

발전기 실시간 on-line 시뮬레이터 개발에 관한 연구

김국현*, 이종무*, 유일도**, 문승일**
 * 한국전기연구소, ** 전북대학교 전기공학과

A Study on Development of Real-time on-line Generator Simulator

Kook-Hun Kim*, Jong-Moo Lee*, Il-Do Yoo**, Seung-Il Moon**
 * Korea Electrotechnology Research Institute, ** Chonbuk National University

Abstract

This paper presents a new on-line generator simulator which can be utilized for the control parameter setting of the exciter and the power system stabilizer (PSS). The proposed simulator equipped with A/D and D/A channels through which actual exciter and PSS can be connected. System parameters and disturbance sequence are easily programmed using friendly developed interface. The developed simulator is tested and verified by connecting a simple AVR implemented by op-amps.

1. 서론

동기 발전기에 여자기와 Power System Stabilizer (PSS)를 적용하고자 할 때 제어기의 적절한 파라미터 설정은 발전기의 안정도와 동적특성을 결정하는 중요한 요소이다.[1,3] 이러한 파라미터의 설정을 지금까지는 컴퓨터 시뮬레이션에 크게 의존하여 왔으나 여기에는 여자기나 PSS의 수학적 모델을 사용하도록 되어 있어 모델의 부정확성에 의한 문제를 안고있다. 더욱이 적절한 제어 파라미터의 설정이 이루어지지 않은 상태에서 실제계에 연결하여 시험하는 것은 계통의 안정도를 해칠 수도 있는 큰 위험 부담을 안고 있다. 이러한 경우 발전기 및 계통의 동적 특성을 실시간적으로 계산하여 A/D 및 D/A를 통하여 실제의 여자기 및 PSS와 연결하여 운용할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 필요하다.

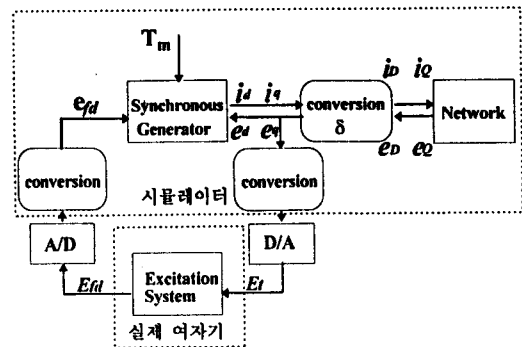
본 논문은 펜티엄급 PC를 이용하여 발전기와 계통의 동적특성을 실시간으로 모의 재현할 수 있는 시뮬레이터 개발을 기술한다. 본 시뮬레이터는 발전기, 전송선로, 부하의 파라미터를 쉽게 입력하고 또한 다

양한 외란을 순차적으로 인가하도록 하는 간편한 인터페이스를 갖추어 사용자가 단시간에 사용 방법을 익히고 응용할 수 있도록 하였다. 아울러 발전기의 내부 상태변수들의 변화를 터미널에 그래픽하여 보임으로써 시스템의 상태를 실시간으로 추적할 수 있다. 실제의 여자 제어기와 본 시뮬레이터는 A/D, D/A 보드를 이용해 계자전압, 단자전압, 단자전류 등을 주고 받는다.

본 시뮬레이터의 기능을 검증하기 위하여 OP-AMP를 이용 간단한 아날로그식 모의 Automatic Voltage Regulator (AVR)을 구성하고 이를 A/D 및 D/A에 연결하여 시험하였다.

2. System Block Diagram

동기발전기, 여자기 시스템 및 전송시스템으로 구성된 전체적인 시스템의 블록도는 아래 < 그림 1 >과 같다.



< 그림 1 > 전체 시스템 블록도

발전기의 초기 상태변수 값의 설정은 시뮬레이션 시작시 발전기의 부하 및 단자전압으로 부터 결정한다. 위 그림에서 볼 수 있듯이, 시뮬레이터는 터어빈으로부터 기계적 토크 T_m 과 여자 전압 e_{fd} 를 입력받아 동기발전기는 d,q 축 전류 i_d, i_q 를 출력으로 내놓는다. 전송 시스템은 전류를 입력으로 받아, 단자전압 e_d, e_q 를 출력으로 내놓는다. 이 전압은 다시 동기발전기의 입력으로 사용된다.

시뮬레이터로부터 D/A 보드를 통하여 발전기 선간 전압, 선전류, 여자기 전압 및 여자기전류등 6개의 아날로그신호가 출력되고 이것이 여자기의 입력으로 받아들여진다. 한편 시뮬레이터는 A/D 보드를 통해 여자기의 출력인 E_{fd} 를 읽어들인다 그런데 E_{fd} 는 여자기울 기준으로 한 단위값이므로, 이를 다시 동기발전기의 단위값으로 변환시킨다. 변환된 e_{fd} 역시 동기발전기의 입력이 된다.

3. 발전기 모델

발전기는 standard model 을 사용하였고, 이를 표현하는 동적 방정식은 아래와 같다.[1,2]

$$e_d = -(L_w + L_f)i_d + L_w i_{fd} + L_w i_{fd} + \omega_s(L_w + L_f)i_q - \omega_s L_w i_q - \omega_s L_w i_{fd} - R_f i_d \quad (1)$$

$$e_q = -L_w i_d + (L_w + L_f)i_q + L_w i_{fd} + R_f i_q \quad (2)$$

$$0 = -L_w i_d + L_w i_{fd} + (L_w + L_f)i_q + R_f i_q \quad (3)$$

$$e_d = -(L_w + L_f)i_d + L_w i_{fd} + L_w i_{fd} - \omega_s(L_w + L_f)i_q + \omega_s L_w i_q + \omega_s L_w i_{fd} - R_f i_d \quad (4)$$

$$0 = -L_w i_d + (L_w + L_f)i_q + L_w i_{fd} + R_f i_q \quad (5)$$

$$0 = -L_w i_d + L_w i_{fd} + (L_w + L_f)i_q + R_f i_q \quad (6)$$

프로그램에서는 시뮬레이션의 속도를 향상시키기 위해 위식의 ω_s 를 상수로 고정하여 반복되는 계산과정에는 변화시키지 않았다 하지만 swing 식에서 ω_s 은 반복 계산하였다.

회전자 각과 각속도를 계산하는 swing 식은 다음과 같다.[1,2]

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_p \Delta\omega_r) \quad (7)$$

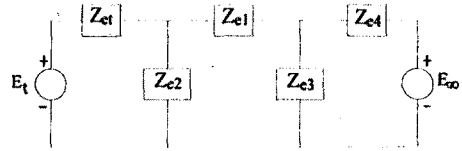
$$\dot{\delta} = \omega_r \Delta\omega_r \quad (8)$$

$$\Delta\omega_r = \omega_r - 1 \quad (9)$$

$$T_e = -(L_w + L_f)i_d + L_w i_{fd} + L_w i_{fd} + (L_w + L_f)i_q - L_w i_q - L_w i_{fd} \quad (10)$$

4. Network model

본 프로그램에서는 부하 변동으로 인한 선로 측에서 발생하는 transient는 무시하고, load flow 방식으로 접근하였다. 프로그램에서 모의 하고 있는 전력 전송선로 및 부하에 관한 회로형태의 간략한 회로망은 다음과 같다.



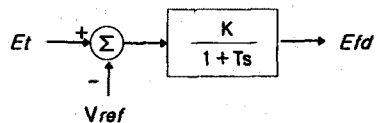
< 그림 2 > 회로형태로 간략한 회로망

위 그림에서 E_t 는 발전기의 단자전압을, Z_{ei} 는 변압기의 임피던스를, $Z_{e1}, Z_{e2}, Z_{e3}, Z_{e4}$ 는 line 과 부하의 임피던스, E_o 는 무한모선의 전압을 각각 대표한다. 본 프로그램은 line switching, line opening, load switching, load rejection 등의 외란을 임피던스 $Z_{e1} \sim Z_{e4}$ 의 변화로 모의하였다.

5. 실제 여자기와의 인터페이스

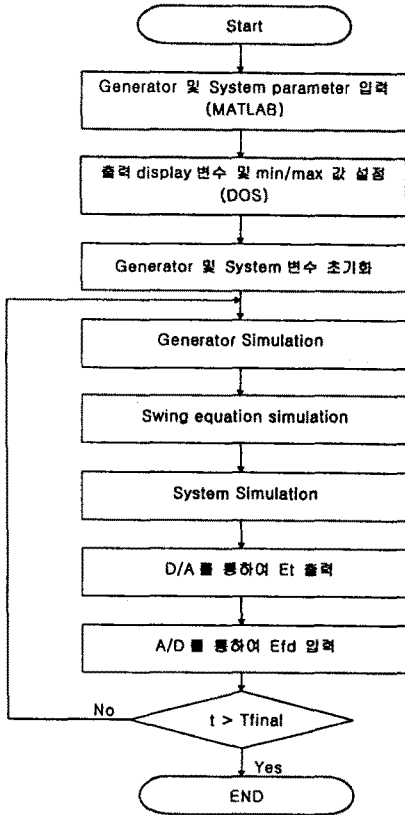
본 시뮬레이터는 초기값 계산시 사용자가 입력한 발전기 단자전압과 연결된 부하를 고려한 계자전압을 계산한다. 이 계자전압과 단자전압을 이용해서 A/D,D/A 보드의 적절한 전압의 크기, scale factor 를 결정할 수 있다. 시뮬레이션시 sampling time 을 0.3 msec 로 하였고 펜티엄 100MHz PC 를 사용할 경우 A/D,D/A 변환 시간을 제외하고 1회 반복계산은 약 200 μ sec 가 소요되었다. 나머지 시간은 변환 시간에 할당할 수 있으므로 이에 맞는 보드를 선택하여 사용할 수 있다.

본 시뮬레이터가 완성된 후 이를 시험하기 위해 OP-AMP 를 이용 간단히 구성했던 AVR 은 아래 < 그림 3 > 과 같다.



< 그림 3 > AVR Block Diagram

이상에서 기술한 시뮬레이터의 동작을 아래의 < 그림 4 >에 flow chart 로 보였다.



< 그림 4 > 시뮬레이터 flow chart

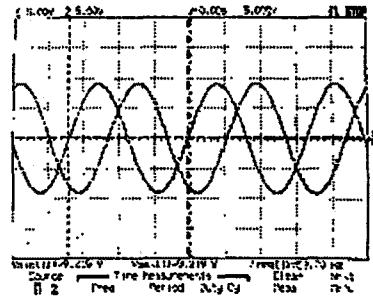
7. 결과

다음 < 그림 6 >는 개발된 시뮬레이터와 < 그림 3 >에 보인 AVR를 접속하여 < 표 1 >과 같은 외란을 프로그램한 결과 회전자 각 δ , 단자전압 E_t , 선전류 I_t , 계자 전압 E_{fd} 를 그리고 터미널 화면을 capture한 것이다. < 그림 5 >는 모의 시험 중에 D/A를 통해 3상중 2상의 선간전압을 출력하여 오실로스코프로 측정된 것이다.

향후 본 시뮬레이터는 실제의 여자기에 접속하여 실험할 예정이다.

< 표 1 > 인가한 외란

외란의 종류	시작시간 (sec)	끝시간 (sec)	설정치 (P.U)
Line switching	10	40	R=0.01 L=0.1
Load 1 switching	30	70	P=0.5 Q=0.2
Load 2 switching	20	70	P=0.3 Q=0.2
Ramp change of mechanical torque	40	70	T=0.1



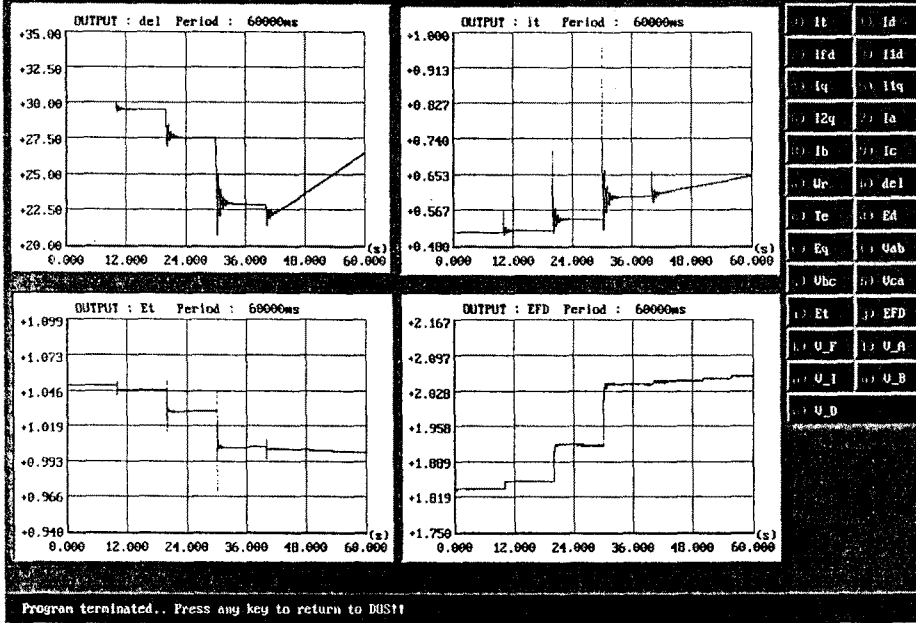
< 그림 5 > 오실로스코프의 선간 전압 파형

참고 문헌

- [1] P.Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [2] Paul C. Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill,
- [3] A.Tumageanian, A.Keyhani, S.I.Moon, L.Xu, Maximum likelihood estimation of synchronous machine parameter from flux decay data, IEEE Trans on industry Application, vol.3, No 2, 1994

본 연구는 한국전기 연구소의 지원으로 수행 되었습니다.

KESI on-line Generator Simulator (ver 1.41)



< 그림 6 > 외란을 인가한 후 터미널 화면