

현장시험에 의한 발전기 자동전압 제어장치의 정수 추정 기법에 관한 연구

임 익 헌^{*}, 김 경 철^{**}

한국 전력공사 전력연구원, ^{**} 홍익대학교

A Study on the Parameter Identification for Generator Automatic Voltage Regulator by Field Test

I. H. Lim^{*}, K. C. Kim^{**}

^{**} Hong-ik University

* Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

Abstract

A new improved excitation control system for power plant synchronous generators has been developed by KEPRI(Korea Electric Power Research Institute). In this paper a description of the developed control system with detailed design concept is given. Field tests are conducted to show the system performance and to obtain the model parameters.

Based on the measurement approached by field tests, excitation model parameters supposing a mathematical model is given can be determined.

This paper also proposes a algorithm of parameter estimation and identification in the synchronous Generator Excitation Control System.

1. 서 론

복잡한 전력 시스템을 해석하기 위해서는 각 요소별 수학적 모델이 요구된다. 제작자로부터 제공받은 설계자료로 분석한 발전기 여자제어 시스템의 모델은 시운전시의 파라미터 조정과 장기운전 및 유지보수로 인한 노화로 파라미터 변화가 있어 모델 정수가 정확하지 못하다. 또한 본 연구의 사례연구대상 발전소의 경우 여자제어 시스템을 국산개발하여 적용한 발전소로 모델의 변화는 필연적일 것이다. 따라서 소신호 성능평가 시험과 더불어 적정 모델 추정이 필요하다. 개발된 시스템을 대상으로 특성시험을 실시하고, 결과로 얻어진 데이터를 분석하여 적정 모델정수 추정 기법들을 연구하고, 이를 소개하고자 한다.

2. 시스템 구성

사례연구에 대상이된 발전기 여자제어 시스템을 중요한 인쇄 회로 기판을 근간으로 해서 설명하면 다음과 같다.

자동전압 조절기 제어반

이 제어반에서는 자동제어 신호가 생성된다.

외부로부터 전압 설정 기준신호와 발전기 단자전압, 발전기 단자 전류와 같은 궤환 신호가 입력되어 연산 증폭기에서 편차신호를 만든다.

그리고 발전기 전압 궤환신호 측정시 발생하는 시간지연을 보상하기 위한 상 중진 증폭기(Phase Advance Amp)와, 비례, 적분과 같은 조절기의 역할을 수행하는 혼합 증폭기(Mixing Amp)가 있다. 또한 이 제어반에서는 저주파시 발전기와 주변압기의 과여자를 방지하기 위한 V/Hz 보호기능과, 계통안정도를 저해하는 지나친 진상운전을 제한하는 기능과 자동운전과 수동운전 전환시 충격없이 제어되도록 하는 설정기의 자동추종(Tracking) 기능이 수행된다.

디지털 전압 설정기 제어반

이 제어반은 무점점 디지털 카운트 방식에 의해서 발전기의 단자 전압 자동설정기와 여자전류 기준설정기가 내장되어 있다. 대다수의 기존의 발전기 여자제어 시스템의 설정기가 유점속 가변저항기 형태로 다고장이나 개발시스템은 개선된 형태이다.

여자전류 기준신호 설정기는 전압제어 제어반의 출력신호, 즉 자동전압 제어신호의 크기와 극성이 정해진 값을 초과하면 이를 펄스 변조 모듈에서 검출하여 계전기를 구동하고, 다시 이 계전기 접점이 디지털 카운터를 증감하여 발전기 여자전류의 기본신호 설정값을 만들어 낸다.

전류 제어반

대상 발전기의 여자제어 시스템은 자동 전압제어 폐회로와 여자전류 제어 폐회로로 구성되어 있다. 여기서는 여자전류 요구신호, 여자전류 궤환 신호와 같은 제어신호 처리와 발전기 회전계자의 열적 보호를 위한 과여자 전류 제한, 그리고 부속여자 제한 기능을 수행하는 회로가 있다. 이 제어반의 출력신호가 싸이리스터 게이트 펄스 위상제어 신호가 된다.

전원 공급 제어반

시스템 내의 제어회로에서 사용되는 안정화된 직류전원 공급장치가 내장되어 있다. 입력 교류전원 공급측을 독립된 별개의 전원으로 부터 입력받아 전원장치를 이중화 하였으며, 전원 공급장치의 과전류와 과전압으로부터 스스로를 보호하고 이상시 경보를 취명하는 감시카드도 함께 설치되어 있다.
+15V와 -15V 직류 전압 및 125V 직류전압 전원장치 이다.

감시 제어반

이중화된 시스템에서 입력신호(전압, 속도, 휴즈상실)들의 비정상 상태를 감시하는 기능을 수행하는 제어반이다.

점호 제어반

싸이리스터 게이트 점호발생과 관련된 전원공급 카드, 과전압 보호카드 및 기타 정류기 냉각공기 유량 상실검출 카드가 내장되어 있다. 이 제어반에서는 싸이리스터의 제어와 관련된 정류제한, Inversion 제한, 점호필스 금지 등의 기능도 동시에 수행한다.

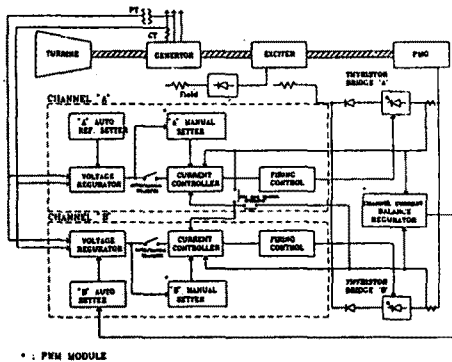


그림 1 : 시스템 블록도

3. 정수 추정

시스템의 계단응답 시험을 실시하고, 여기서 얻어진 Data를 분석하여 구하고자 하는 수학적 모델 정수를 추정하였다.

Least Square Method(LSM)

LSM은 가장 널리 알려진 정수 추정기법으로 본 연구에서도 정수의 초기값을 구하는데 이 방법을 사용하였다. 여자제어 시스템의 각 기능블럭은 단일 입력, 단일 출력으로 취급하였으며 그림 2는 이것을 나타낸 것이다. 각각의 시스템 블록 모델은

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = H(S)$$

로 나타내고 여기서 U(S)와 Y(S)는 시스템의 입력과 출력이고 H(S)는 시스템 전달함수 이다.

시스템 모델은 시간에 연속인 함수인 Laplace 형식인 H(S)로 구성되어 있으므로 이를 이산시간 형식인 H(Z) 꼴로 변환시킨다. Z 변환 기법중 가장 널리 사용되고 있는 Trapezoidal 법칙을 적용하였다. 이 기법은 적용이 용이하고, 정확도가 좋고 직류 이득이 같으며 S-Domain의 전달함수가 안정하며 Z-domain 에서도 안정한 것등이 장점이다.

$$S = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{Z-1}{Z+1}$$

여기서 Ts는 일정한 샘플링 시간이고, Z는 시간지연 천이연산자,

$$S = \frac{d}{dt} \text{ 이다.}$$

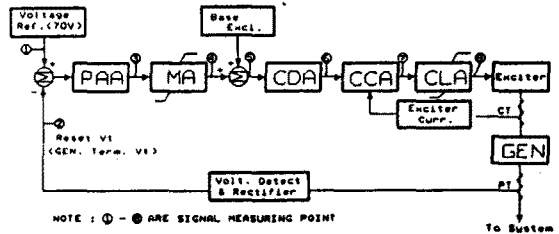


그림 2 : 개발된 시스템의 기능 블록도

이산시간 시스템의 모델구조물

$$Y_i = \phi_i^T \theta + n_i$$

으로 표시할 수 있다.

여기서 y_i 는 시간 t 에서 $[ny]$ 차 출력행렬 이고 ϕ_i 는 시간지연된 입력과 출력의 선형조합으로 구성된 행렬이며, θ 는 $[n\theta]$ 차의 미지의 정수이고, n_i 는 외란노이즈(Zero mean white noise)이다. y_i 와 ϕ_i 가 주어지므로 시스템 오차 공식은

$$e = y_i - \phi_i^T \theta$$

으로 나타내고 θ 에 대해서 자승오차를 최소화 하기 위해 최소자승법으로 정수벡터 θ 를 추정할 수 있다.

θ 에 대해 미분하면

$$\phi = (\phi_i^T \phi_i)^{-1} (\phi_i y_i)$$

으로 추정될 수 있다.

Pattern Search Method (PSM)

PSM은 일종의 시행착오 방법의 하나로서 구하고자 하는 정수들을 임의의 초기값에서 각각 하나씩 변화시키면서 주어진 입력값과 초기값의 정수들로 Model의 응답을 구한 다음 실측한 출력값과 비교하여 오차를 최소화 시키는 정수값을 찾는다. 이 과정이 끝나면 모든 정수들을 한꺼번에 변화시키면서 최소 오차가 되는 정수들을 찾는 방법이다. 오차는

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Y_{act} - Y_{sim}|$$

으로 한다.

여기서 N은 실측한 Data수, Y_{acr} 은 실측한 출력값, Y_{sim} 은 실측한 입력 Data로 Simulation해서 얻은 출력값 이다.
예를들면 모델이

$$\frac{Y}{U} = \frac{K}{1+sT}$$

으로 주어질 때, 구하고자 하는 Simulation한 출력값 Y_{sim} 은

$$\frac{Y_{sim}}{U} = \frac{K}{1+sT}$$

$$Y_{sim}(1+sT) = KU$$

$$Y_{sim} \left[1 + \frac{T(1-Z^{-1})}{0.5T_s(1+Z^{-1})} \right] = KU$$

$$Y_{sim} = \frac{T-0.5T_s}{T+0.5T_s} Y_{sim}^{-1} + \frac{0.5T_s K}{T+0.5T_s} (U+U^{-1})$$

으로 구한다. 모델이

$$\frac{Y_{sim}}{U} = \frac{K(1+sT_2)}{1+sT_1}$$

으로 주어지면

$$Y_{sim}(1+sT_1) = KU(1+sT_2)$$

$$Y_{sim} \left[1 + \frac{T_1(1-Z^{-1})}{0.5T_s(1+Z^{-1})} \right] = KU \left[1 + \frac{T_2(1-Z^{-1})}{0.5T_s(1+Z^{-1})} \right]$$

$$Y_{sim} \frac{T_1-0.5T_s}{T_1+0.5T_s} Y_{sim}^{-1} + \frac{T_2+0.5T_s}{T_1+0.5T_s} KU - \frac{T_2-0.5T_s}{T_1+0.5T_s} KU^{-1}$$

이 된다.

LSM을 초기값으로 한 PSM

일반적으로 LSM의 응용은 거의 Noise Free System에 한정되어 있다. 그리고 시스템내에 임의의 외란이 존재할 때는 편향된 추정치가 생길 수 있다.

환경 노이즈를 갖는 시스템에서 Identification의 정확도를 개선하고 보다 좋은 PSM 결과를 얻기 위해 LSM을 초기값으로 한 수정된 PSM을 사용하고자 한다.

그림 3은 이 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것이다.

정수 추정결과는 만족스러웠으며, 그림 4는 추정결과를 나타낸 것이다.

분석에 사용된 데이터의 수는 4000이고 샘플링 시간은 1.0mSec 이다.

4. 여자제어 시스템의 동적 성능

소신호 성능데이터는 여자제어 시스템 동특성 연구에서 시스템의 모델정수를 결정하는 수단으로 제공될 수 있다. 또한 추정된 정수를 가지고서 Simulation을 통해서 시스템의 동적 성능을 찾을 수도 있다.

여기서는 국산 개발된 대상 발전기의 여자제어 시스템의 동적 성능을 평가하기 위하여 추정된 정수(그림 4)를 기본으로하여

Time Response (그림 5)와 Frequency Response(그림 6)를 수행하였다.

IEEE Std 421A - 1978 표준에서 추천한 성능지수 항목별로 시스템의 동적성능 결과를 비교하였다. (표 1)

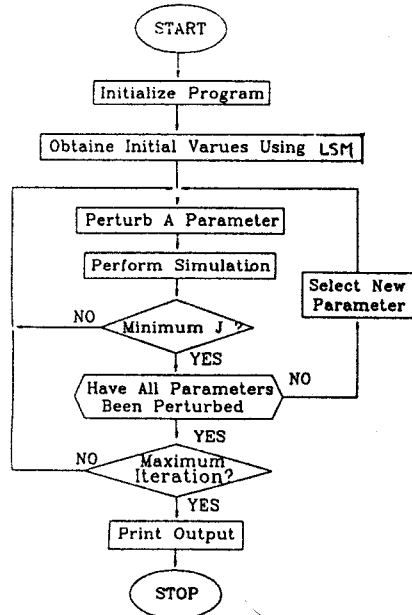


그림 3 : 수정된 PSM의 흐름도

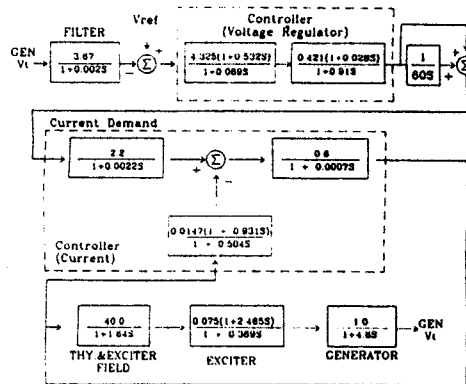


그림 4 : 정수 추정된 여자제어시스템 전달함수 블록도

5. 결론

응답 속응성과 운전 신뢰성 그리고 제어안정도가 향상된 새로운 설계개념으로 이중채널 구조의 여자제어 시스템이 국내에서 처음으로 개발 되었다. 개발된 시스템을 대상으로 동적 성능 시험을

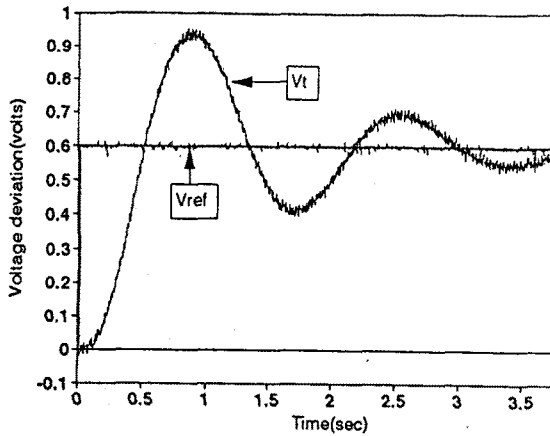
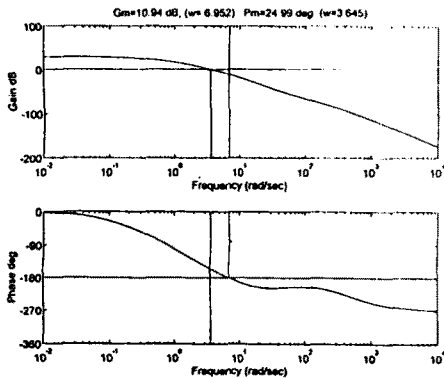
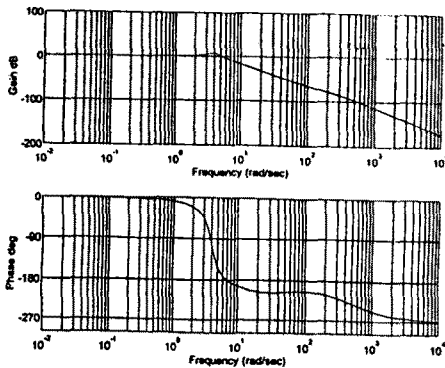


그림 5 : 시간응답 특성



(a) 개회로



(b) 폐회로

그림 6 : 주파수 응답특성

Performance Index	Range of Expected Values	Improved system	Remarks
Excitation system gain	50~800 per unit	241.4	10V dc = 1pu
Gain margin	2~20 dB	10.94	
Phase margin	20~80 degrees	24.99	
Peak value	0~12 dB	2.23	
Bandwidth	0.3~12 Hz	1.11	-3 dB
Overshoot	0~80 percent	44.93	$V_{peak} - 1.0$
Rise Time	0.1~2.5 S	0.33	$T_{90} - T_{10}$
Settling Time	0.2~10.0 S	3.44	$\pm 10\%$

표 1 : 동적성능 평가지수

실시하고 그 시뮬레이터를 이용하여 여러 가지 추정기법으로 시스템의 수학적 모델정수를 추정하였다. LSM에서 구한 초기값으로 PSM에서 구한 정수의 Simulation 오차는

$$\text{error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{act} - Y_{sim}| \text{으로 채택했는데}$$

상승진 증폭기 이외에는 2% 이내의 좋은 결과를 얻었다. 여기서 측정된 모든 신호는 초기치와 정상상태의 값과의 차, 즉 ΔV 로 하고, 시간중분 $T_s = 1.0$ mSec, 분석 Data 수는 $N = 4000$ 개 이다.

또한 여기서 구한 정수를 사용해서 시간응답과 주파수 응답을 Simulation한 결과 개발된 시스템의 동적성능이 IEEE에서 제시한 기준에 모두 만족한 성능을 얻었다.

참고 문헌

- Lennart Ljung (1987) System Identification : Theory For The User.
- Rolf Johansson(1993) System Modeling And Identification
- Ieee Standard, "Ieee Guide For Identification, Testing And Evaluation Of The Dynamic Performance Of Excitation Control Systems", IEEE Std. 421A, 1978.
- Edward Wilson Kimbark, "Power System Stability : Synchronous Machines", Dover Publications Inc, New York, 1995.
- 한국전력공사 전력연구원, "발전기 제어계 특성조사 및 적정 파라미터 선정에 관한 연구", KRC88S-J01, NOV. 1991.
- 한국전력공사 전력연구원 "발전소용 자동전압 조정장치 국산 개발(1)", KRC-91I-J01, SEP. 1994.