

발전기 실시간 off-line 시뮬레이터 개발에 관한 연구

안중보*, 김석주*, 김종문**, 문승일**
* 한국전기연구소, ** 전북대학교 전기공학과

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

Jong-Bo Ahn*, Seog-Joo Kim*, Jung-Mun Kim**, Seung-Il Moon**
* Korea Electrotechnology Research Institute, ** Chonbuk National University

Abstract

This paper presents a new development of real-time generator simulator which is operating on PC environment. User friendly made interfaces make it possible for any users to utilize the simulator immediately with very little learning efforts. Also, the real-time simulation gives much more practical operation feeling to the users. It provides a very useful tool for analyzing system dynamics and developing the power system control schemes.

종류의 외란을 순차적으로 혹은 동시에 인가할 수 있으며, 발전기, 여자제어기, 전송선로, 부하 등의 파라미터를 임의로 변경할 수 있기 때문에 다양한 시뮬레이션을 할 수 있다. 그리고, 발전기 및 여자의 응답을 실시간적으로 계산하여 그 결과를 터미널에 그래프로 나타내도록 하여 사용자가 실 계통을 다루는 것과 같은 효과를 얻도록 하였고, 사용자가 최소한의 노력으로 사용 방법을 익힐 수 있도록 편리한 인터페이스를 갖추었다. 아울러 사용자 인터페이스를 제외한 모든 부분을 C언어로 작성하여 이식성을 가지게 하였다.

1. 서론

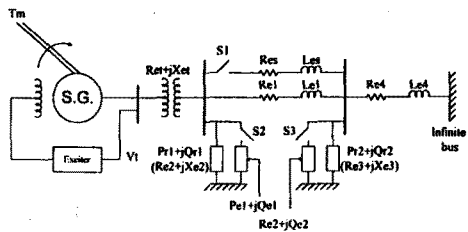
여자 제어기나 Power System Stabilizer(PSS) 등 계통의 안정도 향상을 위한 장치를 개발하는데 있어서, 개발된 장치의 성능을 실제의 계통에 직접 연결해서 테스트하는 것이 이상적이나 이는 계통의 안정성을 해칠 염려가 있어서 시뮬레이터를 이용하여 사전에 충분히 테스트하는 것이 바람직하다. 이러한 목적으로 기존에 개발된 시뮬레이터들은 비록 다양한 기능을 갖추고는 있으나, 계산 속도가 느려 실제 응답 속도와 같이 실시간으로 계산하지 못하고, 그 사용 방법을 익히는 것이 상당히 어려워 많은 시간과 노력을 요구하였다.[1,3]

본 논문은 이러한 기존 시뮬레이터의 단점을 극복하여 사용자가 최소의 노력으로 즉시 활용할 수 있고, 실시간적으로 계산을 수행하는 새로운 시뮬레이터를 소개한다. 본 시뮬레이터는 여러

2. 각 장치의 Modeling

2-1. 전체 System Diagram

Simulation에 사용된 System의 전체 블록도는 아래 <그림1>과 같다.

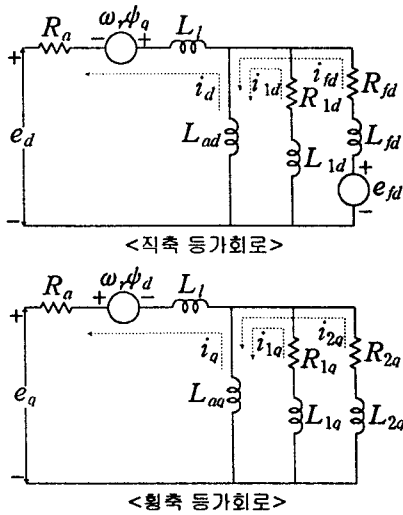


<그림 1> 전체 시스템의 블록 선도
시뮬레이션에 사용된 System은 동기발전기, 여

자기, 전송 Network 및 부하로 구성되었다. 동기 발전기는 터빈과 여자기로부터 기계적 토크 T_m 과 여자 전압 e_{fd} 를 입력 받아 d, q축 전류 i_d, i_q 를 출력으로 내놓는다. 이 때, i_d, i_q 값은 동기발전기의 rotor의 d, q축을 기준으로 한 값이기 때문에 회전자각 δ 를 이용하여 network 입력 i_D, i_Q 로 변환된다. Network은 i_D, i_Q 를 입력받아 e_D, e_Q 를 내놓는데, 이 값 역시 발전기에서 입력으로 사용할 수 있도록 e_d, e_q 로 변환된다. 한편, network의 출력값 e_d, e_q 는 여자의 입력으로 사용되고, 여자는 이 값을 이용하여 여자 전압 E_{FD} 를 출력으로 내놓는다. 역시 이 여자전압 E_{FD} 는 동기발전기의 단위값 e_{fd} 로 변환되고, 변환된 e_{fd} 는 다시 동기발전기의 입력으로 사용된다.

2-2. 동기발전기의 모델링

동기 발전기의 직축, 횡축 등가 회로는 아래의 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 동기 발전기 Standard model 등가 회로

위의 두 등가 회로를 나타내는 동특성 방정식은 다음과 같다. [1]

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

$$e_{fd} = -L_{ad} \dot{i}_d + (L_{ad} + L_{fd}) \dot{i}_{fd} + L_{ad} \dot{i}_{1d} + R_{fd} i_d + f_d \quad (2)$$

$$0 = -L_{ad} \dot{i}_d + L_{ad} \dot{i}_{fd} + (L_{ad} + L_{1d}) \dot{i}_{1d} + R_{1d} i_d \quad (3)$$

$$e_q = -(L_{aq} + L_l) \dot{i}_q + L_{aq} \dot{i}_{1q} + L_{aq} \dot{i}_{2q} - \omega_r (L_{ad} + L_l) i_d + \omega_r L_{ad} i_{fd} + \omega_r L_{ad} i_{1d} - R_a i_q \quad (4)$$

$$0 = -L_{aq} \dot{i}_q + (L_{aq} + L_{1q}) \dot{i}_{1q} + L_{aq} \dot{i}_{2q} + R_{1q} i_q \quad (5)$$

$$0 = -L_{aq} \dot{i}_q + L_{aq} \dot{i}_{1q} + (L_{aq} + L_{2q}) \dot{i}_{2q} + R_{2q} i_q \quad (6)$$

또 이때의 swing 방정식은 다음과 같다.

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

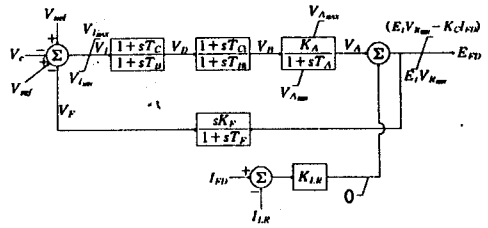
$$\delta = \omega_r \Delta t \quad (8)$$

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

$$T_e = -(L_{ad} + L_l) \dot{i}_d \dot{i}_q + L_{ad} \dot{i}_{fd} \dot{i}_q + L_{ad} \dot{i}_{1d} \dot{i}_q + (L_{aq} + L_l) \dot{i}_q \dot{i}_d - L_{aq} \dot{i}_{1q} \dot{i}_d - L_{aq} \dot{i}_{2q} \dot{i}_d \quad (10)$$

2-3. 여자기 Modeling

본 시뮬레이터에서는 IEEE type ST1A excitation system model을 사용하였다. [2] 이 모델의 블록선도는 아래 <그림 3>과 같다. 이 모델에서는 potential-source controlled-rectifier system이 사용되고 있으며, ceiling 전압에 대한 rectifier 제어의 효과는 K_c 로 표시된다. 이 모델은 직렬 lead-lag compensator와 excitation system stabilizer를 포함하고 있으며, 과도한 여자를 막기 위해 여자전류 limiter가 채용되어 있다.



<그림 3> IEEE type ST1A excitation system model

본 여자의 동적 방정식을 행렬식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_{Bz} \\ V_{Az} \\ V_{Fz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_B} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{T_B - T_{\Omega}}{T_B^2} & -\frac{1}{T_B} & 0 & 0 \\ \frac{K_A T_{\Omega}}{T_A T_B} & \frac{K_A}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_F}{T_F} & -\frac{1}{T_F} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{Bz} \\ V_{Az} \\ V_{Fz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{T_B - T_C}{T_B^2} \\ \frac{T_C(T_B - T_{\Omega})}{T_B^2 T_B} \\ \frac{K_A T_{\Omega} T_C}{T_A T_B T_B} \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ I_{FD} - I_{LR} \end{pmatrix} \quad (11)$$

본 시뮬레이터에서는 선로의 dynamics를 무시하고, Load flow 방식으로 접근하였다. 본 시뮬레이터의 전체적 동작을 <그림4>에 Flow Chart 로 보였다.

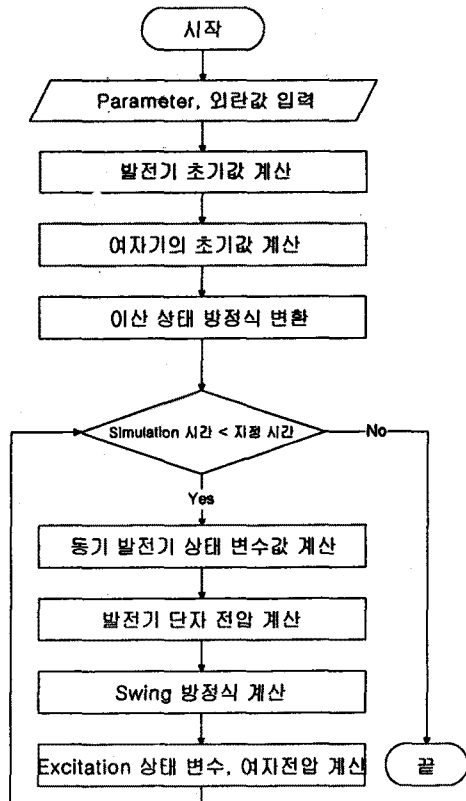
4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용할 외란을 입력하는 인터페이스 화면을 <그림5>에 보였고, 시뮬레이션 결과를 디스플레이하는 화면을 <그림6>에 나타냈다. 이 화면은 정상 상태에서 동작하고 있는, 시스템에 아래의 <표 1>과 같은 외란을 순차적으로 인가했을 때의 발전기의 부하각 δ , 전기적 토오크 T_e , 발전기 단자전압 E , 및 여자기 출력전압 E_{FD} 의 변화를 보인 것이다.

각각의 외란에 대해 시뮬레이터는 <그림6>과 같이 동작한다. 3상 지락 사고가 일어났을 때 결과값들이 발산함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문은 기존의 시뮬레이터들의 단점을 극복하여 사용이 쉽고, 실시간으로 계산하는 새로운 시뮬레이터를 소개하였다. 본 시뮬레이터에는 간단한 방법으로 시뮬레이션에 필요한 파라미터값과 외란을 인가할 수 있으며, 그 결과를 화면에 디스플레이 함으로써 사용자가 현상을 손쉽게 해석할 수 있도록 하였다. 특히 모든 연산을 실시간으로 처리하도록 하여 기존의 시뮬레이터보다 훨씬 더 실제적인 운용 감각을 제공하고 있어 그 활용도가 매우 크다고 할 수 있다.



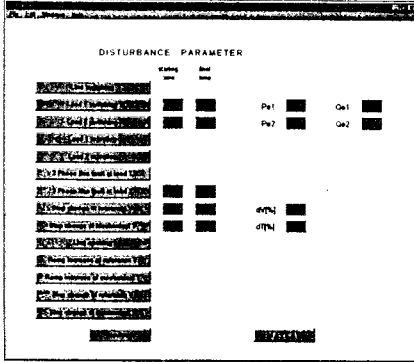
<그림 4> 시뮬레이션 프로그램 Flow Chart

<표 1> 인가한 외란의 종류와 그 값

외란	인가 시간	외란값
발전기단 부하 Pe1, Qe1 추가	10 초	Pe1 = 0.1(pu) Qe1 = 0.05(pu)
여자제어기의 기준전압의 step change	20 초	$\Delta V_{ref} = -1.5(\%)$
무한모선단 부하 Pe2, Qe2 추가	30 초	Pe2 = 0.3(pu) Qe2 = 0.7(pu)
터어빈 토오크의 step change	40 초	$\Delta T_m = 4.5(\%)$
발전기단 부하 Pe1, Qe1 제거	50 초	
무한모선단 부하에서 3상지락 사고	60 초	

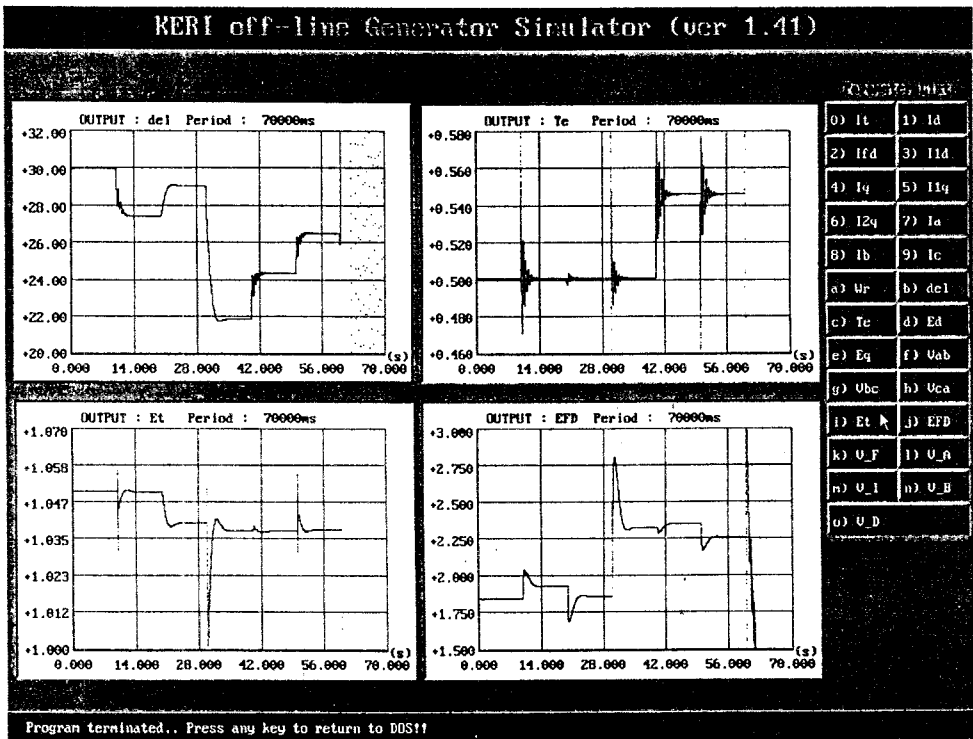
참고 문헌

- [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.



<그림 5> 외란 입력 Interface 화면

본 연구는 한국전기연구소의 지원으로 수행되었습니다.



<그림 6> 시뮬레이션 결과 화면