

정지형 디지털 여자시스템 시뮬레이터에 관한 연구

류호선, 김봉석, 신만수, 이주현, 임익현
한국전력연구원

A Study of Simulator for Static Digital Excitation System

Ho-Seon Ryu, Bong-Suck Kim, Man-Su Shin, Joo-hyun Lee, Ik-Hun Lim
*Korea Electric Power Research Institute

ABSTRACT

전력연구원은 고속의 DSP TMS320C33를 이용하여 실시간 정지형 계통연계 발전기 시뮬레이터를 개발하였다. 특히 소프트웨어로는 MicroC-OS를 이용하였으며 제어주기는 2500Hz이상으로 설계되었다. 실제 발전소에서 상업 운전되고 있는 여자시스템을 대상으로 하여 시뮬레이터 시험을 완료하였다.

1. 서론

동기발전기의 여자시스템 현장적용 후 수년부터 실시되는 시스템의 주기적 점검 검사시 제어기능 및 위상제어 정류기의 건전성을 평가하는데 있어서 실 계통 모의 운전시험은 검점자의 신뢰도를 한층 증가시키는 역할을 한다. 만일 실제 전력시스템을 연결하여 시험한다면 현장 운전자가 예기치 못한 사고를 발생 시킬 위험성이 있으며 또한 복잡한 여러기기들이 상호 결합하여 이루어져 있어 그 동적인 현상을 정량적으로 예측하는 것이 어렵다. 지금까지는 이러한 문제를 해결하기 위하여 실제통상업운전 시작 전에 간소한 계측장비 또는 EMTP와 같은 off-line 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 모의 시뮬레이션이 이루어져 왔는데 여기서는 실제의 여자기 및 제어장치 대신에 그 모델을 프로그램화하여 사용하게 되므로 실시간 운용시에 발생하게 될 제반 현상을 정확히 예측하기에는 문제가 있었다. 그러나 근래에 들어와 마이크로 기술의 발달에 힘입어 짧은 시간내에 다량의 정보를 처리할 수 있는 프로세서가 실용화 되어 있어서, 이를 이용한다면 실제의 여자 시스템으로부터 제어신호를 받아서 발전기 및 계통의 응답을 실시간적으로 시뮬레이션한 후에 이를 다시 여자제어기로 보내 줄 수 있는 장치를 구성할 수 있다. 본논문은 을 예측할 수 있

어서 여자 제어 성능평가에 활용할 수 있다. 본 연구는 고속의 DSP TMS320C33를 이용하여 실시간 정지형 계통연계 발전기 시뮬레이터를 개발함을 목표로 하여 성공적으로 수행 완료하였다. 특히 소프트웨어로는 MicroC-OS를 이용하여 각 Task별로 고속 연산, 통신, 계통연계 발전기 시뮬레이션 그리고 보호계통 부분으로 나누어 구성하였으며 사용자 편의를 위하여 터치스크린 형태의 GUI(Graphic User Interface)를 설치 하였다. 또한 여자시스템과의 실제 모의 운전 시험에서도 우수한 성능이 나타남을 확인할 수 있었다.

2. 실시간 정지형 계통연계 발전기 시뮬레이터의 구성

2.1 시뮬레이션 프로그램^{[1][2]}

프로그램은 동기 발전기 및 여자 제어기의 다양한 외란에 대한 과도 상태를 해석하고 그 동적 특성을 시뮬레이션 하는 목적으로 제작되었으며 최대한 사용자의 편의를 고려하여 손쉽게 이용할 수 있는 사용자 인터페이스를 장착하였다. 동기 발전기의 모델로는 Standard, SSFR2 모델을 사용 하였고 여자 제어기에는 IEEE type ST4B 형의 모델이 사용되었다. 전체 시스템의 구성은 1개의 동기 발전기가 변압기 및 병렬 전송선로를 통하여 무한 모선에 연결되어있고, 부하는 발전기단과 무한모선단의 두 장소에 연결되어 있다. 아래의 그림1은 전체 시스템의 블록선도를 나타낸다. 프로그램의 특징은 아래와 같다.

1) 동기 발전기 및 여자제어기의 외란에 대한 과도응답을 손쉽게 시뮬레이션하고 그 결과를 데이터 파일로 저장하거나 그래프로 출력할 수 있다.

2) 편리한 사용자 인터페이스를 이용하여 사용자는 프로그램에 대한 상세한 지식이 없이도 이용이 가능하다.

3) 발전기의 종류 및 발전기, 여자 제어기, 전송선로, 부하 등의 파라미터를 임의로 변경할 수 있다.

4) 한 시뮬레이션 안에서 여러가지의 외란을 순차적으로 인가할 수 있다.

5) 프로그램의 모듈화로 다른 형태의 여자 제어기, PSS 등을 추가하기가 용이하다

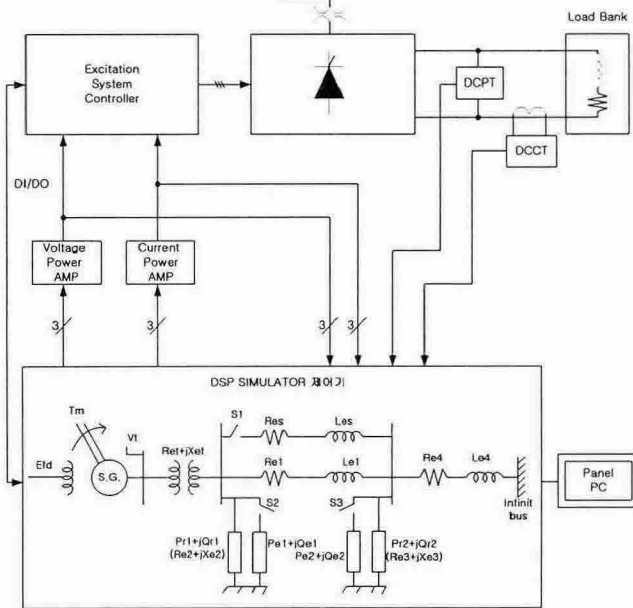


그림 1 전체 시스템 블록 선도
Fig. 1 Total System Block Diagram

1.2 시뮬레이션 흐름

동기발전기, Excitation system 및 전송 Network로 구성된 전체 시스템의 블록도는 아래 그림 2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이, 터빈으로부터 기계적 토크(T_m)와 excitation system에 의한 여자 전압(e_{fd})을 입력받은 동기발전기는 d, q축 전류(i_d, i_q)를 출력으로 내놓는다. 이때 d, q축 전류(i_d, i_q)는 동기발전기의 rotor의 d, q축을 기준으로 하였기 때문에, network의 입력으로 사용하기 위해서 rotor angle(δ)를 이용, 시스템의 d, q축을 기준으로 전류 i_D, i_Q 로 변환한다. 그러면 network는 변환된 전류 i_D, i_Q 를 입력으로 받아, 시스템의 d, q축을 기준으로 한 단자전압 e_D, e_Q 를 출력으로 내놓는다. 다시 e_D, e_Q 를 rotor의 d, q축을 기준으로 한 e_d, e_q 로 변환시키고, 이 전압을 동기발전기에서는 다시 입력으로 사용하게 된다. 또한 이 전압은 excitation system의 입력으로 들어가서, 여자전압 E_{FD} 를 출력으로 내놓는다. 그런데 이 여자전압 E_{FD} 는 여자시스템을 기준으로

한 단위 값이므로, 이를 다시 동기발전기의 단위 값으로 변환시킨다. 변환된 e_{fd} 역시 동기발전기의 입력이 된다.

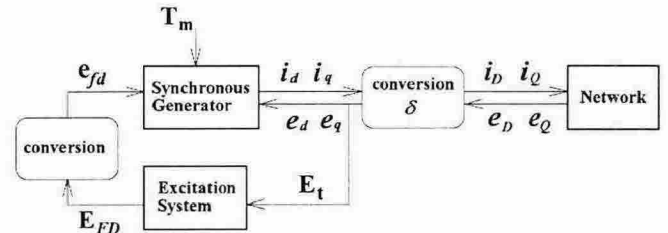
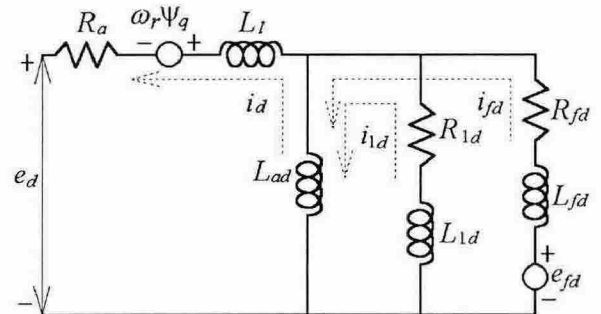


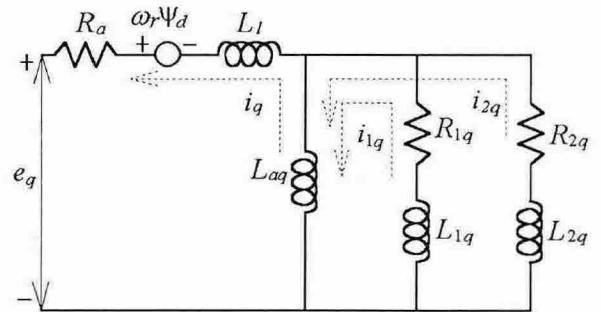
그림 2 제어 흐름 블록 선도
Fig. 2 Control Flow Block Diagram

1.3 동기발전기 모델 및 동적방정식

Standard model의 직축, 횡축 등가회로는 아래의 그림3과 같다.



< 직축 등가회로 >



< 횡축 등가회로 >

그림 3 기준모델 등가회로
Fig. 3 Standard model Equivalent Circuit

< d-axis equations >

$$\begin{aligned}
 e_d &= -(L_{ad} + L_l) \dot{i}_d + L_{ad} \dot{i}_{fd} + L_{ad} \dot{i}_{1d} + \omega_r (L_{aq} + L_l) i_q \\
 &\quad - \omega_r L_{aq} i_{1q} - \omega_r L_{aq} i_{2q} - R_a i_d \\
 e_{fd} &= -L_{ad} \dot{i}_d + (L_{ad} + L_{fd}) \dot{i}_{fd} + L_{ad} \dot{i}_{1d} + R_{fd} \dot{i}_{fd} \\
 0 &= -L_{ad} \dot{i}_d + L_{ad} \dot{i}_{fd} + (L_{ad} + L_{1d}) \dot{i}_{1d} + R_{1d} \dot{i}_{1d}
 \end{aligned}$$

< q-axis equations >

$$e_q = -(L_{aq} + L_l) \dot{i}_q + L_{aq} \dot{i}_{1q} + L_{aq} \dot{i}_{2q} - \omega_r (L_{ad} + L_l) \dot{i}_d + \omega_r L_{ad} \dot{i}_{fd} + \omega_r L_{ad} \dot{i}_{1d} - R_a \dot{i}_q$$

$$0 = -L_{aq} \dot{i}_q + (L_{aq} + L_{1q}) \dot{i}_{1q} + L_{aq} \dot{i}_{2q} + R_{1q} \dot{i}_{1q}$$

$$0 = -L_{aq} \dot{i}_q + L_{aq} \dot{i}_{1q} + (L_{aq} + L_{2q}) \dot{i}_{2q} + R_{2q} \dot{i}_{2q}$$

또 이때의 swing 식과 행렬형태로 정리된 식은 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r)$$

$$\delta = \omega_0 \Delta \omega_r$$

$$T_e = -(L_{ad} + L_l) \dot{i}_d \dot{i}_q + L_{ad} \dot{i}_{fd} \dot{i}_q + L_{ad} \dot{i}_{1d} \dot{i}_q + (L_{aq} + L_l) \dot{i}_q \dot{i}_d - L_{aq} \dot{i}_{1q} \dot{i}_d - L_{aq} \dot{i}_{2q} \dot{i}_d$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & 0 \\ 120\pi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} & \frac{K_D}{2H} \\ 0 & -120\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m - T_e \\ 1 \end{bmatrix}$$

1.4 여자시스템 모델 및 동적방정식

여자제어기의 모델로서 IEEE type ST4B excitation system model를 사용하였고 여자기 제어기의 블록선도가 아래의 그림4에 나타나 있는데 본 모델은 제어기로서 proportional-integral(PI) controller가 채용되었으므로 정상상태의 에러가 없다.

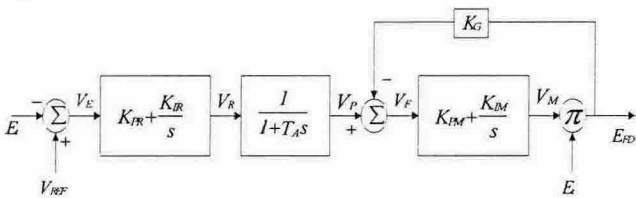


그림 4 IEEE ST4B 여자시스템 모델
Fig. 4 IEEE ST4B excitation system model

여기서 적분기는 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 아래 그림 5와 같이 시정수 T, 이득 TK_{IR}을 갖는 1차 미방의 꼴로 변형하였고 T값을 10³~10⁶의 큰값으로 선정하면 이상적 적분기와 거의 근사한 동작을 하게 된다.

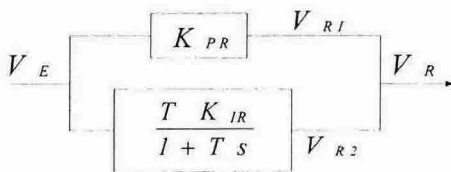


그림 5 PI 제어기(예)
Fig. 5 PI controller(Example)

$$\frac{K}{S} \approx \frac{TK_{IR}}{1+TS} \quad (T = 10^3)$$

$$V_E = V_{REF} - E_t$$

$$\frac{d}{dt} V_{R2} = -\frac{V_{R2}}{T} + V_E K_{IR}$$

$$\frac{d}{dt} V_P = -\frac{1}{T_A} (V_{R2} - V_P) + \frac{K_{PR}}{T_A} V_E$$

$$\frac{d}{dt} V_{M2} = K_{IM} V_P - \frac{1}{T} V_{M2} - K_{IM} K_G E_{FD}$$

$$E_{FD} = E_t (K_{PM} (V_P - K_G E_{FD}) + V_{M2})$$

1.5 계통모델 및 방정식^{[3][4]}

network의 주파수는 항상 60Hz라고 가정하였다. 즉 선로의 dynamics를 무시하고, load flow 방식으로 접근한 것이다. 또 편의를 위해 복잡해 보이는 위 network를 회로 형태로 만든 후, 테브난의 정리를 이용하여 테브난 등가회로로 간략화 시켰다. 먼저 network를 회로화시키면 그림6과 같다.

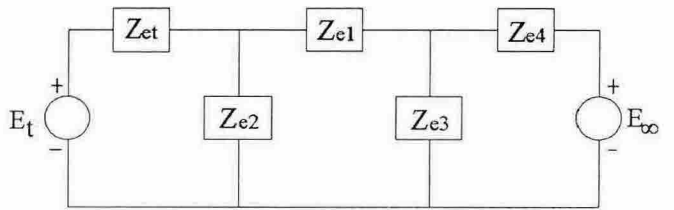


그림 6 회로형태로 간략화한 계통도
Fig. 6 Simplified Network of Circuit Type

$$Z_{et} = R_{et} + jX_{et}$$

$$Z_{e1} = R_{e1} + j\omega L_{e1}$$

$$Z_{e2} = R_{e2} + jX_{e2}$$

$$Z_{e3} = R_{e3} + jX_{e3}$$

$$Z_{e4} = R_{e4} + j\omega L_{e4} \quad (\text{단, } \omega = 2\pi f = 1 \text{ pu})$$

이 회로의 테브난 정리에 의한 등가회로는 다음과 같다.

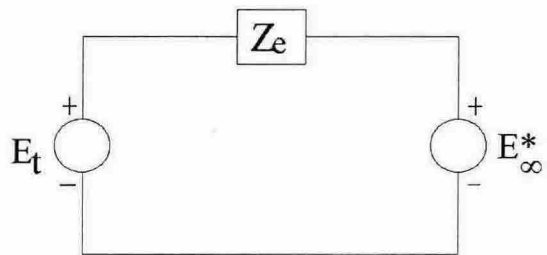


그림 7 Thevenin Equivalent Circuit of Network
Fig. 7 계통의 테브난 등가회로

위 등가회로에 사용된 약어의 의미는 다음과 같다.

$$Z_e = Z_{e1} + \frac{Z_{e2}(Z_{e1}Z_{e3} + Z_{e1}Z_{e4} + Z_{e3}Z_{e4})}{Z_{e1}Z_{e3} + Z_{e1}Z_{e4} + Z_{e2}Z_{e3} + Z_{e2}Z_{e4} + Z_{e3}Z_{e4}}$$

$$E_{\infty}^* = \frac{Z_{e2}Z_{e3}}{Z_{e1}Z_{e3} + Z_{e1}Z_{e4} + Z_{e2}Z_{e3} + Z_{e2}Z_{e4} + Z_{e3}Z_{e4}} E_{\infty}$$

본 프로그램에서는 line switching, line opening, load switching, load rejection 등의 외란을 임피던스 $Z_{e1} \sim Z_{e4}$ 의 변화로 모의하였다.

2. 시뮬레이터 실험결과

실제 시험은 상업운전중에 있는 여자지시스템을 대상으로 하여 실시되었다. 대표적인 시험은 그림 8~그림 11에 나타나 있다. 여자시스템 시험용 시뮬레이터는 내부에서 전류 피드백 제어를 하고 있어 출력신호는 0.5%내의 정밀도를 가지고 있다. 또한 시뮬레이터의 주요기능으로 계통시뮬레이터 외에 출력전압, 전류의 크기 및 주파수 가변이 가능하도록 설계되어 있어 발전소의 각종 계전기 튜닝은 물론 계통 병입 장치의 시험도 실시할 수 있도록 설계하였다.

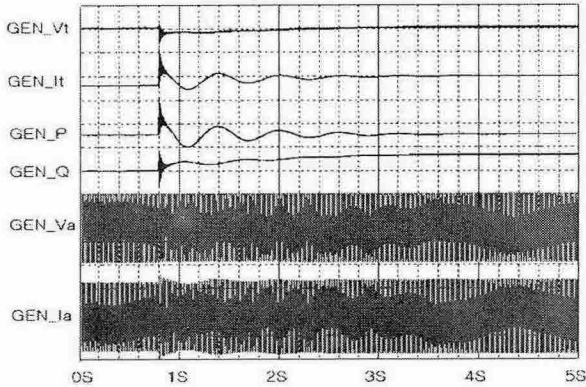


그림 8 선로 스위칭(병렬 전송선로 Res, Les를 추가함)
Fig. 8 line switching(Including Res, Les)

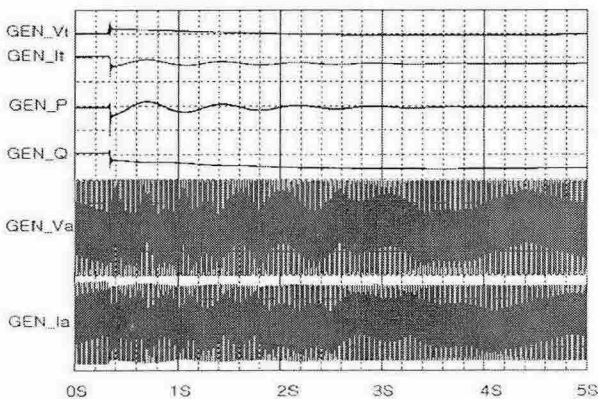


그림 9 무한모선단 부하 P_e , Q_e 를 추가함
Fig. 9 load switching(Including P_e , Q_e)

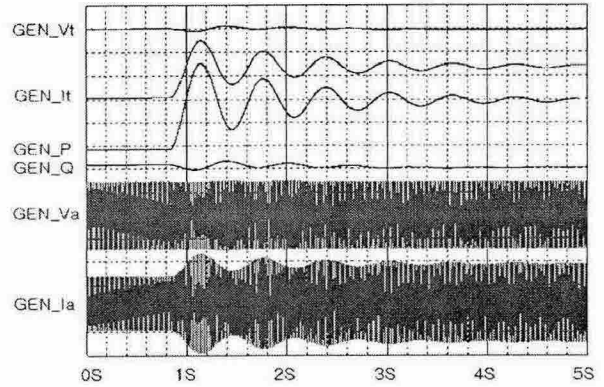


그림 10 기계적 터빈 기준신호 변화
Fig. 10 Mechanical Turbine Reference Change

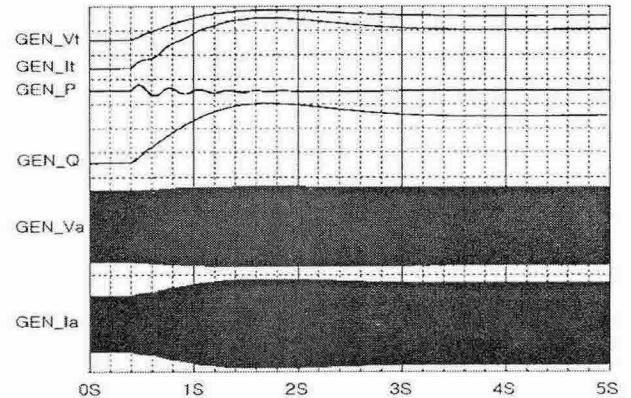


그림 11 여자시스템 기준전압 변화
Fig. 11 Excitation System Reference Voltage Change

3. 결론

본 연구는 고속의 DSP TMS320C33를 이용하여 실시간 정지형 계통연계 발전기 시뮬레이터를 개발함을 목표로 하여 성공적으로 수행 완료하였다. 특히 소프트웨어로는 Micro-C-OS를 이용하여 각 Task별로 고속 연산, 통신, 계통연계 발전기 시뮬레이션 그리고 보호계통 부분으로 나누어 구성하였으며 사용자 편의를 위하여 터치스크린 형태의 GUI(Graphic User Interface)를 설치 하였다. 향후의 연구과제로는 다모선, 다중 발전기 시스템을 실시간으로 시뮬레이션하는 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [2] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Standard 421.5-1992.
- [3] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, New York, 1994.
- [4] "발전기용 여자제어 시스템 개발" 중간, 최종보고서, 전기연구원