

실시간 시뮬레이터를 이용한 AVR의 파라미터 튜닝에 관한 연구

論文
51A-2-4

A Study on an AVR Parameter Tuning Method using Real-Time Simulator

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

Abstract - AVR parameter tuning for voltage control of power system generators has generally been performed with the analytic methods and the simulation methods, which mostly depend on off-line linear mathematical models of excitation control system. However, due to the nonlinear nature of excitation control system, excitation control system performance of the tuned parameters using the above conventional tuning methods may not be appropriate for some operating conditions.

This paper presents an AVR parameter tuning method using actual on-line data of the excitation control system with the parameter optimization technique. As this method utilizes on-line operating data of the target excitation control system not the mathematical model of the system, it can overcome the limitation of model uncertainty problems in conventional method, and it can tune the AVR parameter set which gives desired performance at the operating conditions.

For the verification of proposed tuning method, two case studies with scaled excitation systems and the real-time power system simulator are presented.

Key Words : AVR, Excitation control system, Parameter tuning, Real-time simulator

1. 서 론

최근 경제적, 환경적인 요인 등으로 인하여 적절한 건설 부지 확보의 어려움 등으로 인하여 새로운 발전 설비 및 송전 설비의 추가 건설이 어려워져 발전 설비 및 송전 설비의 확충이 지연되고 발전소와 부하 사이의 전기적인 거리가 멀어지고 있는 상황이다. 하지만 이에 반해 계통의 전력 수요는 꾸준히 증가하고 있기 때문에, 증가하는 전력 수요와 부족한 발전 및 송전 설비로 인해 기존의 전력 설비는 보다 높은 동작점에서 운전하게 되고, 이로 인해 신뢰성 있는 전력 공급을 위해 필요한 계통의 안정도 마진이 부족해지는 실정이다.

발전기 여자제어기의 AVR(Automatic Voltage Regulator)은 여자제어시스템(Excitation Control System[1])과 전력 계통의 동적 특성 및 안정도에 많은 영향을 미치는 장치로써, AVR의 제어 파라미터를 계통의 상황에 맞게 튜닝 함으로써 계통의 안정도 마진을 향상시킬 수 있다. 이제까지는 이러한 AVR의 파라미터를 튜닝하는데, 특정 동작점에서 구해진 여자제어시스템의 수학적 선형 모델과 그 주파수 응답

특성을 이용하여 발전기 터미널 전압의 응답이 안정적인 제동 특성을 가지도록 튜닝하거나, 여자제어시스템의 응답이 원하는 응답을 보일 때까지 오프라인 시뮬레이션을 반복하는 방법이 사용되었다[1,2,3,4]. 여자제어시스템의 수학적인 등가 모델을 이용한 튜닝법은 기존의 다양한 이론을 이용하여 편리하고 경제적으로 여자제어기의 파라미터를 튜닝할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 이 방법을 통해 얻어진 파라미터의 신뢰도가 튜닝에 사용된 여자제어시스템의 수학적 모델이 실제 여자제어시스템의 동적 특성에 얼마나 근접하는지의 정확성에 의해 결정되는 문제점이 있다. 일반적으로 AVR의 동작 환경은 발전기의 부하 조건 및 전송 선로의 임피던스 등과 같은 계통 운전 조건에 따라 큰 차이를 보이고, 대부분의 여자기들이 전력전자 스위칭 소자나 리미터(Limiter) 및 디지털 제어기와 같이 복잡한 비선형 소자들로 이루어져 있기 때문에 실제 여자제어시스템의 동특성과 유사한 동적 모델을 얻기가 매우 힘들다. 따라서 수학적인 등가 모델을 이용한 튜닝법은 모델의 부정확성으로 인해 실제 계통 상황에 최적화된 파라미터를 얻기 쉽지 않다.

본 논문에서는 여자제어기 모델의 부정확성으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 실제 여자제어기의 운전 데이터를 직접 이용하여 AVR의 제어 파라미터를 튜닝하는 방법에 대하여 제안하였다. 튜닝하고자 하는 여자제어기는 실시간 전력계통 시뮬레이터와 연결되어 다양한 운전 조건 및 외란에 대하여 운전되고, 파라미터 최적화 기법을 이용하여 여자제어기의 실제 운전 데이터가 원하는 응답 특성에 최적화되도록 하는 AVR의 제어 파라미터를 튜닝하였다. 제안한

* 正會員 : 서울大 工大 電氣工學部 博士課程

** 正會員 : 서울大 工大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 9日

最終完了 : 2002年 1月 2日

튜닝 방법은 여자제어시스템의 실제 운전 데이터를 이용하여 AVR의 제어 파라미터를 튜닝함으로써 모델의 부정확성으로 인한 문제점을 피할 수 있고, 실시간 전력계통 시뮬레이터를 이용함으로써 안정도 문제 등으로 인해 실제 계통에서 시험할 수 없었던 다양한 외란에 대한 여자제어시스템의 응답을 고려하여 튜닝을 수행할 수 있다 [5]. 또한, 파라미터 최적화 기법을 사용함으로써, 튜닝과정에서 원하는 응답 특성을 갖도록 선정된 기준 신호에 근접한 응답을 나타내는 최적 파라미터 값을 구하기 위한 노력을 최소화하였다. 본 논문에서는 제안된 튜닝 방법의 성능을 시험하기 위하여 실제의 여자제어기 대신 PC에 구현된 축소 모형 여자제어기를 사용하여 다양한 사례연구를 수행하고, 이를 통하여 제안된 튜닝 방법의 성능을 검증하였다.

2. 안정도 마진 향상을 위한 기준 신호의 선정

AVR 및 여자제어기의 성능은 전력 시스템의 과도 안정도 및 소신호 안정도에 많은 영향을 미치기 때문에, AVR의 제어 파라미터를 튜닝할 때에는 이 두 가지 안정도 마진을 동시에 고려하여 튜닝을 수행해야 한다. 전력 시스템의 과도 안정도의 경우 고성능의 보호계전기 설치로 인한 빠른 사고 제거, 전력 전송 선로의 추가 건설에 의한 전송 선로의 리액턴스 감소, 병렬 보상기 설치, 고속의 터빈 벨브 설치 및 고속의 여자제어기 설치 등의 다양한 방법에 의해서 향상될 수 있는데, 일반적으로 여자제어기의 튜닝을 통해 여자제어기의 성능을 향상시키는 방법이 추가 장치의 도입 및 교체가 필요 없기 때문에 다른 방법들에 비해 보다 경제적이고 효과적인 방법이다 [7]. 하지만 발전기가 큰 출력력을 내고 외부 전력 선로의 임피던스가 큰 경우와 같은 운전 조건에서 과도 안정도 마진을 향상시키기 위해서 빠른 응답속도를 갖도록 튜닝된 여자제어기는 전력 시스템의 램핑 토크의 부족을 야기 시켜 이로 인해 소신호 안정도 문제를 일으키게 된다 [6,7]. 따라서 전력 시스템의 램핑 토크가 부족한 상황에서는 여자제어기의 응답 속도를 다소 느리게 튜닝하거나 PSS(Power System Stabilizer)를 설치하여 부족한 램핑 토크를 보상해야 한다 [1,6,7]. 일반적으로 과도 안정도 마진과 소신호 안정도 마진을 동시에 향상시키기 위한 가장 효과적인 방법은 빠른 응답 속도를 갖는 여자제어기와 충분한 램핑을 제공하는 PSS를 동시에 사용하는 것이지만, 아직 많은 수의 발전기가 PSS 없이 여자제어기만을 사용하여 전압을 제어하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 PSS가 설치된 경우와 설치되지 않은 두 가지 경우에 과도 안정도와 소신호 안정도를 동시에 고려한 여자제어기의 튜닝 방법을 사례 연구에서 보였다.

본 논문에서는 AVR의 기준 입력 V_{ref} 의 스텝 변화에 대한 발전기의 터미널 전압 E_t 의 응답을 사용하여 AVR의 제어 파라미터 튜닝을 수행하였는데, 이는 여자제어기와 AVR이 발전기의 터미널 전압을 제어하기 위하여 설치된 제어 장치이므로, 발전기 터미널 전압의 변화가 AVR의 성능과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문이다. AVR의 기준 입력 V_{ref} 의 스텝 변화에 대한 발전기 터미널 전압의 일반적인

시간영역 응답은 아래의 그림 1과 같다. 일반적으로 제어 시스템의 성능은 상승시간(rise time), 오버슈트(overshoot), 정착시간(settling time)등과 같은 시간영역 성능 지수들에 의해 특정 지울 수 있다 [1]. 따라서 여자제어시스템의 운전 조건을 고려하여 충분한 안정도 마진을 갖도록 위의 성능 지수들을 선정하고, 선정된 시간영역 성능 지수와 2차 시스템의 전달함수와의 관계를 이용하여 기준 응답을 구하고, 구해진 기준 응답에 실제 여자제어시스템의 측정된 응답이 근사해 지도록 여자제어기의 파라미터를 튜닝 함으로써 주어진 운전 조건에서 충분한 안정도 마진을 갖는 여자제어기의 제어 파라미터를 얻을 수 있다.

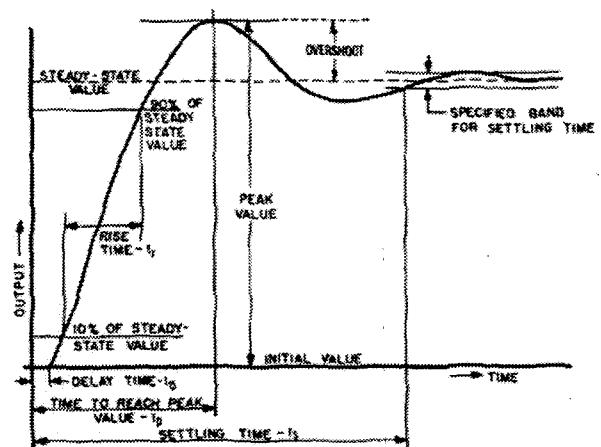


그림 1 피드백 제어 시스템의 전형적인 스텝 응답 [1]

Fig. 1 Typical Transient Response of a Feedback Control System to a Step Change in Input

여자제어시스템의 과도 안정도 마진과 소신호 안정도 마진을 충분히 공급하기 위한 여자제어시스템의 최상의 응답은 가능한 작은 상승시간을 갖도록 하여 과도 안정도 마진을 향상시키고, 작은 오버슈트와 빠른 정착시간을 갖도록 하여 소신호 안정도 마진을 향상시키는 것이다. 따라서 충분한 과도 안정도 및 소신호 안정도 마진을 갖는 여자제어시스템의 파라미터 튜닝을 위해서는 이상의 조건을 만족하는 기준 신호를 선정하여 튜닝하고자 하는 여자제어시스템의 응답이 이에 근사해 지도록 파라미터를 튜닝해야 한다. 하지만 실제 여자제어시스템의 경우 하나의 응답특성을 향상시키기 위한 파라미터 튜닝이 다른 응답특성을 감소시키는 등 다양한 응답 특성을 동시에 만족시키는 파라미터를 구하는 것이 현실적으로 어렵다. 따라서 튜닝에 사용하는 기준 신호는 이와 같은 점을 고려하여 시스템의 특성과 튜닝 목적에 맞는 타협점에서 선정하여야 한다. 특히 과도 안정도 마진의 향상을 위해서 AVR을 튜닝하기 위해서는 매우 빠른 상승 시간을 갖는 기준 신호가 필요한데, 이처럼 기준 신호의 상승 시간이 과도하게 빠르게 설정될 경우 실제 대상 시스템의 응답속도가 이를 추종하지 못하기 때문에 원하는 튜닝 결과를 얻기가 힘들다. 따라서, 이러한 문제점을 피하기 위해 튜닝 대상 여자제어시스템의 속응 능력을 다양한

시뮬레이션에 의한 사전 조사를 통해 조사하고 이를 토대로 기준 신호의 상승 시간을 선정하였다. 아울러 기준 신호의 오버슈트는 가능한 작은 값으로 선정하여 기준 신호의 시간 영역 응답이 과제동 응답을 보이도록 선정할 경우, 대상 시스템의 느린 정착시간과 오버슈트에 의한 에러를 증가시키므로 대상 시스템의 오버슈트와 정착시간을 줄이는 방향으로 튜닝이 수행되게 된다. 따라서, 기준 신호의 오버슈트는 가능한 작은 값으로 선정하는 것이 바람직하다.

목적 함수에 사용된 기준 신호의 계산에 사용될 시간영역 성능 지수의 선정법을 정리하면 다음과 같다.

- a) 기준 신호의 rise time의 경우 대상 시스템의 속응 능력의 한계내에서 시스템의 운전조건에 맞도록 선정
- b) 기준 신호의 overshoot의 경우 가능한 작은 값으로 선정하여 기준신호 응답이 과제동 응답을 보이도록 선정

3. 최적화 기법

본 논문에서는 여자제어시스템의 안정도 마진을 향상시키기 위하여 비선형 파라미터 최적화 기법을 사용하였다. 즉, 안정도 마진 향상을 위해 계통의 운전 조건에 맞도록 선정된 기준 신호와 튜닝하고자 하는 여자제어시스템의 측정된 운전 데이터 사이의 오차를 최소화하는 여자제어기의 파라미터를 찾음으로서 구해진 파라미터가 원하는 응답 특성에 가까워지도록 하였다. 즉, 튜닝의 중간 과정에서 얻어진 파라미터를 이용하여 대상 여자제어기와 실시간 전력계통 시뮬레이터를 이용하여 모의한 여자제어시스템의 측정 응답과 기준 응답과의 차이를 아래의 식 (1)과 같이 정의하고, 이를 목적함수로 하는 파라미터 최적화 기법을 사용함으로써 기준 응답과 여자제어시스템의 응답 사이의 차가 최소화되는 AVR의 제어 파라미터를 계산하였다.

$$\chi^2 = \Sigma(E_{t,ref} - E_{t,msr})^2 \quad (1)$$

여기서, $E_{t,ref}$ 는 안정도 마진을 향상시키기 위하여 선정된 기준 신호이고, $E_{t,msr}$ 는 튜닝 과정에서 얻어진 파라미터에 의한 여자제어시스템의 운전 데이터를 측정한 신호이다. 이 때 튜닝 과정에서 얻어진 파라미터가, 발전기의 무부하 개방운전 동안에 안정도 문제를 일으키는지를 판별하기 위하여 무부하 개방회로의 주파수 영역 응답 특성을 이용하여 그 위상 여유와 이득 여유를 계산하여 안정도를 판별하였다.

위의 목적 함수에서 여자제어기의 튜닝을 위한 목적 함수에 발전기의 터미널 전압 E_t 의 응답만을 고려하였는데, 이는 일반적으로 발전기 터미널 전압의 변화가 여자제어기의 성능과 가장 밀접한 관계를 갖기 때문이다. 하지만 목적 함수는 발전기 터미널 전압의 변화 외에 다양한 여자제어시스템의 응답을 필요에 따라 추가할 수 있다.

본 논문에서는 Marquardt 방법을 사용한 비선형 파라미터 최적화 방법을 사용하여 목적함수를 최소화하는 최적의 파라미터를 계산하였다. 이 방법은 목적함수 χ^2 가 최적 파라미터 근처에서는 포물선에 가까워지기 때문에 quadratic

method가 보다 효율적이고, 최적 파라미터에서 멀리 떨어진 곳에서는 quadratic method에 의한 step size가 너무 작기 때문에 gradient를 사용한 steepest descent method가 보다 효율적인 특징을 이용한 방법이다 [8].

Marquardt method를 이용하여 계산된 다음 단계의 새로운 파라미터는 아래와 같다.

$$\vec{a}_{\min} = \vec{a}_0 + \delta \vec{a} \quad (2)$$

위 식에서 \vec{a}_0 는 현 상태의 파라미터이고, $\delta \vec{a}$ 는 탐색 방향을 나타낸다.

최적 파라미터 근방의 quadratic approximation 상태에서의 탐색 방향은 아래의 식 (3)에 의해서 계산되고, steepest descent method 상태에서의 탐색 방향은 아래의 식 (4)에 의해서 계산된다.

$$\delta \vec{a} = -H^{-1} \nabla_a \chi(\vec{a}_0)^2 \quad (3)$$

$$\delta \vec{a} = -\kappa \nabla_a \chi(\vec{a}_0)^2 \quad (4)$$

위 식에서 H 는 Hessian matrix를 나타내고, κ 는 undetermined proportionality constant, ∇_a 는 파라미터 \vec{a} 에 대한 그라디언트를 나타낸다. quadratic approximation method와 steepest descent method의 특징을 결합하기 위하여 Hessian matrix는 아래의 식 (5)와 같이 계산되고, 수정된 Hessian matrix와 식 (3)을 이용하여 탐색 방향을 계산하게 된다.

$$H_{\text{mod}} = H_{\text{org}} \cdot I(1 + \kappa) \quad (5)$$

본 논문에서 사용된 최적화 방법을 이용한 튜닝법의 절차를 정리하면 아래와 같다.

Step 1. 원하는 안정도 마진 요구에 맞는 기준 신호를 선정. 파라미터 최적화 루틴의 시작 파라미터 초기화

Step 2. 현재의 파라미터를 사용하여 여자제어시스템의 응답 측정

목적함수 χ^2 계산

Step 3. 탐색 방향(search direction) $\delta \vec{a}$ 와 탐색 방향을 고려한 파라미터에 의한 응답과 목적함수 $\chi^2(\vec{a}_0 + \delta \vec{a})$ 계산

Step 4. 만약 파라미터 최적화 루틴으로부터 구해진 새로운 파라미터에 의한 목적함수 χ^2 가 증가할 경우, 현재의 파라미터가 최적해에서 멀리 떨어져 있음을 의미하므로, κ 에 10을 곱하여 steepest descent factor를 증가시키고, 파라미터를 업데이트하지 않는다.

만약 새로운 파라미터에 의한 목적함수 χ^2 가 감소할 경우, 현재의 파라미터가 최적해 근처의 quadratic region에 있는 것이므로 κ 를 10으로 나누고, 파라미터를 새로 구해진 파라미터로 업데이트 한다.

만약 이때 무부하 개방회로 모델의 위상 여유나 이득 여유가 안정도 마진을 넘어갈 경우 무부하 개방운전시의 안정도 확보를 위하여 파라미터를 업데이트 하지 않는다.

Step 5. 목적함수 χ^2 가 허용치 이하이거나, χ^2 의 변화량이 기준치 이하일 경우 튜닝을 마치고, 그렇지 않을 경우 Step 2부터 반복한다.

marquardt method에 관한 자세한 설명은 참고문헌 8에서 찾을 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 튜닝에 사용된 시스템

제안된 튜닝 방법의 성능 검증을 위하여 사례연구에 사용한 실시간 전력계통 시뮬레이터와 축소 모형 여자제어기로 구성된 시스템의 구성도를 아래의 그림 2에 나타내었다. 실시간 전력계통 시뮬레이터는 아래의 그림 2와 같이 동기발전기가 변압기와 병렬 전송 선로를 통해 무한모선에 연결되고 전송 선로 양단에 두 개의 부하가 연결된 구조를 갖는 전력 시스템의 동적 특성을 실시간으로 모의하고, A/D 컨버터 및 D/A 컨버터를 통해서 튜닝하고자 하는 여자제어기와 연결할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 튜닝 방법의 성능을 검증하기 위하여 실제의 여자제어기 대신 실제의 여자제어기와 유사한 동작을 하도록 PC에 구현된 축소 모형 여자제어기를 사용하였다.

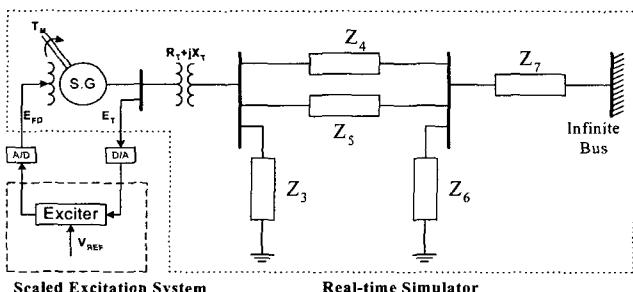


그림 2 실시간 전력계통 시뮬레이터와 축소모형 여자제어기로 구성된 시스템

Fig. 2 System Block Diagram consist of Real-Time Power-System Simulator and Scaled Model of Excitation System

본 논문에서는 제안된 튜닝 방법의 성능을 검증하기 위하여 다양한 여자기 모델 및 운전 조건에 대하여 사례 연구를 수행하고, 그 중 두 가지 경우의 사례 연구 결과를 나타내었다. 그림 3, 그림 4는 본 논문에 제시된 사례 연구에 사용된 IEEE ST4B 여자제어기 모델과 IEEE PSS1A PSS(Power System Stabilizer)의 블록선도를 나타낸 것이다. 각각의 여자제어기 모델은 상태방정식 형태로 변환된 후 PC에 그 가능이 구현되었으며, A/D 컨버터를 통해 실시간 시뮬레이터로부터 발전기의 터미널 전압 E_t 와 전류 I_t 등 필요한 신

호를 입력받고, D/A 컨버터를 통해 실시간 시뮬레이터로 여자 전압 E_{FD} 를 출력한다.

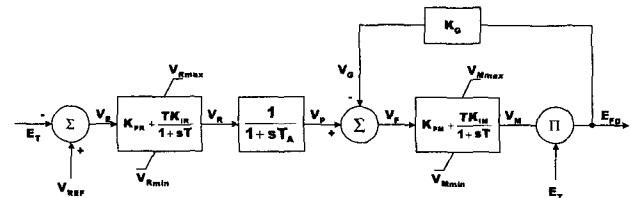


그림 3 IEEE type ST4B 비례적분기형 여자기

Fig. 3 IEEE type ST4B PI type Exciter

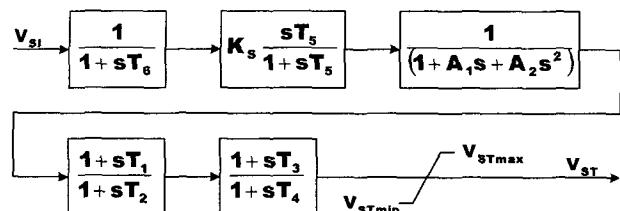


그림 4 IEEE type PSS1A PSS

Fig. 4 IEEE type PSS1A PSS

4.2 PSS가 설치된 여자제어시스템의 과도 안정도 향상을 위한 튜닝

본 절에서는 IEEE type PSS1A가 부가장치로 설치된 PI(Proportional-Integral) 제어기와 3상 four-quadrant converter를 사용한 IEEE ST4B PI type 여자제어기에 대하여 과도 안정도를 향상시키기 위하여 빠른 응답 속도와 정착시간 및 작은 오버슈트를 갖도록 AVR의 제어 파라미터를 튜닝하는 연구를 수행하였다. 튜닝에 사용된 여자제어기와 PSS의 모델은 각각 그림 3 및 그림 4와 같다 [5]. 튜닝에 사용된 ST4B 여자제어기는 여자제어기 및 발전기의 보호를 위해 UEL(Under Excitation Limiter)과 같은 리미터 회로가 존재하고, 컨버터의 동작 특징에 의해 여자제어기의 출력이 발전기 터미널 전압과의 합에 의해 결정되는 등 많은 비선형성을 포함하기 때문에, 기존의 수학적 선형 모델을 이용한 파라미터 튜닝법을 적용하기가 쉽지 않다.

튜닝에 사용된 발전기 파라미터, 계통 운전 조건 및 여자제어기와 PSS의 파라미터는 각각 부록에 있는 표 1, 표 2, 표 3 및 표 4와 같다. 본 사례 연구에 사용된 여자제어시스템의 경우 충분한 뎁핑 토크를 공급하기 위하여 PSS가 설치되어 있다. 적절하게 튜닝된 PSS는 빠른 응답을 나타내도록 튜닝된 AVR에 의해 부족해지는 뎁핑 토크를 보상하여 충분한 소신호 안정도 마진을 제공하기 때문에, 본 절에서는 과도 안정도 마진을 향상시키기 위하여 AVR의 동작 속도를 빠르게 설정하는데 초점을 맞춰서 튜닝을 수행하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 여자제어기의 초기 파라미터는 $K_{PR} = 4.0$, $K_{IR} = 2.0$ 이고, 제안된 튜닝 방법을 통해 구해진 파라미터는 $K_{PR} = 6.86$, $K_{IR} = 1.00$ 다. 초기 파라

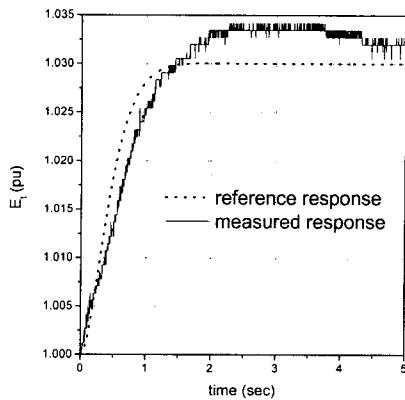


그림 5 시스템의 스텝 응답 - 튜닝 전

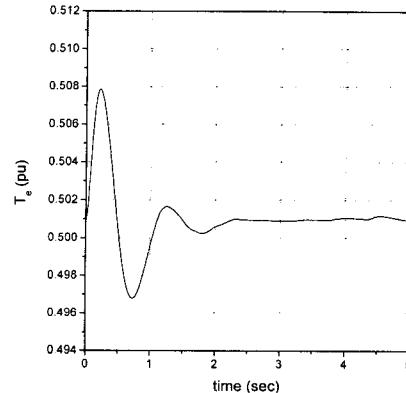


Fig. 5 Step Response of the System - Before Tuning

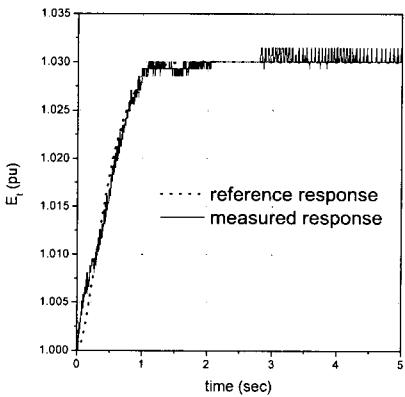


그림 6 시스템의 스텝 응답 - 튜닝 후

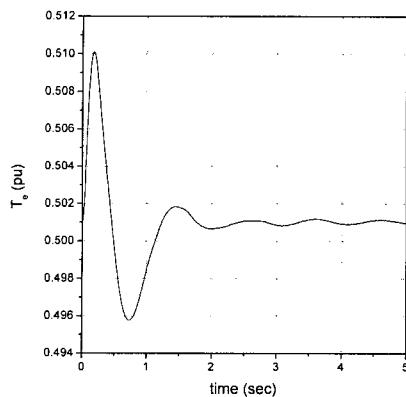


Fig. 6 Step Response of the System - After Tuning

미터와 튜닝된 파라미터에 대해 여자제어기 AVR의 기준 전압 V_{ref} 를 3% 스텝 증가시켰을 경우의 여자제어시스템의 응답을 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 본 여자제어기의 초기 파라미터에 의한 응답의 경우 PSS의 영향으로 좋은 제동 효과를 보이지만 느린 상승시간과 정착시간 및 오버슈트 등 비교적 느린 응답을 보임을 알 수 있다. 따라서 여자제어시스템의 응답 속도를 향상시키고 오버슈트를 저감하기 위한 튜닝을 수행하였다. 튜닝에 앞선 사전 테스트 결과 기준 응답의 상승시간을 0.7초 미만으로 설정할 경우 현실적으로 불가능한 과도한 상승시간을 맞추기 위하여 튜닝 목적에 어긋나는 잘 못된 파라미터를 얻게 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 과도한 응답 속도로 인한 잘못된 튜닝을 피하면서 가능한 빠른 응답 속도를 얻기 위하여 기준 응답의 상승시간을 0.7초로 선정하여 튜닝을 수행하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 제안된 튜닝 방법에 의해 튜닝된 파라미터에 의한 발전기 터미널 전압의 동적 응답 특성이 기준 응답의 응답 특성과 거의 일치하는 응답을 보임을 확인할 수 있다. 즉, 튜닝된 시스템의 응답속도가 튜닝 전에 비해 향상되고, 정착시간과 오버슈트의 응답도 눈에 띄게 향상된 것을 볼 수 있다. 전기적 토크 응답의 경우에는 빨라진 여자제어시스템의 응답에 의해 첫 번째 스윙의 폭은 다소 커졌지만 PSS의 동작에 의

해 충분히 좋은 제동 효과를 보이는 것을 볼 수 있다.

4.3 PSS가 설치되지 않은 여자제어시스템의 소신호 안정도 향상을 위한 튜닝

본 절에서는 앞 절에서 튜닝에 사용된 동일한 여자제어기에 대하여 소신호 안정도 문제가 없어서 PSS가 설치되지 않고 운전하던 중, 그 운전 조건이 변해서 소신호 안정도 문제가 발생한 경우에 대하여 소신호 안정도 문제를 해결하기 위한 튜닝을 수행하였다. 튜닝에 사용된 시스템의 운전 조건 및 파라미터 값들은 부록에 있는 표 1, 표 2 및 표 5와 같다. 표 5에서 볼 수 있듯이 튜닝에 사용된 시스템은 발전기의 출력이 $P_t = 0.85$ [pu], $Q_t = 0.65$ [pu]로 발전기가 매우 큰 출력을 내고 있고, 외부 전송 선로의 테브난 등과 임피던스가 $R_E = 0.18$ [pu], $X_E = 0.68$ [pu]로 비교적 약한 전송 선로를 통해 외부 계통에 연결되어 있어서, 시스템의 래핑 토크가 매우 부족하여 소신호 안정도 문제가 있는 시스템이다. 본 시스템에는 시스템의 래핑 부족을 보상하기 위한 PSS가 설치되지 않았기 때문에, 래핑 토크의 부족을 보상하기 위하여 어느 정도의 과도안정도 마진을 회생하여 소신호 안정도 마진을 향상시키기 위한 튜닝을 수행하였다. 물론 시스템의 래핑 토크가 부족하여 소신호 안정

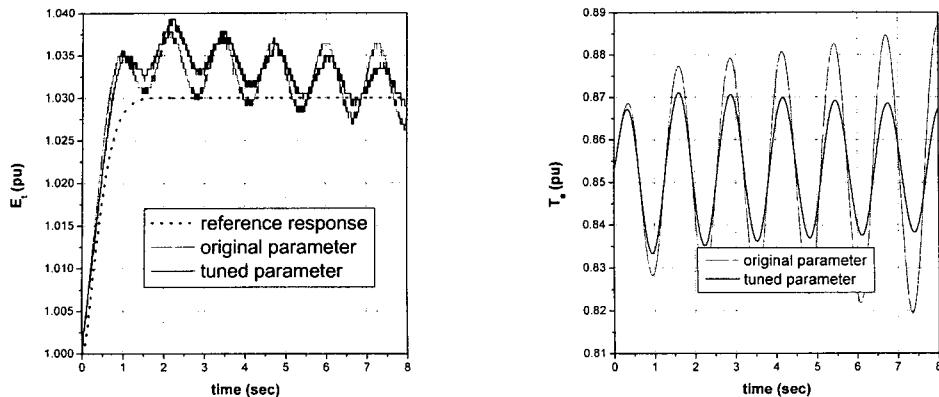


그림 7 시스템의 스텝 응답 - 투닝 전 . 후
Fig. 7 Step Response of the System - Before and After Tuning

도 문제가 발생할 경우에 이를 해결하기 위한 가장 좋은 방법은 PSS를 여자제어기의 부가 장치로 설치하는 것이지만, PSS의 설치가 여의치 않은 시스템이나, 아직 PSS가 설치되지 않은 경우에 PSS를 설치할 때까지 운전을 해야 하는 경우, 다소의 과도 안정도 마진을 희생해서 소신호 안정도 마진을 확보하는 것이 안정적인 전력 공급을 위해 바람직하다.

본 사례연구에서 사용한 여자제어기의 초기 파라미터는 $K_{PR} = 6.86$, $K_{IR} = 1.0$ 으로 앞 절에서 투닝된 값을 사용하였고, 제안된 투닝 방법을 통해 구해진 파라미터는 $K_{PR} = 4.56$, $K_{IR} = 1.06$ 다. 초기 파라미터와 투닝된 파라미터에 대해 여자제어기 AVR의 기준 전압 V_{ref} 를 3% 스텝 증가시켰을 경우의 여자제어시스템의 응답을 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 투닝 전 파라미터에 의한 응답의 경우 시스템의 램핑 토크가 부족하여 전기적 토크 T_e 의 응답이 점차 발산하는 것을 볼 수 있다. 이는 여자제어시스템의 응답 속도가 계통의 운전 조건에 비해 너무 빠른 응답을 내도록 설정되어 있어서 시스템의 램핑 토크가 부족해졌기 때문인데, 이를 해결하기 위해서는 여자제어기의 응답 속도를 줄여서 부족한 램핑 토크를 보상해야 한다. 따라서 여자제어기의 응답 속도를 줄이기 위하여 기준 응답의 상승 시간을 투닝 전 시스템의 응답 속도인 0.51초보다 큰 0.75초로 선정하여 투닝을 수행하였다. 그림 7을 보면 투닝된 파라미터에 의한 시스템의 전기적 토크의 응답이 투닝 전에 점차 발산하던 것에 비해 투닝 후에는 발산하지 않고 감쇄하는 특성을 보이는 것을 볼 수 있다. 발전기 터미널 전압의 경우 투닝 후의 응답이 투닝 전에 비해 다소 오버슈트는 증가하였지만 전기적 토크의 감쇄 특성에 의해 감쇄 특성을 보이면서 보다 빨리 정상상태 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 여자제어시스템의 수학적 등가 모델을 이용하는 기준의 투닝법의 문제점인 모델의 부정확성을 해결하기

위하여 실제 여자제어기의 온라인 운전 데이터와 파라미터 최적화 기법을 이용하여 AVR의 제어 파라미터를 투닝하는 방법에 대하여 제안하였다. 제안된 방법은 투닝하고자 하는 대상 여자기의 시간 영역 운전 데이터를 이용하여 투닝을 수행하기 때문에, 여자제어시스템의 수학적인 선형 모델을 이용하여 투닝하는 기준의 투닝 방법의 문제점인 모델의 부정확성으로 인한 문제점을 피할 수 있고, 대상 여자제어시스템이 동작하는 환경과 동일한 다양한 운전 조건과 외관에 대하여 파라미터 투닝을 수행 할 수 있다. 즉, 여자제어시스템의 운전 상황을 고려하여 선정된 기준 신호와 실제 여자제어시스템의 운전 데이터와의 오차를 최소화하는 파라미터를 계산함으로써, 여자제어시스템의 실제 운전 상황에서 원하는 응답에 가까운 응답 특성을 나타내는 최적의 파라미터를 얻을 수 있다. 또한, 자동으로 최적의 파라미터를 계산하는 파라미터 최적화 기법을 사용함으로써 최적의 파라미터를 찾기 위한 노력을 최소화하였다.

본 논문에서는 PC에 구현된 축소 모형 여자제어기와 실시간 전력계통 시뮬레이터를 사용하여 제안된 방법의 성능과 적용 가능성을 보였다. 다양한 계통 조건 및 여자제어기 모델에 대하여 다양한 사례 연구를 수행할 결과, 제안된 투닝 방법은 여자제어시스템의 수학적 모델이 아닌 실제의 운전 데이터를 이용하여 투닝을 수행하기 때문에, 여자제어기 모델의 종류와 PSS등 부가 장치의 존재 유무 등의 여자제어시스템의 구조에 관계없이 적용할 수 있음을 확인하였다.

6. 부 록

표 1 발전기 파라미터

Table 1 Parameters of the Generator

T_{do}'	T_{do}''	T_{q0}'	T_{q0}''	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

표 2 ST4B 여자제어기의 파라미터**Table 2 Parameters of the ST4B Excitation System**

K_{PR}	K_{IR}	K_{PM}	K_{IM}	K_G
4.0	2.0	3.0	0.0	0.0
T_A	$V_{R_{MAX}}$	$V_{R_{MIN}}$	$V_{M_{MAX}}$	$V_{M_{MIN}}$
0.016	1.5	-1.5	10.0	-10.0

표 3 PSS1A PSS의 파라미터**Table 3 Parameters of the PSS1A PSS**

K_S	A_1	A_2	$V_{S_{MAX}}$	$V_{S_{MIN}}$	
5.0	0.198	1.728	0.45	0.09	
T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
0.05	1.0	0.05	3.5	1.8	0.27

표 4 4-2절의 운전 조건**Table 4 Operating Conditions of the Section 4-2**

P_t	Q_t	E_t	R_E	X_E
0.5	0.3	1.0	0.28	0.68

표 5 4-3절의 운전 조건**Table 5 Operating Conditions of the Section 4-3**

P_t	Q_t	E_t	R_E	X_E
0.85	0.64	1.0	0.28	0.68

참 고 문 헌

- [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] Yuan-Yih Hsu, Chuan-Sheng Liu, Tain-Syh Luor, Chung-Liang Chang and Ah-Shing Liu, "Experience with the identification and tuning of excitation system parameters at the second nuclear power plant of Taiwan Power Company," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp.747-753.
- [5] Seung-Ill Moon, Kook-Hun Kim, Jong-Bo Ahn, Seog-Joo Kim, Jong-Moo Lee, So-Hyung Kim, Il-Do Yoo and 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.

- [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] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [8] G. J. Borse, Numerical Methods with MATLAB, PWS Publishing Company, Boston, 1997.
- [9] G. F. Franklin, J. D. Powell and Abbas Emami-Naeini, Feedback control of dynamic systems, Addison-Wesley, Massachusetts, 1995.
- [10] P. Kundur, "Effective Use of Power System Stabilizers for Enhancement of Power System Reliability," 1999 IEEE PES Summer Meeting, pp. 96-103.

저 자 소 개**김 종 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(공박). 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