

운전데이터를 이용한 발전기 여자시스템 모델링에 관한 연구

이주현, 류호선, 신만수, 임익현
한국전력공사 전력연구원

A Study of Generator Excitation Control System Modeling using Operating Data

Joo-Hyun Lee, Ho-Sun Rhew, Man-Su Shin, Ick-Hun Lim
KEPCO Research Institute

Abstract - 발전기 여자시스템(Excitation System)은 동기발전기의 계자권선에 직류전류를 공급하고 계자전압을 조정하여 발전기의 전압 및 계통의 무효전력을 제어하는 기능을 수행한다. 본 논문에서는 발전기 여자시스템의 모델링 기법과 현장 운전데이터를 이용한 여자시스템의 모델링 결과들을 기술하였다.

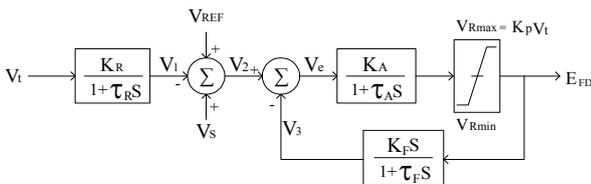
1. 서 론

최근 전력시장의 경쟁체제로 전환되면서 경쟁력 강화를 위한 전력설비의 안정적 운전이 무엇보다 중요시 되고 있다. 발전기 여자시스템은 동기발전기의 계자권선에 직류전류를 공급하여 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 만족스러운 성능구현에 필수적인 제어기능과 보호기능을 수행하는 것으로 발전소에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 화력 및 원자력발전소에서 발전기 여자시스템의 고장 발생 시 안정적인 전력공급의 차질은 물론 커다란 경제적인 손실이 발생하게 된다. 최근 컴퓨터 및 IT기술의 발달에 힘입어 한전 전력연구원에서는 최신 TMR (Triple Modular Redundancy) 기술을 적용한 고 신뢰성의 디지털 다중화 여자시스템을 개발하고, 발전소에 실증 적용하였다. 하드웨어는 Fault Tolerant 제어를 사용하고, 입출력 신호처리시스템과 정류기는 다중화로 설계하여 시스템의 신뢰성을 높였다. 소프트웨어는 IEC 61131의 국제규격을 준용한 기능 블록 형태로 발전기 여자시스템의 제어, 제한 및 보호기능 수행에 필요한 제어알고리즘을 개발하여 제어프로그램을 구현하였다[1]. 본 논문에서는 발전기 여자시스템의 모델링 기법과 발전소 현장 운전데이터를 이용한 모델링 결과들을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 발전기 여자시스템 모델

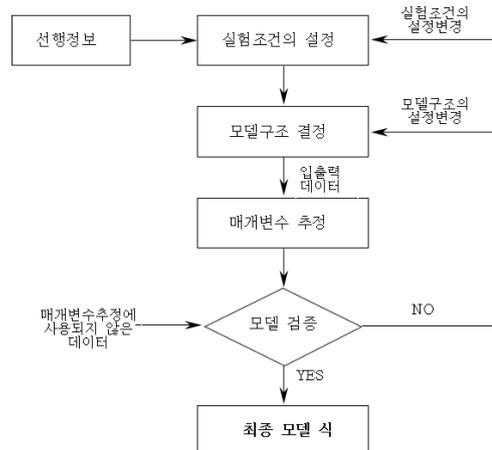
동기발전기 여자시스템의 수학적 모델링을 하는 목적은 여자시스템이 제어 기능과 제한 및 보호 회로들의 상호협조 등을 통해 희망하는 성능이 나오는가를 검증하고 평가하기 위한 것이다. 일반적으로 전압조정장치가 여자의 특성을 주관하지만 여자공급 전력원의 비선형 특성이 종종 전체 시스템의 동특성을 결정하는데 더 큰 영향을 주는 경우가 있다. 본 논문에서 인용된 여자시스템의 모델은 IEEE type ST1A의 정지형 여자시스템 모델이다. 정지형 여자시스템 모델은 발전기 출력 단에 연결된 여자변압기로 여자 전원을 확보하고 이를 싸이리스터 위상제어 정류기로 정류해서 발전기 계자에 공급한다. 교류 여자시스템과 다르게 정지형 여자시스템은 시간지연이 거의 없는 특징을 가지고 있다. 아래의 <그림 1>은 정지형 여자시스템의 모델을 나타낸다 [1][2].



<그림 1> 정지형 여자시스템 모델

2.2 모델링 기법

플랜트를 모델링하는 방법에는 보통 두가지 방법으로 나눌 수 있는데 한 가지는 물리법칙으로부터 플랜트의 동특성을 표현하는 해석적인 방법이고, 다른 한가지는 플랜트에서 추출한 실험적 데이터로부터 플랜트의 적절한 매개변수들을 구해내는 실험적인 방법이다. 실험적인 방법으로 플랜트를 모델링하고자 할 때는 플랜트에 대한 선행정보 등을 이용하여 적합한 여러 가지 실험조건들을 구하여야 한다. 위와 같은 실험조건들이 주어진 플랜트의 특성에 부적합하게 결정되었을 경우에는 실험 시 여러 가지 문제점들이 발생하게 되어 플랜트로부터 제대로 데이터를 추출할 수 없거나 플랜트를 모델링하기에 충분하지 못한 데이터를 얻게 된다. 실험조건들이 구해지면 실제 실험을 통해 얻어낸 실험 데이터와 플랜트에 대한 선행정보 등으로 플랜트의 구조를 결정하고 매개변수들을 추정하여 모델식을 구한 후, 다른 운전 데이터를 이용하여 구한 모델식을 검증한다. 실험적인 방법에 의한 모델링의 일반적인 절차는 다음의 <그림 2>와 같다[3].



<그림 2> 시스템 모델링을 위한 흐름도

2.3 매개변수 추정 알고리즘

본 논문에서 사용한 매개변수 추정 알고리즘은 순환 최소자승법(RLS : Recursive Least Square Algorithm)을 이용하였으며, 플랜트는 3차 선형시스템이라 가정하였다. 3차 선형시스템에 대한 모델식은 다음과 같이 표현된다[3].

$$y(k) = a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + a_3y(k-3) + b_0u(k-1) + b_1u(k-2) + b_2u(k-3) = \theta^T \phi(k) \quad (1)$$

$$\theta = [a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2]^T$$

$$\phi(k) = [y(k-1), y(k-2), y(k-3), u(k-1), u(k-2), u(k-3)]^T$$

여기서, $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$ 는 플랜트의 매개변수들이고 $u(k)$ 와 $y(k)$ 는 k 번째 순간의 플랜트 입력과 출력이다. θ 는 추정해야 할 미지의 매개변수 벡터이고, $\phi(k)$ 은 순간의 회귀신호 벡터이다. 매개변수 벡터 θ 를 추정하기 위해 식 (1)과 같은 시스템에 대하여 평가함수 $J(k)$, 추정출력 $\hat{y}(k)$, 출력오차 $e(k)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$J(k) = \sum_{i=1}^k e^2(i) \quad (2)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$$

$$\hat{y}(k) = \phi^T(k) \hat{\theta}(k)$$

식 (2)를 최소화하는 $\hat{\theta}(k)$ 는 다음 식을 만족한다.

$$\frac{\delta J(k)}{\delta \hat{\theta}(k)} = 0 \quad (3)$$

여기서

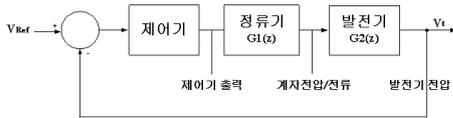
$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k) \ \hat{a}_2(k) \ \hat{a}_3(k) \ \hat{b}_1(k) \ \hat{b}_1(k) \ \hat{b}_2(k)]^T$$

$$\phi(k+1) = [y(k) \ y(k-1) \ y(k-2) \ u(k) \ u(k-1) \ u(k-2)]^T$$

로서, $[\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \hat{a}_3(k), \hat{b}_1(k), \hat{b}_1(k), \hat{b}_2(k)]$ 는 각각 k번째 순간의 매개변수 추정 값들이다.

2.3 운전데이터를 이용한 여자시스템 모델링

플랜트의 동특성이 충분히 포함된 입력력 데이터를 효과적으로 추출하기 위해서 실험에 앞서 여러 가지 조건들이 결정되어야 한다. 발전기 여자시스템 제어기에 있어, 기동 시와 계통에 병입한 후 등의 구간에 따라 고려해야 할 사항들이 각각 다르다. 본 연구에서는 발전기의 정격속도 무부하 상태에서 제어기의 출력에 따른 계자전압 및 전류, 발전기 전압의 입력력 관계를 통해 정류기와 발전기의 모델을 구현하였다. 모델링의 알고리즘은 최소자승법을 사용하였고, 입출력 신호의 취득 주기는 0.01sec로 정하였다. 또한 모의실험용 소프트웨어는 Matlab의 Simulink를 이용하였다. 일반적으로 간략화된 여자시스템의 모델링 블록선도는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 여자시스템 모델링 블록선도

<그림 3>에서 $G_1(z)$ 은 제어기 출력-계자전압, $G_2(z)$ 는 계자전류-발전기 전압 사이의 전달함수이다. 전달함수의 입력신호를 제어기 출력, 출력신호를 계자전압으로 하여 모델링한 결과 $G_1(z)$ 의 전달함수는 다음과 같다.

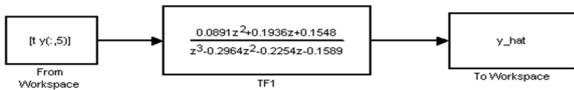
$$G_1(z) = \frac{0.0891z^2 + 0.1936z + 0.1548}{z^3 - 0.2964z^2 - 0.2254z - 0.1589}$$

전달함수의 입력신호를 계자전류, 출력신호를 발전기전압으로 하여 모델링한 결과 $G_2(z)$ 의 전달함수는 다음과 같다.

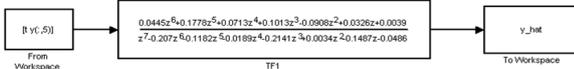
$$G_2(z) = \frac{0.4495z^2 + 0.2384z + 0.2651}{z^3 - 0.0123z^2 + 0.2375z - 0.0544}$$

2.4 모델링 결과 및 고찰

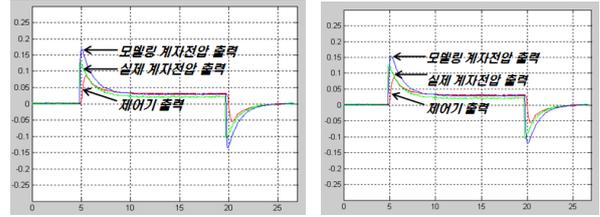
발전기 전압 기준 값을 5% 계단응답을 주었을 때 운전데이터를 이용하여 3차 및 7차 선형시스템의 모델링에 사용된 $G_1(z)$ 의 전달함수 및 모델링한 결과는 <그림 4>, <그림 5>와 같으며, <그림 6>은 제어기 출력에 대한 계자전압의 특성그래프를 나타낸다.



<그림 4> 3차 시스템 $G_1(z)$ 의 전달함수

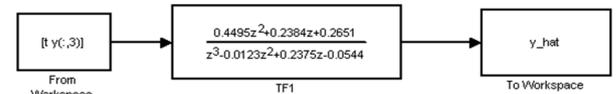


<그림 5> 7차 시스템 $G_1(z)$ 의 전달함수

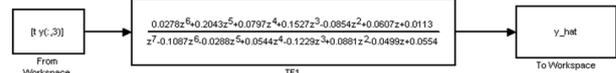


<그림 6> 제어기 출력에 대한 계자전압 특성(3차/7차)

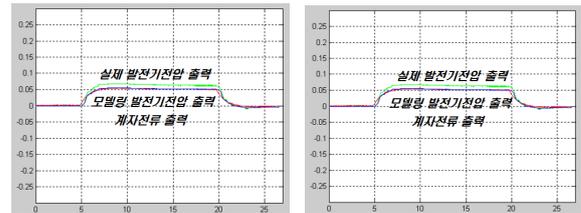
운전데이터를 이용하여 입력신호를 제어기 출력, 출력신호를 계자전압으로 한 모델링 결과를 살펴보면, 초기 과도상태에서는 약간의 오차가 있었으나, 안정 상태에서는 거의 일치하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 또한 3차와 7차 선형시스템의 모델링 결과를 비교해 보면, 일부 초기 과도상태에서 7차로 하였을 때 좀 더 편차가 적었음을 알 수 있었으나 다른 구간에서는 큰 차이는 보이지 않았다. 발전기 전압 기준 값을 5% 계단응답 신호를 주었을 때 운전데이터를 이용하여 3차 및 7차 선형시스템의 모델링에 사용된 $G_2(z)$ 의 전달함수 및 모델링한 결과는 <그림 7>, <그림 8>과 같으며, <그림 9>는 제어기 출력에 대한 계자전압의 특성그래프를 나타낸다.



<그림 7> 3차 시스템 $G_2(z)$ 의 전달함수



<그림 8> 7차 시스템 $G_2(z)$ 의 전달함수



<그림 9> 계자전류에 대한 발전기전압 특성(3차/7차)

운전데이터를 이용하여 입력신호를 계자전류, 출력신호를 발전기 전압으로 한 모델링 결과를 살펴보면, 3차와 7차의 선형시스템에서 모두 약간의 오차가 있었으나 거의 유사한 그래프로 만족할 만한 결과를 얻었다.

3. 결 론

선진외국 기술에 전적으로 의존하고 있었던 원자력발전소 비상디젤발전기의 여자시스템을 순수 국내기술로 개발하였다. 본 논문에서는 발전소 운전데이터를 취득하고, 이를 이용하여 여자시스템을 모델링하고, 그 결과들을 기술하였다. 여자시스템의 개발과정에서 수행한 모델을 이용하여 제어기를 설계하고 시물레이션을 통해 모델의 적합성과 제어기의 효용성을 확인하였다. 향후 개발시스템의 현장 적용 시 제어기의 초기 값 설정에 활용 가능할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이주현 외 “실시간 시물레이터를 이용한 디젤발전기 여자시스템 현장시험” 대한전기학회 논문지, 2010
- [2] 임익현, “동기발전기 디지털 여자시스템 개발에 관한 연구” 학위논문, 홍익대학교, 2001
- [3] 이주현, “실시간 Fault Tolerant System을 적용한 원자력발전소 디젤발전기 여자시스템 개발”, 학위논문, 충남대학교, 2010
- [4] 이주현 외, “원자력발전소 디젤발전기 디지털 여자시스템 개발 및 적용” 대한전기학회 논문지, 2010