

온라인 여자제어시스템 모델과 SQP법을 이용한 AVR의 파라미터 튜닝 방법에 관한 연구

論 文
51A-3-2

A New Optimal AVR Parameter Tuning Method Using On-Line Excitation Control System Model with SQP Method

金重文* · 文承逸**
(Joong-Moon Kim · Seung-Il Moon)

Abstract - AVR parameter tuning for voltage control of generators has generally been done with the off-line open-circuit model of the synchronous generator. When the generator is connected on-line and operating with load, the AVR operates in an entirely different environment from the open-circuit conditions. This paper describes a new method for AVR parameter tuning for on-line conditions using SQP(Sequential Quadratic Programming) method with frequency response characteristics of linearized on-line system model. As the proposed method uses the on-line system model, the tuned parameter sets show more optimal behavior in the on-line operating conditions. Furthermore, as this method considers the performance indices that are needed for stable operation as constraints, AVR parameter sets that are tuned by this method could guarantee the stable performance, too.

Key Words : AVR, 여자제어기, 온라인 여자제어시스템 모델, 파라미터 튜닝, SQP법

1. 서 론

여자제어기의 AVR(Automatic Voltage Regulator)는 발전기의 단자 전압을 적절한 값으로 유지시키는 기능을 통하여 부하 변동이나 계통의 교란에 관계없이 안정된 전력을 공급하도록 하는 역할을 수행하는 장치로써, 그 동적 특성이 발전기와 계통의 안정도에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 여자 제어기의 파라미터를 적용하고자 하는 발전기와 계통에 적합하게 설정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

이제까지는 이러한 AVR의 파라미터를 튜닝하기 위하여 동기 발전기가 계통에 분리된 상태의 오프라인 개(開)루프 여자제어시스템 모델을 구하고, 이 모델로부터 얻어진 주파수 응답특성을 이용하여 발전기 터미널 전압의 응답이 안정적인 제동 특성을 가지도록 튜닝하는 방법이 널리 사용되었다 [1,2]. 이러한 방법은 다수의 AVR의 파라미터를 비교적 손쉽게 효율적으로 튜닝할 수 있는 장점이 있다. 하지만 튜닝에 사용된 오프라인 여자제어시스템 모델이 발전기가 계통에 연결되어 운전하고 있는 온라인 운전 상태와 상당한 차이를 가지기 때문에, 오프라인 모델을 이용하여 튜닝된 파라미터의 성능이 실제 온라인 상황에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 AVR이 발전기가 계통에 연결되어 운전중인 온라인 상황에서 원하는 성능을 내도록 하기 위해서는 온라인 시스템 모델을 사용하여 AVR의 제어 파라미터를 튜닝해야

한다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 과도안정도 해석용 시뮬레이터를 이용하여 얻은 온라인 발전기 모델을 이용한 파라미터 튜닝법이 소개되었다[3]. 이 방법은 온라인 모델을 사용하여 기존의 방법에 비해 온라인 상황에서 보다 나은 성능을 보이지만, 여전히 기존의 튜닝 방법에서 사용하는 일관적인 해석적 방법을 사용하여 튜닝을 수행하기 때문에 개개의 여자제어시스템의 운전 조건에 최적화된 파라미터를 얻기가 힘들다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 발전기가 계통에 연결되어 운전되는 상황에서 외부 계통의 영향과 발전기의 출력 상태 등 운전 조건의 영향 등이 고려된 온라인 모델을 구하고, 이로부터 구해진 주파수 응답 특성과 SQP(Sequential Quadratic Programming)법을 이용하여 각 여자제어시스템의 운전 조건에 최적화된 AVR의 제어 파라미터를 튜닝하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 온라인 모델의 주파수 영역 성능 지수와 시간 영역 성능 지수와 관계에 대하여 조사하고, 이를 이용하여 특정한 온라인 상황에서 안정도를 유지하면서 향상된 여자제어기의 응답 성능을 얻기 위한 목적 함수를 제안하였다. 아울러 제안된 방법은 안정적인 운전을 위한 최소한의 안정도 마진을 SQP법의 제약 조건으로 설정함으로써 성능 향상과 안정도 유지 사이의 균형을 잡기 위한 노력을 최소화하였다.

* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 博士課程

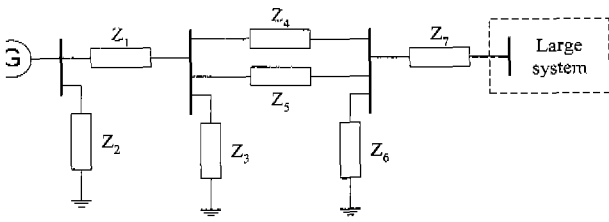
** 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 19日

最終完了 : 2002年 1月 15日

2. 선형화된 온라인 여자제어시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 파라미터 튜닝에 사용한 전체 시스템의 구성을 보인 것이다.



리플 1 전체 시스템의 구성
Fig. 1 Overall System Configuration

튜닝에 사용된 시스템은 위의 그림 1과 같이 동기 발전기, 변압기와 병렬 전송 선로를 통해 무한 모선에 연결되어 있고, 전송 선로 양단에 두 개의 부하가 연결된 구조를 갖는다. 위의 시스템에서 동기 발전기는 하나의 직축 댐퍼 권선과 두 개의 횡축 댐퍼 권선을 사용한 모델을 사용하였다. 발전기의 동적 특성, 전송 선로 및 부하 조건의 영향 등이 포함된 선형화된 전체 시스템의 동적 상태 방정식은 아래의 [4].

$$\begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta \psi_{1d} \\ \Delta \psi_{1q} \\ \Delta \psi_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta \psi_{1d} \\ \Delta \psi_{1q} \\ \Delta \psi_{2a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_M \\ \Delta E_{FD} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$1E_i = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd} + K_{61} \Delta \psi_{1d} + K_{62} \Delta \psi_{1q} + K_{63} \Delta \psi_{2a} \quad (2)$$

위의 식 1에서 ΔT_M 은 터빈으로부터 공급되는 기계적 토크의 변화량을, ΔE_{FD} 는 AVR의 동작에 의해 여자기로부터 공급되는 여자 전압의 변화량을 나타낸다. 본 논문에서는 튜닝에 사용될 온라인 모델의 간략화를 통한 빠른 튜닝을 위하여 여자제어시스템의 동적 특성에 비해 느린 응답 특성을 갖는 ΔT_M 을 무시하고 튜닝을 수행하였다. 튜닝에 사용한 최종적인 상태 방정식은 위의 식 1 및 식 2와 아래에 설명할 여자제어기의 상태 방정식을 이용해서 구할 수 있고, 구해진 상태 방정식은 ΔE_i 와 ΔV_{ref} 간의 전달 함수의 형태로 변환되어 튜닝에 필요한 주파수 영역 성능 지수의 계산에 사용된다 위의 식 1 및 식 2에 나타난 각각의 계수에 대한 상세한 식은 참고문헌 4에서 찾을 수 있다.

본 논문에서는 제안된 튜닝 방법의 성능을 검증하기 위하여 두 개의 여자제어기 모델을 사용하여 튜닝을 수행하였다. 본 논문에서 튜닝에 사용된 두 개의 여자제어기 모델의 블록 선도는 각각 아래의 그림 2 및 그림 3과 같다 [5]. 그림 2는 rate-feedback type IEEE ST2A 여자제어기 모델의 블록 선도를 나타낸 것이다. 이 여자제어기 모델은 여자제어루프의 안정도 향상을 위해 비율 피드백(rate feedback) 루프를 사용하고 있다. 그림 3은 lead-lag type IEEE ST3A 여자제어기 모델의 블록 선도를 나타낸 것이다. 이 여자제어기 모델은 높은 이득으로 인해 시스템의 댐핑이 부족해지는 것을 보상하기 위하여 TGR(Transient Gain Reduction)을 사용하였다. 두 여자제어기 모델의 선형화 된 상태 방정식을 식(3)과 (4)에 나타내었다. 선형화된 여자제어기 모델을 얻기 위하여 여자제어기 제어 루프의 적(積)은 튜닝 대상 시스템의 운전 조건에서 계산된 이득 V_β 로 대체하였다.

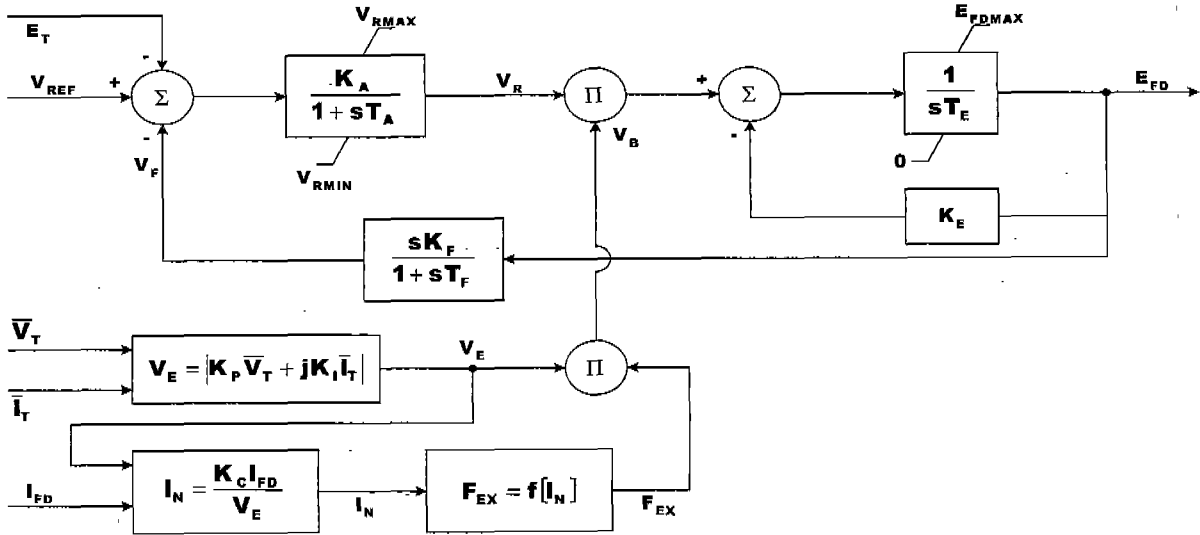


그림 2 IEEE type ST2A 비율 피드백 방식 여자기
Fig. 2 IEEE type ST2A Rate-Feedback type Exciter

$$\begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_A} & 0 & -\frac{K_A}{T_A} \\ \frac{V_B}{T_E} & -\frac{K_E}{T_E} & 0 \\ \frac{K_F V_B}{T_E T_F} & -\frac{K_E F_F}{T_E T_F} & -\frac{1}{T_F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_A}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_i \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad (3)$$

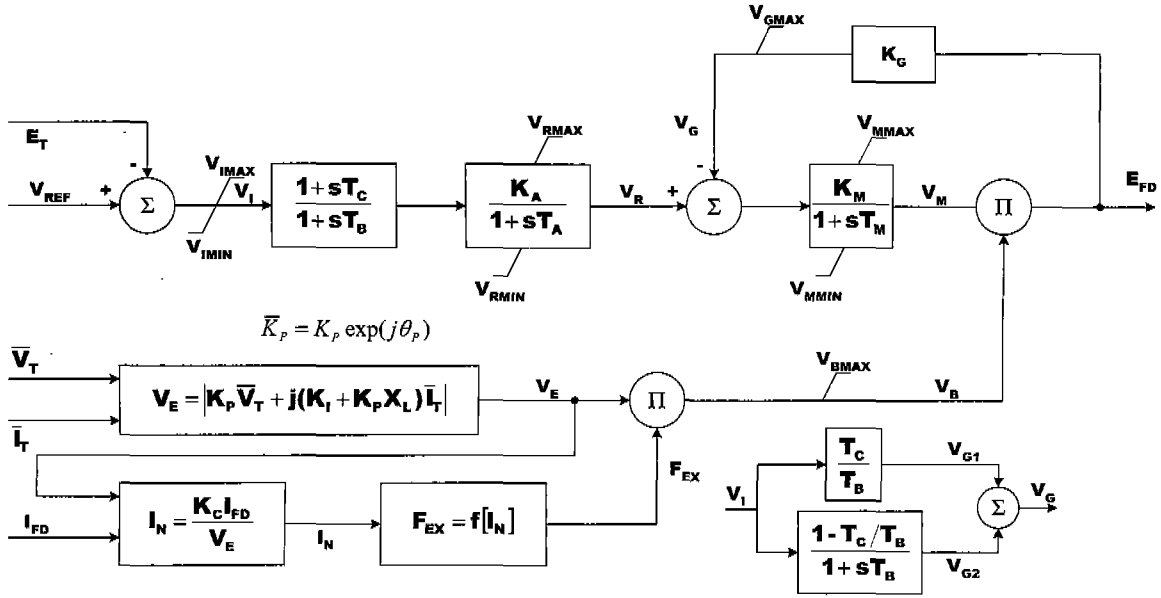


그림 3 IEEE type ST3A Lead-Lag 방식 여자기
Fig. 3 IEEE type ST3A Lead-Lag type Exciter

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{G2}' \\ \Delta V_R \\ \Delta E_{FD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_B} & 0 & 0 \\ \frac{K_A}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & 0 \\ 0 & \frac{K_M V_B}{T_M} & -\frac{1+V_B K_G K_M}{T_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{G2} \\ \Delta V_R \\ \Delta E_{FD} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_B} \left(1 - \frac{T_C}{T_B}\right) & \frac{1}{T_B} \left(1 - \frac{T_C}{T_B}\right) \\ -\frac{K_A T_C}{T_A T_B} & \frac{K_A T_C}{T_A T_B} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\Delta E_t \quad \Delta V_{ref}] \quad (4)$$

3. 온라인 시간 영역 특징과 주파수 영역 성능 지수와의 관계

기존의 튜닝 방법에 사용된 오프라인 여자제어시스템 모델의 경우, 여자제어시스템의 상대적인 안정도는 오프라인 모델의 이득 여유(gain margin) 및 위상 여유(phase margin)를 통해 판별할 수 있고, 여자제어시스템의 과도 응답의 속도는 교차주파수(crossover frequency)에 의해 판별할 수 있다 [1]. 하지만 동기발전기가 계통에 연결된 온라인 상황에서는 여자제어시스템의 성능이 발전기의 부하 조건이나 외부 전송선로의 구성에 따라 많은 영향을 받기 때문에, 오프라인 모델을 이용한 튜닝 방법에서와 같이 온라인 모델의 주파수 성능지수를 이용하여 여자제어시스템을 튜닝하기 위해서는 온라인 모델의 주파수 성능지수와 시스템의 응답 특성과의 관계를 살펴보아야 한다. 따라서 본 논문에서는 온라인 여자제어시스템 모델의 주파수 성능 지수와 시간 영역 성능지수와의 관계를 살펴보기 위하여 다양한 여자제어 시스템 모델과 다양한 운전 조건을 사용하여 사례 연구를 수행하고, 다양한 사례 연구 중 IEEE ST2A 여자제어기를 이용하여 세 가지의 다른 운전 조건에 대하여 주파수 성능 지수와 시간 영역 성능지수와의 관계를 평가한 사례 연구를 아래에 나타내었다. 아래의 표. 1은 사례연구에 사용된 발전기 및 여자제어기의 파라미터와 계통의 운전 조건을 나타낸 것이다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System Parameter

Generator parameters					
T_{do}'	T_{do}''	T_{qo}'	T_{qo}''	H	K_D
5.0	0.05	1.0	0.05	3.5	0.0
L_d	L_d'	L_d''	L_q	L_q'	L_l
1.8	0.27	0.198	1.728	0.45	0.09
Exciter parameters					
K_A	T_A	K_E	T_E	T_R	K_P
120	0.15	1.0	0.5	0.0	1.19
K_I	K_C	T_F			
2.5	0.5	1.0			
Operating Conditions $E_t = 1.0$					
	P_t	Q_t	R_E	X_E	δ
Case 1	0.15	0.06	0.158	0.673	7.2
Case 2	0.3	0.12	0.158	0.673	23.1
Case 3	0.5	0.2	0.158	0.673	41.6

여기서, $R_E + jX_E$ - 외부 전송 선로의 테브난 등가 임피던스
 δ - 발전기의 부하각

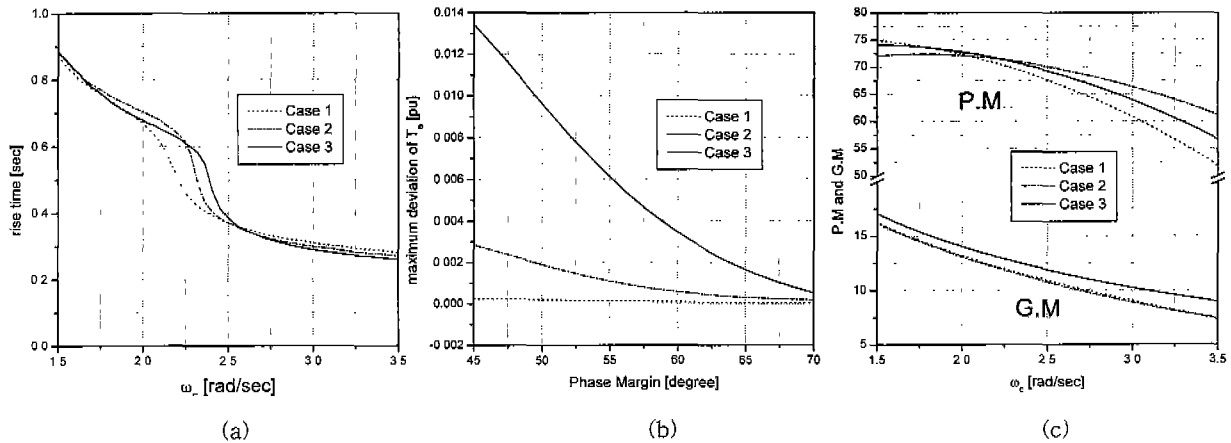


그림 4 온라인 여자제어시스템 모델의 주파수 영역 성능지수와 시간 영역 성능지수와와의 관계

Fig. 4 Relationships between some characteristics of frequency domain and time domain of the excitation control system

그림 4-a에서 볼 수 있듯이 발전기가 계통에 연결되어 있는 온라인 모델에서도 교차주파수가 여전히 시스템의 과도 응답 속도와 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 여자제어시스템의 운전 조건에 관계없이 교차주파수가 클수록 시스템의 과도 응답 속도가 빠른 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 4-b와 4-c에서 볼 수 있듯이 온라인 모델의 위상 여유와 이득 여유가 시스템의 안정도를 나타내는 척도임을 확인할 수 있다. 즉, 큰 위상 여유나 이득 여유를 갖는 상태에서 출력 토크의 최대 변동폭이 작은 것을 볼 수 있는데, 출력 토크의 최대 변동폭이 시스템의 안정도를 나타내는 직접적인 척도는 아니지만 일반적으로 출력 토크의 변동폭이 작은 시스템이 동일한 운전 조건에서 보다 큰 뎀핑 토크를 제공하는 안정적인 시스템이기 때문에 위상 여유나 이득 여유가 시스템의 상대적인 안정도와 관계가 있음을 알 수 있다.

과도 안정도 마진을 향상시키기 위해서는 일반적으로 빠른 응답 속도를 갖는 여자제어시스템이 필요하다 [4]. 여자제어시스템의 응답속도를 빠르게 설정하기 위해서는 여자제어시스템의 모델이 큰 값의 교차주파수를 갖도록 여자제어시스템의 파라미터를 튜닝해야 하는데, 그림 4-a와 그림 4-c에서 볼 수 있듯이 큰 값의 교차주파수를 갖도록 튜닝된 여자제어시스템의 경우 위상 여유와 이득 여유의 값이 줄어들어 시스템의 안정도 마진이 줄어들게 되고, 발전기가 약한 전송선로를 통해 계통에 연결되어 있고 많은 출력을 내고 있는 상황에서, 그 정도가 심할 경우 시스템은 진동에 대한 충분한 뎀핑을 가지지 못해 소신호 안정도 문제를 일으키게 된다. 그러므로 여자제어시스템의 안정적인 동작을 위해서는 빠른 과도 응답 특성과 충분한 안정도 마진 확보의 두 가지 성능을 갖도록 여자제어시스템의 파라미터를 튜닝하는 것이 중요하다.

4. 파라미터 튜닝을 위한 목적 함수의 선정

본 논문에서는 과도 안정도를 향상시키기 위한 빠른 응답 속도와 소신호 안정도 문제를 피하기 위한 충분한 안정도 마진을 갖도록 하는 여자제어시스템의 파라미터를 튜닝하기

위하여 아래의 식 (5)~(8)과 같은 목적 함수를 구성하고, SQP법을 사용하여 두 가지 성능을 만족하는 파라미터를 튜닝하였다.

$$\text{Maximize } (\omega_c + w \times P.M.) \text{ of on-line system model} \quad (5)$$

$$\text{Subject to P.M. of off-line system model} \geq 40^\circ \quad (6)$$

$$\text{G.M. of off-line system model} \geq 6 \text{ dB} \quad (7)$$

$$\text{P.M. of on-line system model} \geq 65^\circ \quad (8)$$

where, w - the weighting value of the phase margin

본 논문에 사용된 SQP법은 식 (5)와 같은 목적함수를 최대화하는 파라미터를 찾기 때문에 온라인 시스템 모델의 교차주파수를 크게 하는 방향으로 파라미터를 계산하게 된다. 이 때 3장에서 설명한 바와 같이 과도한 교차 주파수로 인해 시스템의 안정도 마진이 저하되어 소신호 안정도 문제가 발생하는 것을 막기 위하여 온라인 시스템 모델의 위상 여유도 목적 함수에 포함하였다. 즉, 빠른 응답을 얻기 위해 교차 주파수를 증가시키는 방향으로 튜닝이 진행된다면 시스템의 위상 여유가 작아지기 때문에 전체적으로 목적함수의 크기를 줄이기 때문에 시스템의 교차 주파수가 과도한 값을 갖는 것을 막아준다. 본 논문에서는 온라인 여자제어시스템 모델의 소신호 안정도 마진을 고려하기 위하여 이득 여유를 사용하지 않고 위상 여유를 사용하였는데, 이는 이득 여유의 경우 비율 피드백(rate feedback) 시스템의 안정화 루프 이득 K_F 와 같은 특정 파라미터값이 증가할 경우 시스템의 안정도 마진과 관계없이 그 값이 증가하는 특성이 있어서 시스템의 안정도 마진을 판별하는데 적당하지 않기 때문이다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 온라인 여자제어시스템 모델의 교차 주파수의 값은 위상 여유의 값에 비해 그 크기가 매우 작다. 따라서 시스템의 위상 여유를 그대로 목적 함수에 사용할 경우에 교차 주파수의 영향이 매우 작아져서 느린 응답 속도를 갖는 파라미터를 선정하는 잘못된 튜닝을 수행하게 된다. 따라서 위상 여유를 목적 함수에 적용할 때는 교차 주파수와 위상 여유의 값의 크기와 목적 함수에 미치는 영향을 고려하여 위상 여유에 적당한 값의 가중치를 곱하여

정규화 시킨 후 사용하여야 한다. 하지만, 온라인 여자제어 시스템의 응답 특성은 발전기의 부하각 및 여자제어기의 종류 등 다양한 운전 조건의 영향을 받기 때문에, 올바른 튜닝을 위해 필요한 운전 조건에 적당한 가중치를 해석적인 방법을 통해 얻는 것이 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다양한 운전 조건과 여자제어시스템에 대하여 다양한 사례 연구를 수행하고, 이를 통해 각 여자제어기 모델 및 운전 조건에 적당한 가중치를 아래의 표 2와 같이 제안하였다. 여자제어시스템의 부하각이 커지게 되면 시스템의 댐핑 토르가 부족해 지게 되고, 이로 인해 빠른 응답 속도를 가지는 여자제어시스템의 응답은 점차 진동이 심해지게 된다. 따라서 이를 보상하기 위하여 시스템의 부하각이 커짐에 따라 시스템의 소신호 안정도 유지를 위해 높은 교차 주파수를 갖는 빠른 응답의 여자제어시스템보다는 큰 값의 위상 여유를 갖는 안정적인 여자제어시스템이 필요하게 된다. 즉, 시스템의 부하각이 커질수록 목적함수에 사용되는 위상 여유의 가중치를 크게 해서 위상 여유의 고려량을 늘려 주어야 한다.

표 2 위상 여유 가중치의 제안값

Table 2 Suggested weighting values for proper tuning

Rate Feedback type		Lead-Lag type	
Power-angle	Weighting value	Power-angle	Weighting value
0° ~ 20°	0.1 ~ 0.2	0° ~ 50°	0.1 ~ 0.2
20° ~ 50°	0.2 ~ 0.3	50° ~ 60°	0.2 ~ 0.3
50° ~ 60°	0.3 ~ 0.5	60° ~ 65°	0.3 ~ 0.5
60° ~	0.5 ~ 1.0	65° ~	0.5 ~ 1.0

또한 제안된 튜닝 방법에서는 여자제어시스템의 안정적인 운전을 보장하기 위한 최소한의 온라인 및 오프라인 안정도 마진을 제약 조건으로 포함하여 튜닝을 수행하였다. 일반적으로 좋은 성능을 나타내기 위한 피드백 제어 시스템의 주파수 영역 성능 지수는 식 (6) 및 식 (7)과 같다 [1]. 따라서 오프라인 모델의 안정적인 운전을 보장하기 위하여 식 (6)과 식 (7)을 제약식에 포함하였다. 또한 온라인 모델의 경우 일반적으로 인정되는 성능 지수가 없기 때문에, 다양한 사례 연구를 통하여 식 (8)과 같은 안정적인 운전을 보장하기 위한 성능 지수를 선정하였다. 다양한 사례 연구 결과 식 (8)을 만족할 경우 여자제어시스템이 충분한 댐핑 토르를 갖게 되고 이로 인해 소신호 안정도 문제가 일어나지 않는 것을 확인하였다. 하지만, 발전기가 매우 큰 출력을 내고, 약한 외부 전송 선로를 통해 계통에 연결되는 상황이 되면 더 이상 식 (8)을 만족하지 못하고, 부족한 댐핑 토르의 영향으로 소신호 안정도 문제를 일으키게 되는데, 이를 해결하는 효과적인 방안중의 하나는 PSS(Power System Stabilizer)를 설치하여 부족한 댐핑 토르를 보상하는 것이다.

본 논문에서는 제약 조건이 있는 최적화 문제를 풀기 위하여 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하였다 [7,8,9]. 이 방법은 준 뉴턴 방법(quasi-Newton updating method)을 이용한 라그랑지안 함수(Lagrangian

function)의 헤시안(Hessian)으로부터 문제를 QP(Quadratic Programming) 문제로 근사화 시킨후에 Quadratic Programming 문제를 풀고, 이로부터 구해진 해를 이용하여 경로 탐색법(line search procedure)의 탐색 방향을 정하는 방법으로 최적화 문제를 푸는 방법이다. 본 논문에 사용된 SQP법에 대한 자세한 설명은 참고문헌 7, 8, 9에서 찾을 수 있다.

5. 사례 연구

5.1 경부하 조건에서의 비율 피드백 여자제어시스템의 튜닝

본 절에서는 제안된 튜닝 방법의 성능을 검증하기 위하여 비율 피드백 (Rate-Feedback) 여자제어시스템인 IEEE type ST2A 여자제어기를 사용하여 튜닝을 수행하였다. ST2A 여자제어기의 블록 선도는 그림 2와 같다. 오프라인 모델을 이용한 튜닝법과의 비교를 위해 참고문헌 [2]에서와 같이 튜닝 가능한 파라미터 중 여자제어시스템 안정화 루프의 이득 K_F 만을 사용하여 튜닝을 수행하였다. 즉, 이득 K_A 는 좋은 정상 상태 성능을 유지하기 위하여 그 값을 변화시킬 수 없는 것으로 가정하였고, 여자제어시스템 안정화 루프의 시정수 T_F 도 1.0으로 고정된 것으로 가정하였다. 본 사례 연구에 사용된 발전기와 여자제어기의 파라미터는 표 1에서 찾을 수 있고, 시스템의 운전 조건은 표 3과 같다.

표 3 운전 조건 (Case 5.1)

Table 3 Operating Conditions (Case 5.1)

Operating Conditions					
P_t	Q_t	E_t	R_E	X_E	δ
0.2	0.06	1.0	0.210	0.603	13.7°

표 3에서 볼 수 있듯이 본 사례연구에 사용된 시스템은 발전기의 출력이 $P_t = 0.2$, $Q_t = 0.06$ 이고 그 부하각이 13.7°로서 경부하 조건에서 운전하고 있는 시스템으로서, 표 2에서 나타낸 것과 같이 목적함수에 사용할 위상 여유의 가중치를 0.15로 선정하여 튜닝을 수행하였다. 제안된 튜닝 방법에 의해 튜닝된 파라미터와 그 파라미터의 주파수 영역 성능 지수는 아래의 표 4와 같다. 표 4에서 볼 수 있듯이 튜닝된 파라미터의 온라인 및 오프라인 주파수 영역 성능 지수가 목적 함수의 제약 조건을 만족하고 있는 것을 알 수 있다.

표 4 선정된 파라미터의 주파수 영역 성능지수 (Case 5.1)

Table 4 Frequency domain performance Indices of the tuned parameter (Case 5.1)

Tuned parameters	Performance indices of generator off-line model	Performance indices of generator on-line model
$K_F=0.05$	$P.M=58.76^\circ$ $G.M=10.09$ [dB]	$P.M=58.76^\circ$ $G.M=12.94$ [dB]

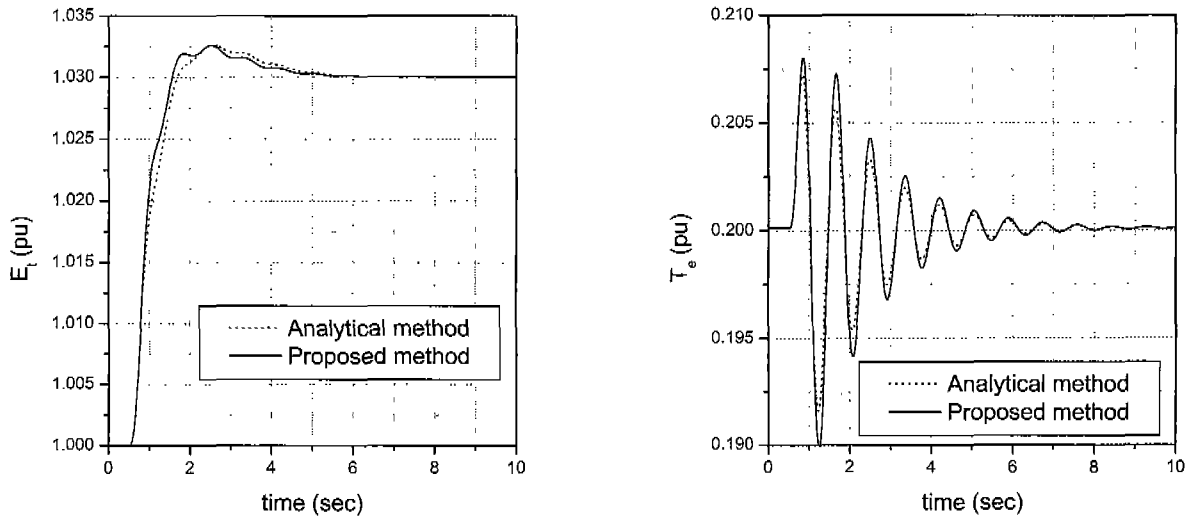


그림 5 시간 영역 모의 결과 (Case 5.1 - 3% step change in V_{ref})

Fig. 5 Time domain simulation results (Case 5.1 - 3% step change in V_{ref})

표 5 튜닝 전, 후의 시간영역 성능 지수 (Case 5.1)
Table 5 Time domain performance indices of both parameter (Case 5.1)

Tuning Method	Parameter	Over shoot	Rise Time	Settling Time (5%)
Proposed Method	$K_F = 0.056$	8.7%	0.71 [sec]	2.9 [sec]
Analytical Method	$K_F = 0.067$	8.9%	0.79 [sec]	3.1 [sec]

본 사례 연구에 사용된 여자제어시스템에 대하여 기존의 오프라인 모델을 이용하여 튜닝한 여자제어시스템 안정화

루프의 이득 K_F 의 값은 0.067이다 [2]. 튜닝 전, 후의 여자제어시스템의 성능 향상을 비교하기 위하여 실시간 전력계통 시뮬레이터를 이용하여 AVR의 기준 전압 V_{ref} 를 3% 스텝으로 올리는 시간 영역 모의를 수행하고, 모의된 시간 영역 성능 지수들을 아래의 표 5와 그림 5에 나타내었다.

5.2 중부하 조건에서의 비틀림 피드백 여자제어시스템의 튜닝

본 사례 연구에서는 앞 절의 사례연구에서 사용한 여자제어시스템에 대하여 동작 조건을 달리하여 튜닝을 수행하였다. 튜닝에 사용된 운전 조건은 표 6과 같다. 표 6에서 볼

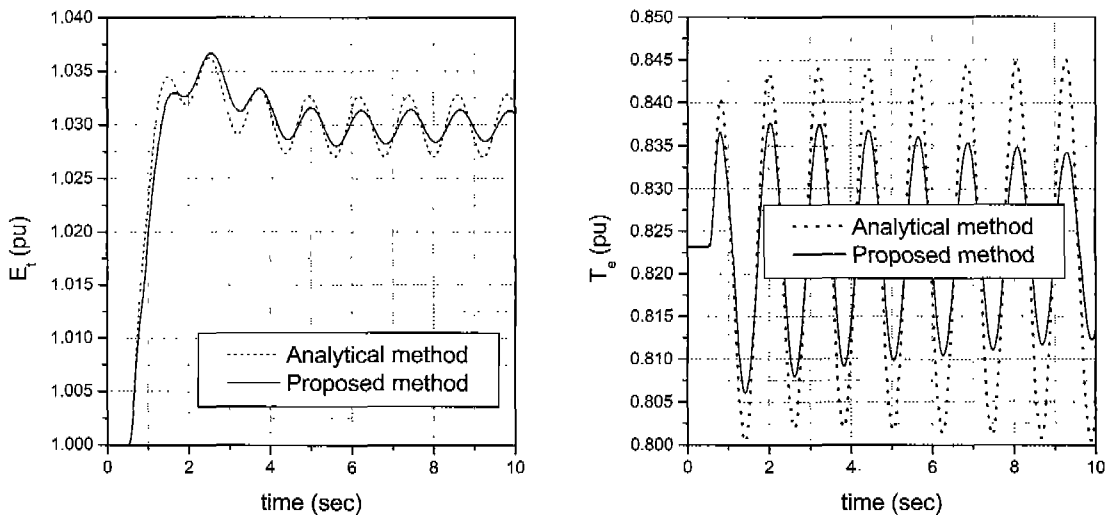


그림 6 시간 영역 모의 결과 (Case 5.2 - 3% step change in V_{ref})

Fig. 6 Time domain simulation results (Case 5.2 - 3% step change in V_{ref})

수 있듯이 본 사례 연구에 사용된 시스템의 경우 발전기의 부하각이 68.7° 로서 목적함수에 사용할 위상여유의 가중치를 0.8로 선정하여 튜닝을 수행하였다. 튜닝된 파라미터와 튜닝 전.후의 여자제어시스템의 성능을 표 7과 그림 6에 나타내었다.

표 7과 그림 6에서 알 수 있듯이 오프라인 모델을 이용하여 해석적으로 얻어진 파라미터의 경우 댐핑 토크의 부족으로 인하여 소신호 안정도 문제를 일으키는 것을 볼 수 있다. 이에 비해 제안된 튜닝 방법을 통해 구해진 파라미터의 경우 튜닝전에 비해 다소 느린 응답을 보이지만 충분한 댐핑 토크를 제공하여 소신호 안정도 문제가 없음을 볼 수 있다. 이처럼 오프라인 개루프 모델을 이용하여 얻은 파라미터는 특정 조건에서 온라인 운전 상황에서 적합하지 않은 성능을 보일 수 있으나, 제안된 튜닝 방법은 온라인 운전 조건이 포함된 모델을 사용하기 때문에 이러한 문제를 피할 수 있다.

표 6 운전 조건 (Case 5.2)
Table 6 Operating Conditions (Case 5.2)

Operating Conditions					
P_t	Q_t	E_t	R_E	X_E	δ
0.82	0.6	1.0	0.3	0.724	68.7°

표 7 튜닝 전 . 후의 시간영역 성능 지수 (Case 5.2)
Table 7 Time domain performance indices of both parameter (Case 5.2)

Tuning Method	Parameter	Over shoot	Rise Time	Settling Time (5%)
Proposed Method	$K_F = 0.087$	21 %	0.594 [sec]	- [sec]
Analytical Method	$K_F = 0.067$	20 %	0.477 [sec]	6.224 [sec]

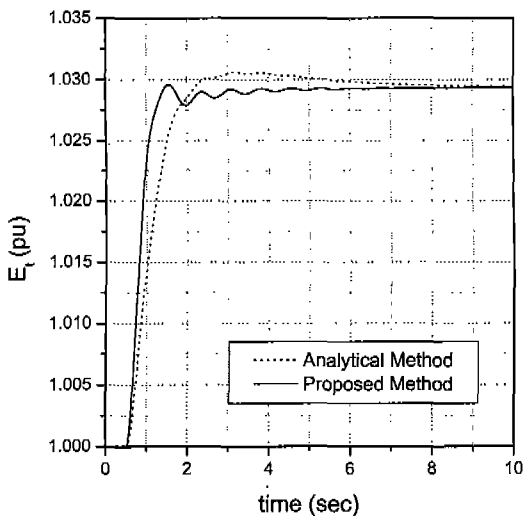


그림 7 시간 영역 모의 결과 (Case 5.3 - 3% step change in V_{ref})

Fig. 7 Time domain simulation results (Case 5.3 - 3% step change in V_{ref})

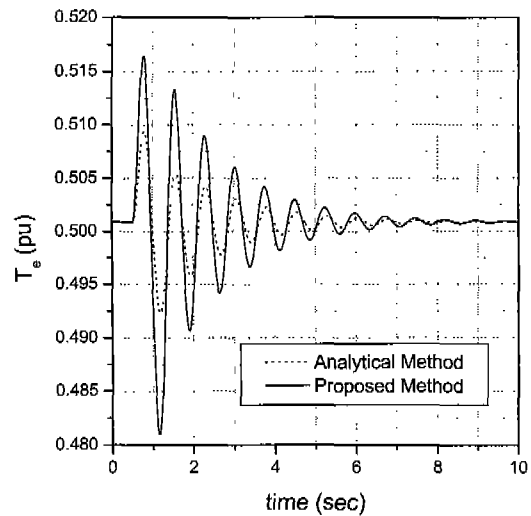
5.3 경부하 조건에서의 Lead-Lag 방식 여자제어 시스템의 튜닝

본 절에서는 경부하 조건에서 Lead-Lag 방식의 IEEE type ST3A 여자제어기를 이용하여 튜닝을 수행하였다. ST3A 여자제어기의 블록 선도는 그림 3과 같다. 튜닝에 사용한 여자제어기의 경우 좋은 정상상태 성능을 유지하기 위하여 이득 K_A 는 고정된 것으로 가정하고, Lead-Lag 보상기의 두 파라미터 T_C 와 T_B 에 대하여 튜닝을 수행하였다. 본 사례 연구에 사용된 발전기와 여자제어기의 파라미터 및 운전 조건은 표 1과 표 8에 주어졌다.

표 8 운전 조건과 여자제어기 파라미터 (Case 5.3)
Table 8 Operating conditions and the parameters of the exciter (Case 5.3)

Operating Conditions					
P_t	Q_t	E_t	R_E	X_E	δ
0.15	0.06	1.0	0.158	0.673	7.2
Exciter parameters					
K_A	T_A	K_M	T_M	T_R	K_G
200.0	0.15	7.93	0.4	0.02	1.0
K_I	K_C	K_P	θ_P	$V_{I_{max}}$	$V_{I_{min}}$
0.0	0.2	6.15	0.0	-0.2	10.0
X_L	$V_{R_{max}}$	$V_{R_{min}}$	$V_{G_{max}}$	$V_{M_{max}}$	$V_{M_{min}}$
0.081	10.0	-10.0	5.8	1.0	0.0

표 9와 그림 7에서 볼 수 있듯이 튜닝된 파라미터에 의한 여자제어시스템의 응답 속도가 튜닝 전의 시스템 응답에 비해 상당히 향상된 것을 볼 수 있다. 본 사례 연구의 경우 튜닝에 사용된 파라미터가 2개로서 ST2A 여자제어기에 비



해 튜닝에 사용된 파라미터가 늘어나서 보다 나은 성능을 나타내는 파라미터 세트를 얻을 수 있다.

표 9 튜닝 전 . 후의 시간영역 성능지수 (Case 5.3)
Table 9 Time domain performance indices of both parameter set (Case 5.3)

Tuning Method	Parameter	Over shoot	Rise Time	Settling Time (5%)
Proposed Method	$T_C = 3.67$ $T_B = 21.7$	0.8 %	0.57 [sec]	0.77 [sec]
Analytical Method	$T_C = 1.8$ $T_B = 21.6$	4.3 %	1.0 [sec]	1.35 [sec]

5.4 중부하 조건에서의 Lead-Lag 방식 여자제어 시스템의 튜닝

본 사례 연구에서는 앞 절에서 사용된 ST3A 여자제어기를 사용하여 중부하 조건에서 튜닝을 수행하였다. 튜닝에 사용된 운전 조건은 표 10과 같다. 본 사례 연구에 사용된 시스템의 경우 발전기의 부하각이 62.6° 로서 목적함수에 사용할 위상여유의 가중치를 0.35로 선정하여 튜닝을 수행하였다. 튜닝 전.후의 파라미터와 구해진 파라미터의 시간영역 모의 결과를 표 11과 그림 8에 나타내었다.

표 10 운전 조건 (Case 5.4)
Table 10 Operating Conditions (Case 5.4)

Operating Conditions					
P_t	Q_t	E_t	R_E	X_E	δ
0.5	0.1	1.0	0.158	0.673	45.3°

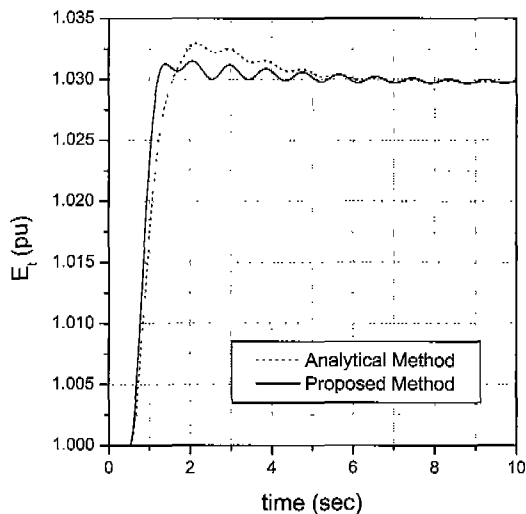


그림 8 시간 영역 모의 결과 (Case 5.4 - 3% step change in V_{ref})
Fig. 8 Time domain simulation results (Case 5.4 - 3% step change in V_{ref})

표 11 튜닝 전 . 후의 시간영역 성능지수 (Case 5.4)
Table 11 Time domain performance indices of both parameter set (Case 5.4)

Tuning Method	Parameter	Over shoot	Rise Time	Settling Time (5%)
Proposed Method	$T_C = 3.67$ $T_B = 21.7$	0.8 %	0.57 [sec]	0.77 [sec]
Analytical Method	$T_C = 1.8$ $T_B = 21.6$	4.3 %	1.0 [sec]	1.35 [sec]

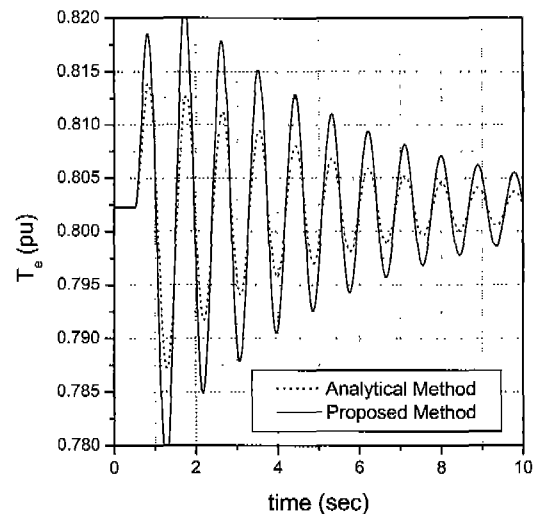
표 11과 그림 8에서 볼 수 있듯이 튜닝된 파라미터에 의한 발전기 단자 전압의 응답속도가 튜닝전에 비해 향상된 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 온라인 여자제어시스템 모델의 주파수 응답 특성과 SQP법을 이용하여 온라인 운전 조건에 최적화된 AVR의 제어 파라미터를 찾는 새로운 튜닝법을 제안하였다.

제안된 튜닝 방법은 발전기의 부하 조건 및 외부 계통의 구성 등 여자제어시스템의 온라인 운전 조건이 고려된 온라인 모델을 이용하여 튜닝을 수행하기 때문에, 실제 여자제어시스템의 운전 조건에 맞는 AVR의 파라미터를 얻을 수 있다. 또한 제안된 방법은 여자제어시스템의 과도안정도 마진 향상을 위해 응답속도를 향상시키도록 목적함수를 구성하고, 여자제어시스템의 안정적인 운전을 위한 최소한의 안정도 마진을 제약 조건으로 설정하여 파라미터 최적화 기법인 SQP법을 사용함으로써, 여자제어시스템이 온라인 운전 상태에서 안정적이면서 빠른 응답 속도를 나타내도록 하는 파라미터를 손쉽게 구할 수 있게 하였다.

다양한 운전 조건과 여자제어시스템을 사용하여 다양한



사례연구를 수행하고, 이를 통해 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] IEEE Std. 421.2-1990, IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems.
- [2] Rodolfo J. Koessler, "Techniques for tuning excitation system parameters," IEEE Trans. on Energy Conversion. vol. 3, No. 4, December 1988, pp.785-791.
- [3] 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, Jan/Feb 1977, pp.32-37.
- [4] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [5] IEEE Std. 421.5-1992, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
- [6] deMello, F. P., C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, Apr. 1969, pp. 316-329.
- [7] Matlab optimization toolbox users guide, MathWorks, Massachusetts, 1997.
- [8] M.J.D. Powell, A Fast Algorithm for Nonlinear Constrained Optimization Calculations, Numerical Analysis, ed. G.A. Watson, Lecture Notes in Mathematics, Springer Verlag, Vol. 630, 1978.
- [9] P. E. Gill, W. Murray, and M. H. Wright, Numerical Linear Algebra and Optimization, Vol. 1, Addison Wesley, 1991.
- [10] Seung-Il Moon, Kook-Hun Kim, Jong-Bo Ahn, Seog-Joo Kim, Jong-Moo Lee, So-Hyung Kim, Il-Do Yoo, Jung-mun Kim, Development of a new on-line Synchronous Generator Simulator using Personal Computer for Excitation System Studies, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, Aug. 1998, pp. 762-767.

저 자 소 개



김 중 문 (金 重 文)

1971년 11월 30일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 서울대학교 전기공학부 박사과정

Tel : 02-886-3101

Fax : 02-886-3102

E-mail : blueskim@powerlab.snu.ac.kr



문 승 일 (文 承 逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 미국 The Ohio State University 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년~1997년 전북대 전기공학과 교수. 1997년~2001년 서울대 전기공학부 조교수. 2001년~현재 서울대 전기공학부 부교수.

Tel : 02-880-1821

Fax : 02-883-0827

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr