 7은 측정잡음이 각각 0%, 1%, 3%, 5% 일 때 air-gap 전압 E_a 를 매개변수로 실제값과 추정된 L_d , L_q 값을 나타낸다. 여기서 실선은 실제 파라미터값이고, '*'는 추정된 값이다. 이 그림들에서 L_d , L_q 의 추정된값의 최대에러는 측정잡음이 0%, 1%일 때 각각 1%, 1.7%이며 측정잡음이 3%, 5%인 경우 각각 7.2%, 8.9%이다. 표 2과 표 3는 파라미터 추정값을 나타냈다. 아울러 표 4는 R_a 와 aL_{ad} 의 추정된 값을 보이는데, R_a 의 추정에러는 측정잡음이 0%, 1%일 때 1.5% 및 2%이내이며 측정잡음이 3%, 5%인 경우는 각각 3% 및 11.9%이내이다. 또한 aL_{ad} 의 경우의 추정에러는 측정잡음이 0%, 1%일 때 각각 2.6%, 3%이내이며, 측정잡음이 3%, 5%인 경우 에러는 각각 6.1%, 13.5%이내임을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 만일 정상상태 변수를 3%이내의 오차로 측정할 수 있다면 파라미터 추정에러가 약 7%이내에 들어오게 됨을 알 수 있는데, 현재의 측정 기술로 미루어 볼 때 제안된 방법으로 상당히 정확한 파라미터를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 다양한 정상상태 운영조건하에서 포화현상

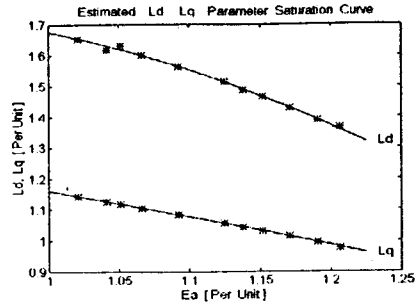


그림 4. 잡음이 없는 경우 추정된 L_d , 및 L_q 포화곡선

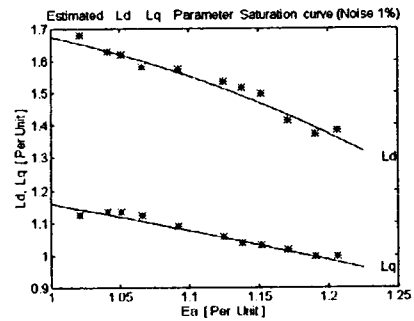


그림 5. 1% 측정잡음시 추정된 L_d , 및 L_q 포화곡선

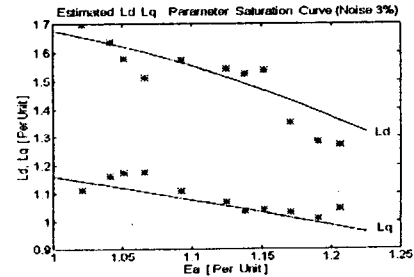


그림 6. 3% 측정잡음시 추정된 L_d , 및 L_q 포화곡선

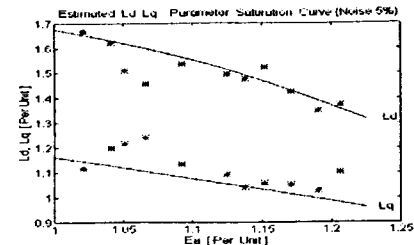


그림 7. 5% 측정잡음시 추정된 L_d , 및 L_q 포화곡선

표 2. 각기 다른조건에서의 실제 L_d 값과 추정된 값

case No.	air-gap 전압 E_a [pu]	실제 L_d [pu]	추정된 L_d [pu]			
			noise 0%	noise 1%	noise 3%	noise 5%
case 1	1.0211	1.6539	1.6535	1.6814	1.6980	1.6690
case 2	1.0409	1.6322	1.6307	1.6299	1.6370	1.6234
case 3	1.0507	1.6198	1.6198	1.6198	1.5777	1.5128
case 4	1.0661	1.6011	1.6012	1.5816	1.5122	1.4593
case 5	1.0924	1.5632	1.5632	1.5750	1.5737	1.5376
case 6	1.1249	1.5136	1.5137	1.5354	1.5414	1.4952
case 7	1.1381	1.4891	1.4891	1.5156	1.5261	1.4755
case 8	1.152	1.4680	1.4681	1.4975	1.5385	1.5227
case 9	1.171	1.4296	1.4296	1.4133	1.3512	1.4261
case10	1.1911	1.3883	1.3884	1.3705	1.2844	1.3516
case11	1.2063	1.3563	1.3663	1.3832	1.2728	1.3758

표 3. 각기 다른조건에서의 실제 L_q 값과 추정된 값

case No.	air-gap 전압 E_a [pu]	실제 L_q [pu]	추정된 L_q [pu]			
			noise 0%	noise 1%	noise 3%	noise 5%
case 1	1.0211	1.1432	1.1431	1.1267	1.1116	1.1172
case 2	1.0409	1.1269	1.1270	1.1346	1.1607	1.1989
case 3	1.0507	1.1191	1.1191	1.1349	1.1727	1.2166
case 4	1.0661	1.1048	1.1049	1.1235	1.1754	1.2424
case 5	1.0924	1.0833	1.0833	1.0898	1.1090	1.1362
case 6	1.1249	1.0344	1.0544	1.0566	1.0688	1.0918
case 7	1.1381	1.0448	1.0423	1.0382	1.0353	1.0406
case 8	1.152	1.0303	1.0301	1.0321	1.0410	1.0581
case 9	1.171	1.0119	1.0124	1.0175	1.0319	1.0508
case10	1.1911	0.9940	0.9940	0.9973	1.0096	1.0260
case11	1.2063	0.9735	0.9755	0.9957	1.0467	1.1016

표 4. 다른 조건에서의 추정된 R_a , aL_{ad} 값

case No.	noise 0%		noise 1%		noise 3%		noise 5%	
	R_a	$aL_{ad} R_a$	R_a	$aL_{ad} R_a$	R_a	$aL_{ad} R_a$	R_a	$aL_{ad} R_a$
case1	0.01	14.53	0.008	14.63	0.023	14.78	0.011	14.90
case2	0.01	14.31	0.020	14.36	0.010	14.31	0.092	14.41
case3	0.01	14.19	0.024	14.34	0.010	14.19	0.099	14.79
case4	0.009	14.00	0.024	14.01	0.009	14.00	0.119	13.78
case5	0.011	13.63	0.015	13.74	0.029	13.85	0.049	13.82
case6	0.010	13.13	0.011	13.27	0.017	13.39	0.029	13.26
case7	0.009	12.89	0.008	13.06	0.009	13.18	0.013	13.01
case8	0.010	12.67	0.011	13.00	0.016	13.49	0.025	13.65
case9	0.010	12.29	0.012	12.25	0.017	11.95	0.025	11.43
case10	0.010	11.89	0.011	11.83	0.016	11.39	0.022	10.65
case11	0.009	11.86	0.015	11.81	0.032	11.20	0.050	10.27

을 고려한 동기발전기의 파라미터를 추정 새로운 방법을 제시 하였다. 이 방법은 별도의 시험이 필요없이 과거의 측정된 운용데이터를 이용하여 포화된 파라미터를 찾을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 아울러 고정자저항 R_a 및 계자와 고정자 유효권선비 a 도 추정할 수가 있다. 본 연구에서는 측정에러가 파라미터 추정에 미치는 영향을 분석하였는데 3%의 표준편차를 가진 측정 값이 존재하더라도 모든 파라미터를 약 7%의 에러 이내로 추정할 수 있었다.

참고문헌

[1] Seung-Il Moon, "Synchronous machine time domain parameter estimation including the saturation effects," Master's Thesis, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, 1989.

[2] T. Sugiyama, T. Nishiwaki, S. Takeda and S. Abe, "Measurement of synchronous machine parameters under operating condition," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4 April 1982, pp. 895-904.

[3] M. Namba, J. Hosoda, S. Doi and M. Udo, "Development for measurement of operating parameters of synchronous generator and control systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2 April 1981, pp. 618-628.

[4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.

[5] G. Shackshaft and P. B. Henser, " Model of generator saturation for use in power system studies," Proc. IEE, 1979, Vol. 119, pp.175-188.

[6] Paul C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, New York, 1986

[7] S. H. Minnich, R. P. Schulz, D. H. Baker, R. G. Farmer, D.K. Sharma, and J.H. Fish, "Saturation functions for synchronous generators from finite elements," IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. EC-2, No. 4 pp.680-692, December 1987.