

On-line 시스템 모델과 파라미터 최적화 기법을 이용한 AVR의 최적 파라미터 튜닝

° 김종문, 문승일
서울대학교 전기공학부

**AVR parameter tuning with On-line System model
using parameter optimization technique**

° Jung-mun Kim, Seung-Il Moon
Seoul National University

Abstract - AVR parameter tuning for voltage control of power system generators has generally been done with the open-circuit model of the synchronous generator. When the generator is connected on-line and operating at rated load conditions, the AVR operates in an entirely different environment from the open-circuit conditions. This paper describes a new method for AVR parameter tuning using optimization technique with on-line linearized system model. As this method considers not only the on-line models but also the off-line open-circuit models, AVR parameters tuned by this method can give the sufficiently stable performance at the open-circuit commissioning phase and give the desired performance at the operating conditions.

Also this method estimates the optimum parameters for desired performance indices that are chosen for satisfying requirements in some practical applications, the performance of the AVR can satisfy the various requirements.

1. 서 론

여자제어기의 파라미터는 전력시스템의 동적 특성과 안정도에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 적절한 파라미터의 설정은 매우 중요하다. 일반적으로 AVR의 파라미터 튜닝은 open-circuit 발전기 모델을 이용하여 Bode plot 등과 같이 주파수 영역에서의 해석적인 방법에 의해 수행되어 왔다[1,2,3]. 이와 같이 해석적인 방법을 이용하면 일반적으로 좋은 성능을 나타내는 파라미터를 손쉽고 효과적으로 구할 수 있지만, AVR의 동작환경이 발전기 계통에 연결되어 있는 상태에서 시스템의 구성과 부하상태 등의 계통 상황에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 AVR의 실제 동작 환경에 최적화된 파라미터를 얻기가 힘들다.

이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 과도 안정도 해석용 프로그램을 이용하여 주파수 영역의 on-line 발전기 모델을 얻고, 이를 이용하여 해석적인 방법을 통해 AVR의 파라미터를 튜닝하는 방법이 제안되었다[5]. 하지만 해석적인 방법에 의한 파라미터 튜닝은 좋은 성능을 나타내는 파라미터를 얻기 위해 많은 시행착오가 필요하다. 또한, 튜닝된 파라미터가 발전기 초기전압 유기 과정에서의 안정도를 보장하지 못하고, AVR의 동작환경에 따라 요구되는 다양한 성능지표를 만족하는 파라미터를 얻기가 힘들다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 파라미터 최적화 기법을 이용하여 원하는 발전기 응답의 성능 지표를 향상시키도록 하는 최적 파라미터를 튜닝하는 방법에 대하여 소개하고자 한다. 제안된 방법은 발전기가 계통에 연결된 상황의 on-line 시스템 모델을 이용하여, 향상시키고자 원하는 성능 지표를 목적 함수로 설정하고, 시스템의 안정도 유지를 위한 다른 성능 지표들을 제약 조건으로 설정함으로써, 전체 시스템의 안정도

를 해치지 않는 범위 내에서 원하는 성능 지표를 향상시키는 최적의 파라미터를 찾을 수 있다. 따라서 제안된 방법을 이용하면 특정 성능 지표의 향상을 위해 튜닝된 파라미터가 다른 성능 지표를 악화시켜 시스템의 안정도를 해치는 일을 피할 수 있기 때문에 여러 성능 지표들 간의 균형을 맞추는데 드는 시행착오와 노력을 줄일 수 있다.

2. 본 론

2.1 선형화된 On-line 시스템 모델

본 논문에서 사용한 전체 시스템 구성은 아래 <그림 1>과 같다.

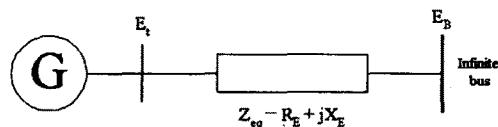


그림 1. 전체 시스템의 구성

본 논문에서는 발전기의 모델로 field flux의 동적 특성만을 고려한 classical 발전기 모델을 사용하였다. Classical 발전기 모델의 swing 방정식을 포함한 상태 방정식은 <식 1~3>과 같고, 여자제어기의 제어 대상 신호인 ΔE_t 는 <식 4>와 같다(7).

$$\Delta \dot{\omega}_r = -\frac{K_D}{2H} \Delta \omega_r - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta \Psi_{fd} + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (1)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (2)$$

$$\Delta \dot{\Psi}_{fd} = -\frac{1}{T_3} \Delta \Psi_{fd} + \frac{K_3}{T_3} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{T_3} \Delta \delta \quad (3)$$

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} \quad (4)$$

위의 수식에 나오는 계수들은 참고문헌 6에서 찾을

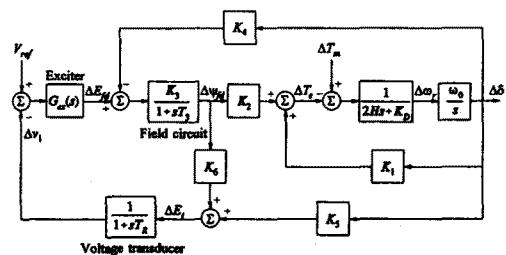


그림 2. on-line 발전기 모델과 여자기의 블록 선도

수 있다. 위의 수식을 블록 선도로 나타내면 (그림 2)와 같다.

위의 블록 선도로부터 ΔV_{ref} 에서 ΔE_t 까지의 전달함수를 구하면 아래의 <식 5>와 같다.

$$\frac{\Delta E_t}{\Delta V_{ref}} = \frac{-K_2 K_3 \omega_0 [K_5 - \frac{K_6 ((2Hs + K_D)s + \omega_0 K_1)}{K_2 \omega_0}]}{(1 + sT_3)(2Hs^2 + K_D s + K_1 \omega_0) - K_2 K_3 K_4 \omega_0} G_{ex}(s) \quad (5)$$

위 식에서 $G_{ex}(s)$ 는 투닝을 원하는 여자제어기의 전달함수이다.

2.2 파라미터 최적화 기법

본 논문에서 원하는 성능 지표를 최적화하기 위한 파라미터 최적화 기법은 MATLAB의 Optimization toolbox를 사용하여 구현하였다.

일반적으로 하나의 성능지표를 최적화 하도록 투닝된 파라미터는 다른 성능지표에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 on-line 발전기 모델의 성능지표를 최적화 하도록 투닝된 파라미터가 off-line 시의 발전기 응답이나 여자제어기 제어루프의 안정도를 해칠 우려가 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 off-line 시의 안정도를 해치지 않기 위한 최소한의 off-line 성능지표를 보장해 줘야 한다. 아래의 <표 1>은 일반적으로 안정적인 성능을 나타내는 제어시스템의 성능지표를 나타낸 것이다[3].

표 1. 안정된 제어 시스템의 성능지표

Gain Margin	≥ 6 dB
Phase Margin	$\geq 40^\circ$
Overshoot	0 to 15%
M_p	1.1 to 1.6
Damping Ratio	≥ 0.6

본 논문에서는 off-line의 성능지표 G.M과 P.M의 최소값을 제약조건으로 설정함으로써 off-line 시의 안정도를 해치지 않는 범위 내에서 on-line 성능을 최적화하는 파라미터를 투닝하도록 했다. 다음의 <식 6>은 파라미터 최적화 기법을 적용하기 위한 목적함수와 제약조건의 식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize } (P.M, G.M, \omega_c) \text{ of on-line model} \quad (6) \\ &\text{Subject to } P.M \text{ of off-line model } \geq 40^\circ \\ &\quad G.M \text{ of off-line model } \geq 6 \text{ dB} \\ &\quad \text{기타 안정도 유지를 위한 제약조건} \end{aligned}$$

2.3 사례 연구

다양한 사례 연구의 결과, on-line 발전기 모델의 주파수 응답특성 중 phase margin(P.M)과 crossover frequency(ω_c)가 큰 시스템일수록 발전기 단자전압의 응답속도가 빠르고, gain margin(G.M)이 큰 시스템일수록 power oscillation의 damping이 큰 것을 알 수 있었다.

본 절에서는 rate-feedback type의 여자제어기인 IEEE type ST2A 여자제어기가 부착된 시스템에서 발전기 단자 전압의 응답 특성을 향상시키기 위한 목적으로 파라미터를 투닝하고, 이를 기존의 방법에 의한 파라미터와 비교하였다. <그림 3>은 IEEE ST2A 여자제어기의 블록 선도를 나타낸 것이다[4]. 선형 해석을 위하여 제어 경로의 곱셈기는 동작점에서 계산된 값의 계인(V_B)으로 대체하였다. 위의 모델에서 계인 K_A 는 조정할 수 없는 것으로 가정하였다.

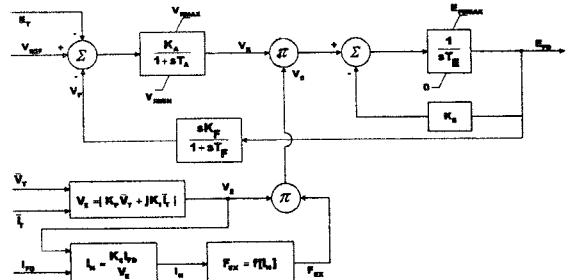


그림 3. IEEE ST2A 여자제어기의 블록 선도

표 2. 시스템 파라미터

Generator parameters

$$\begin{aligned} T_{d0}' &= 0.27, T_{d0}'' = 0.05, T_{d0}''' = 1.0, T_{d0}'''' = 0.05, L_d = 1.80, \\ L_d' &= 0.27, L_d'' = 0.198, L_d = 1.728, L_d' = 0.45, L_d'' = 0.15, \\ L_i &= 0.09, R_a = 0.003, H = 3.5, K_D = 0. \end{aligned}$$

Exciter parameters

$$T_R = 0, T_E = 0.5, T_A = 0.15, T_F = 1.0, K_E = 1.0, K_A = 120, K_F = 0.02, K_P = 1.19, K_I = 2.5, K_C = 0.5$$

Operating conditions

$$P_t = 0.5, Q_t = 0.2, E_t = 1.0, R_E = 0.155, X_E = 0.666$$

표 3. 각 투닝 방법에 의해 구해진 파라미터

Off-line model	$K_F = 0.0670$	$T_F = 1.0$
On-line model	$K_F = 0.0478$	$T_F = 1.0$

표 4. 구해진 파라미터의 성능지표 비교

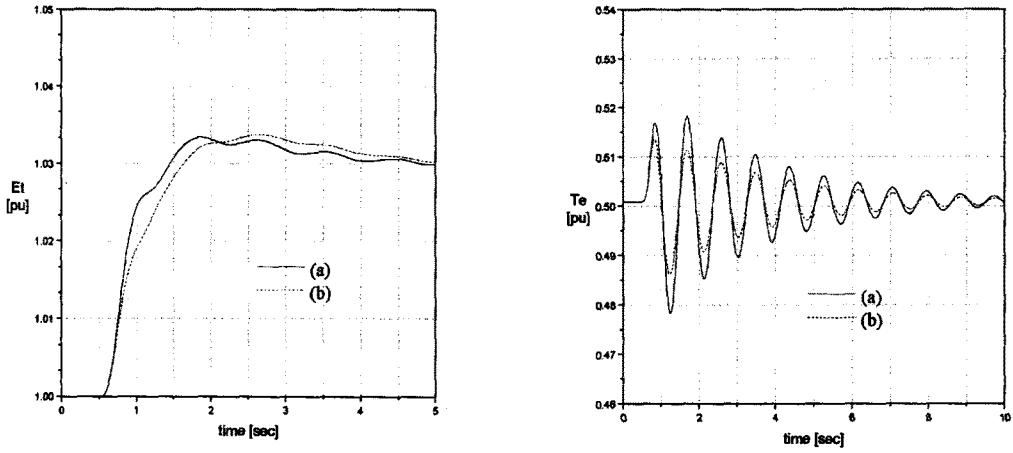
Off-line model	On-line model
off-line 시스템 모델의 주파수 응답특성	
P.M = 61.905°	P.M = 54.553°
G.M = 11.375 [dB]	G.M = 8.923 [dB]
$\omega_c = 2.652$ [rad/s]	$\omega_c = 3.418$ [rad/s]
on-line 시스템 모델의 주파수 응답특성	
P.M = 68.907°	P.M = 69.322°
G.M = 20.074 [dB]	G.M = 17.556 [dB]
$\omega_c = 1.078$ [rad/s]	$\omega_c = 1.358$ [rad/s]

투닝에 사용된 시스템의 발전기, 여자제어기, 전송선로의 파라미터와 부하 조건은 <표 2>와 같다. 발전기 단자전압의 응답특성을 개선하기 위한 목적함수와 off-line 안정도 유지를 위한 제약조건은 아래의 <식 7>과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize } (P.M + \omega_c) \text{ of on-line model} \quad (7) \\ &\text{subject to } P.M \text{ of off-line model } \geq 40^\circ \\ &\quad G.M \text{ of off-line model } \geq 6 \text{ dB} \end{aligned}$$

위의 식을 이용하여 파라미터 최적화 기법으로부터 얻어진 파라미터와 off-line 발전기 모델을 이용하여 해석적으로 구한 파라미터[2]는 <표 3>과 같다.

각각의 파라미터에 대한 주파수 응답의 성능 지표를 <표 4>에 나타내었다. <표 4>에서 볼 수 있듯이 제안된 파라미터 최적화 기법에 의해 구해진 파라미터가 off-line 성능지표가 안정도를 해치지 않기 위해 설정한 제약조건의 범위 안에 있으면서, on-line 성능 지표를



(a) on-line 발전기 모델과 파라메터 최적화 기법을 이용하여 튜닝된 파라메터의 응답
 (b) off-line 발전기 모델과 해석적 방법을 이용하여 튜닝된 파라메터의 응답

그림 4. AVR 기준 전압을 3% 올렸을 때의 발전기 응답

향상시키는 것을 알 수 있다.

〈그림 4〉는 각각의 파라메터에 대해 AVR의 기준전압을 3% 올렸을 때의 발전기 단자전압의 응답과 전기적 출력의 응답을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 on-line 시스템 모델과 제한한 최적화 기법을 이용하여 튜닝된 파라메터의 응답이 off-line 발전기 모델을 이용하여 얻어진 파라메터의 응답에 비해 더 빠른 응답을 보이는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 발전기가 계통에 연결된 상황에서 얻어진 on-line 시스템 모델을 이용하여 원하는 성능 지표를 최적화 하도록 AVR의 파라메터를 튜닝하는, 파라메터 최적화 기법을 이용한 AVR의 튜닝법을 제안하였다. 제안된 방법은 발전기가 계통에 연결된 상황의 on-line 시스템 모델을 이용하기 때문에 실제 AVR의 동작환경에서 최적화 된 파라메터를 얻을 수 있다. 아울러 발전기를 계통에 연결하기까지의 초기전압 유기과정에서의 안정도 유지를 위한 최소한의 성능지표를 제약조건으로 고려하기 때문에, on-line 조건에 최적화 된 파라메터가 off-line 운전시의 안정도를 해칠 우려가 없게 된다.

다양한 사례 연구 결과 on-line 시스템 모델의 이득 여유가 전기적 토크의 진동과 밀접한 관계가 있고, 위상 여유와 이득교차주파수가 터미널 전압의 응답과 관계가 있음을 알 수 있었다. 따라서 위의 관계를 제안된 방법의 목적 함수로 적절히 이용하면, 시스템의 상황에 따라 요구되는 성능 지표에 알맞은 파라메터를 보다 쉽게 구할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] IEEE COMMITTEE REPORT, "Excitation System Dynamic Characteristics", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No.1, pp. 64-75, Jan/Feb 1973.
- [2] Rodolfo J. Koessler, "Techniques for tuning excitation system parameters", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 3, No. 4, pp. 785-791, December 1988.
- [3] IEEE Std. 421.2-1990, *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*, IEEE, 1990.
- [4] IEEE Std. 421.5-1992, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE, 1992.
- [5] K. Bollinger, R. Lalonde, "Tuning Synchronous Generator Voltage Regulators Using On-line Generator Models", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 1, pp. 32-37, Jan/Feb 1977.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, pp. 727-766, 1994.