

## 50kW 계통연계형 디젤발전기의 모델링 및 실험

### Modeling and Experiment of 50kW Diesel Generator in Grid-connected Mode

이 우 종\* · 이 학 주\*\* · 차 한 주†  
(Wujong Lee · Hak Ju Lee · Hanju Chag)

**Abstract** - This paper researches a modeling and experiment of 50kW diesel generator in grid-connected mode. The output of diesel generator can be calculated by the phase difference between voltage and current as well as the diesel generator parameter such as mutual impedance, field current and rotor angle. Considering the different d-q frame impedance, the output of diesel generator is analyzed for equation and verified by simulation. The diesel generator modeled by considering the time delay for actuator, diesel engine and exciter. The controller of diesel generator is divided into governor and exciter. The governor consists of speed controller and active power controller, where speed controller maintains frequency as 60Hz and active power tracks active power reference. On the other hand, the exciter consists of voltage controller and reactive power controller, where voltage controller controls 380V<sub>LL</sub> and reactive power is controlled as zero. When the active power reference is changed as 0.1pu in the grid connected mode, the active power takes 10 seconds to reach the steady state and the reactive power is maintains as zero. The 50kW diesel generator is tested and experiment results are well matched with the simulation results.

**Key Words** : Grid-connected mode, Diesel generator, Governor modeling, Exciter modeling

#### 1. 서 론

도서 지역의 경우 기존의 배전선로를 통하여 전력을 공급하기에 물리적으로 불가능하거나 배전선로를 설치하는데 비용이 너무 많이 소요되는 문제로 인하여 디젤발전기를 이용한 자체적인 전력을 공급해 오고 있다. 하지만, 디젤발전기만을 이용한 전력 공급은 환경오염 문제와 연료비 상승, 그리고 디젤발전기의 효율을 고려하지 않은 운전 등에 의해 원활한 운영이 이루어지지 않는다. 디젤발전기의 경우 정격 전력으로 동작하지 않을 때 효율이 크게 감소하는 단점이 있지만, 항시 정격으로 동작할 수 없기 때문에 효율이 감소하고 그에 따라 연료 소비가 증가한다. 이러한 디젤발전기의 문제점을 인식하고 해결하기 위해 마이크로그리드에 대한 연구가 이루어지고 있으며 현재 적용하고 있다[1].

마이크로그리드는 다수의 분산전원, 에너지 저장장치를 이용하여 수요지에 전력 및 열을 공급하는 소규모의 에너지 공급 시스템으로 계통연계형과 독립형으로 구분된다. 독립형 마이크로그리드는 신재생에너지원인 태양광 발전(PV : Photovoltaic), 에너지 저장장치(ESS : Energy Storage System) 등이 기존의 디젤발전기와 병렬로 결합되어 상호

동작을 수행하는 소규모 전력공급 시스템으로[2], 이러한 독립형 마이크로그리드에 대한 연구가 지속되고 있으며, 설치하여 운전되고 있는 지역도 있다. 독립형 마이크로그리드는 평상 시 신재생에너지원이나 에너지 저장장치를 통해 부하에 전력을 공급하고, 비상시에는 디젤발전기를 전원으로 사용하여 디젤발전기의 부담을 줄여주는 운영방안을 채택한다. 따라서 디젤발전기의 단점을 보완할 수 있는 운영방안이 된다.

독립형 마이크로그리드를 구성하는 태양광발전과 에너지 저장장치에 대한 시뮬레이션 및 해석에 대한 연구는 많이 이루어져 있지만, 실제의 디젤발전기의 동작에 대한 시뮬레이션 구현은 미흡한 상태이다. 기존의 디젤발전기 연구는 디젤발전기의 부하변동에 따른 제어기 분석[3] 및, 디젤엔진에 대한 운전 상태를 분석한 연구[4]-[5]가 있지만, 실제의 디젤발전기에 대한 모델링 연구는 이루어지지 않았다. 독립형 마이크로그리드를 적용함에 앞서 시뮬레이션을 통해 시스템 동작의 타당성과 안정성을 확인하고자 한다면 실제의 디젤발전기에 대한 동작 해석[6]과 디젤발전기를 구성하는 제어기 및 전체 시스템에 대한 모델링[7]-[9]를 확대 적용하여야 한다.

본 논문에서는 계통연계형 디젤발전기의 동작에 대하여 실제의 디젤발전기 파라미터와 디젤발전기 동작의 시정수를 적용하였다. MATLAB/Simulink을 사용하여 50kW 디젤발전기를 모델링하고 시뮬레이션 결과를 확인하였으며, 50kW 디젤발전기 실증 사이트에서 실험 결과와 비교하여 디젤발전기 모델링의 타당성을 증명하였다. 본 논문의 2장에서는 디젤발전기를 구성하는 동기발전기에 대한 출력 해석과 디젤발전기를 구성하는 제어기에 대해 서술하고, 3장에서는

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,  
Chungnam National University, Korea.  
E-mail : hjcha@cnu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea.

\*\* Korea Electric Power Research Institute, Korea.

Received : July 23, 2014; Accepted : September 26, 2014

MATLAB/Simulink로 모델링 된 50kW 디젤발전기의 동작 및 특성을 확인하며, 4장에서는 실증 사이트의 실험을 통해 50kW 디젤발전기의 동작 및 특성의 결과를 서술한다.

## 2. 디젤발전기 해석 및 모델링

디젤발전기는 그림 1과 같이 디젤엔진, 동기발전기로 구성되며 조속기와 AVR로 구성된 제어기를 통해 디젤발전기를 제어하여 구동시킨다. 디젤발전기는 계통과 연계하여 병렬운전으로 동작하고, 계통과 연계되지 않는 경우에는 부하에 직접 전력을 공급하는 독립운전으로 동작한다. 계통연계형 디젤발전기는 한전계통라인과 연결되어 동작하게 되며, 디젤발전기는 계통과 병렬 운전하여 부하에 전력을 추가적으로 공급하는 방식으로 동작하게 된다.

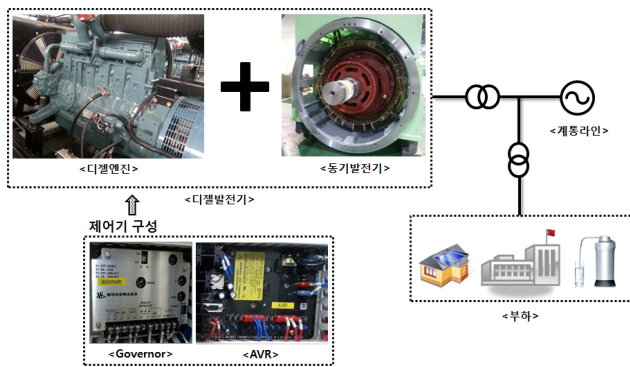


그림 1 디젤발전기 구성  
Fig. 1 Configuration of diesel generator

### 2.1 동기발전기 구조 및 해석

디젤발전기에 사용되는 동기발전기의 구조는 그림 2와 같이 고정자와 회전자로 이루어져 있다. 고정자는 그림 2-(a)로 3상 좌표계가 고정되어 있으며, 각 상전압과 상전류가 발생하고 그에 따라 자계가 발생한다. 회전자는 그림 2-(b)로 동기좌표계로 표현되며 전기적 위상( $\theta$ )에 따라 위상각( $\omega_r$ )만큼 회전하게 된다.

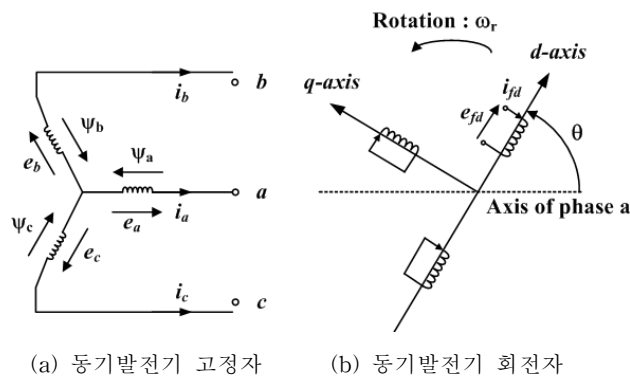


그림 2 동기발전기의 고정자 및 회전자  
Fig. 2 Stator and rotor circuit of a synchronous machine

3상 고정자 전압을 자속으로 표현하면 식(1)~(3)과 같다. 이때의  $p$ 는  $d/dt$ 이고,  $R_a$ 는 고정자 저항이다.

$$e_a = p\psi_a - R_a i_a \quad (1)$$

$$e_b = p\psi_b - R_a i_b \quad (2)$$

$$e_c = p\psi_c - R_a i_c \quad (3)$$

3상 좌표계로 표현된 식(1)~(3)을 동기좌표계로 변환하고 자속을 임피던스로 치환하면 식(4)와 (5)와 같다. 식(4)와 (5)에서  $X_d$ 는 d축 동기좌표계 리액턴스,  $X_q$ 는 q축 동기좌표계 리액턴스이고  $X_{ad}$ 는 상호임피던스이다. 또한 계자전류  $i_{fd}$ 는 식(6)과 같이 표현된다.

$$e_d = -\omega_r \psi_q - R_a i_d = -X_q i_q - R_a i_d \quad (4)$$

$$e_q = \omega_r \psi_d - R_a i_q = -X_d i_d + X_{ad} i_{fd} - R_a i_q \quad (5)$$

$$i_{fd} = \frac{\psi_d + L_d i_d}{L_{ad}} = \frac{e_q + R_a i_q + X_d i_d}{X_{ad}} \quad (6)$$

자속으로 표현된 동기발전기 전압의 수식은 식(1)~(5)과 같이 확인하였다. 수식적인 표현 외에 전압과 전류의 관계에 대하여 알아본다. 동기발전기 전압을 자속으로 표현하지 않고 3상 좌표계의 위상으로 표현한다면 식(7)~(9)와 같고 이를 동기좌표계로 표현하면 식(10), (11)과 같다.  $E_m$ 은 상전압의 크기,  $\omega_s$ 는 각주파수,  $\alpha$ 는  $e_a$ 의 초기 시점에서의 위상각,  $\delta_i$ 는 회전자각,  $E_i$ 는 전기자 상전압의 RMS값이다. 본 논문에서는 모든 수식을 PU법에 의거해 표현하기에  $E_m = E_i$ 로 표현할 수 있다.

$$e_a = E_m \cos(\omega_s t + \alpha) \quad (7)$$

$$e_b = E_m \cos(\omega_s t - 2\pi/3 + \alpha) \quad (8)$$

$$e_c = E_m \cos(\omega_s t + 2\pi/3 + \alpha) \quad (9)$$

$$e_d = E_i \cos(\alpha - \theta_0) = E_i \sin \delta_i \quad (10)$$

$$e_q = E_i \sin(\alpha - \theta_0) = E_i \cos \delta_i \quad (11)$$

그림 3에서  $\phi$ 는 전압과 전류의 위상차이로 유무효전력의 역률과 관계되고,  $\delta_i$ 는 동기발전기에서의 출력전력에 영향을 준다.  $\delta_i$ 는 식(12)로부터 얻을 수 있고 이는 주파수의 변화

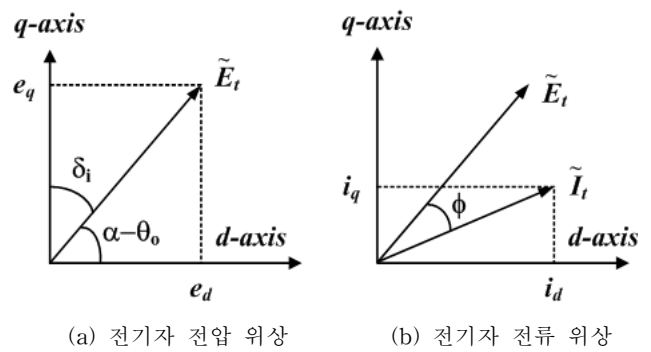


그림 3 전기자 전압 및 전류의 위상  
Fig. 3 Armature voltage and current as phasor

량과 같다.  $\tilde{E}_t$ 와  $\tilde{I}_t$ 는 전기자 전압과 전류의 위상과 크기를 나타내며  $\tilde{E}_t = e_d + j e_q$ ,  $\tilde{I}_t = i_d + j i_q$ 와 같다.

$$\delta_t = \tan^{-1} \left( \frac{X_q I_t \cos \phi - R_a I_t \sin \phi}{E_t + R_a I_t \cos \phi + X_q I_t \sin \phi} \right) = \Delta \omega_r t \quad (12)$$

동기발전기 출력  $P$ 와  $Q$ 는 식(13)과 (14)처럼 위상각  $\phi$ 로부터 계산한다. 역률로부터 동기발전기의 출력을 계산할 수 있지만, 동기발전기 파라미터로부터 출력을 예측 및 계산이 가능하다[6]. 본 논문에서 모델링하고자 하는 50kW 동기발전기는 돌극형으로 d축 임피던스와 q축 임피던스가 서로 다르기 때문에 임피던스간의 다른 부분을 고려하여 디젤발전기의 출력을 예측 및 계산한다. 이때  $R_a$ 는 무시한다. 파라미터를 이용한 돌극형 디젤발전기의 출력은 식 (15)와 (16)과 같이 정리할 수 있다.

$$P = E_t I_t \cos \phi \quad (13)$$

$$Q = E_t I_t \sin \phi \quad (14)$$

$$P = \frac{E_t}{X_q} (X_{ad} i_{fd} - (X_d - X_q) i_d) \sin \delta_t \quad (15)$$

$$Q = \frac{1}{X_d} [E_t (X_{ad} i_{fd} - (X_d - X_q) i_d) - E_t^2] \quad (16)$$

### 2.2 디젤발전기 제어기 모델링

일반적인 디젤발전기의 제어기는 조속기와 여자기로 구성 되어 있다. 조속기(Governor)는 동기발전기의 회전속도를 일정한 값으로 유지하기 위해 사용하는 제어장치로 동기발전기에 기계적인 전력( $P_m$ )을 공급한다. 조속기의 제어 구성은 설정된 전력( $P_{set}$ )에 맞춰 발전하는 유효전력제어와 동기발전기의 속도를 60Hz 주파수를 추종하도록 제어하는 속도제어기가 있다. 그림 4는 조속기의 제어 블록도이다. 유효전력제어기가 외부에, 속도제어기가 내부에 있는 구조로 실제 디젤발전기의 액츄에이터( $\tau_2$ )와 엔진동작( $\tau_1$ )를 고려하여 그림 4

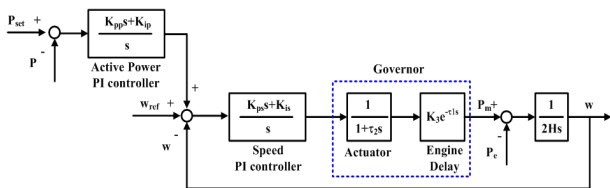


그림 4 조속기 제어기 모델링  
Fig. 4 Governor control block diagram

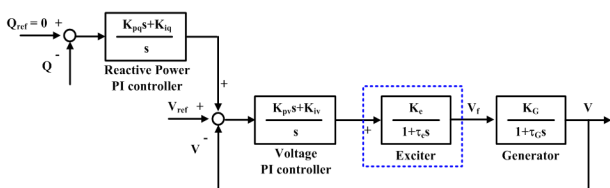


그림 5 여자기 제어기 모델링  
Fig. 5 Exciter control block diagram

와 같이 조속기를 모델링하였다[7-8]. 디젤발전기 조속기의 주동작은 속도제어에 있기 때문에 속도제어기 응답속도가 유효전력제어기의 응답속도에 비해 빠르다.

여자기(Exciter)는 동기발전기의 계자전선에 계자전압 및 계자전류를 공급하는 별개의 발전기로서 동기발전기에서 발생하는 무효전력을 0으로 추종하도록 제어하는 무효전력제어기와 디젤발전기 출력 전압을 1pu(380V<sub>LL</sub>)로 제어하는 전압제어를 수행한다. 또한 계자전압 및 계자전류를 제어함으로써 보호 기능도 수행한다. 그림 5는 여자기의 제어 블록도이다. 무효전력제어기가 외부에, 전압제어기가 내부에 있는 구조로 여자기의 동작딜레이( $\tau_e$ )를 고려하여 모델링하였다[9-10].

### 3. 시뮬레이션 결과

50kVA 계통연계형 디젤발전기 시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 기반으로 모델링하였다. 50kW 디젤발전기의 파라미터와 동기기 파라미터는 표 1과 표 2와 같다. 시뮬레이션에 적용된 표 1과 표 2의 파라미터는 실증사이트에 있는 실제의 50kW 디젤발전기 파라미터를 제작회사에서 제공받아 적용하였다. 그림 6은 계통연계모드로 동작하는 디젤발전기의 시뮬레이션 구성으로 디젤발전기의 동작을 확인하기 위해 계통연계운전으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 디젤발전기 내부의 동기발전기와 조속기 및 여자기의 제어 블록도를 보여준다.

표 1 디젤발전기 제어기 파라미터

Table 1 Diesel generator controller parameter

정격전력	50kW
정격전압	380VLL
엔진동작딜레이 ( $\tau_1$ )	0.25s
액츄에이터 ( $\tau_2$ )	0.2s
여자기동작딜레이 ( $\tau_e$ )	0.046s
관성계수 ( $H$ )	2.4s
극	2

표 2 디젤발전기 동기기 파라미터

Table 2 Synchronous generator parameter

파라미터	PU
Synchronous d-axis reactance	2.209
Transient d-axis reactance	0.227
Subtransient d-axis reactance	0.141
Synchronous q-axis reactance	1.047
Subtransient q-axis reactance	0.16
Leakage reactance	0.017

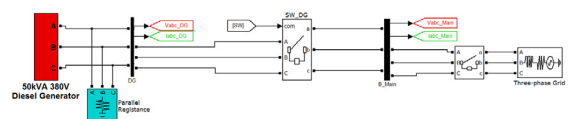


그림 6 디젤발전기 시뮬레이션 구성  
Fig. 6 Configuration of diesel generator simulation

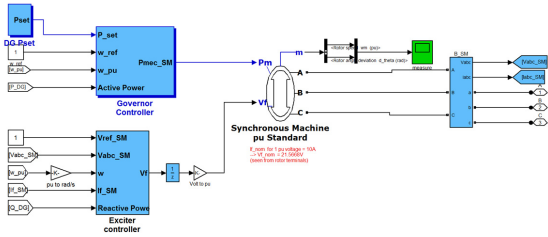


그림 7 디젤발전기 제어기  
Fig. 7 Diesel generator controller

디젤발전기의 동작을 확인하기 위하여 계통연계운전으로 시뮬레이션을 수행하고 조속기의 유효전력제어와 여자기의 무효전력제어의 동작 및 응답특성을 확인한다.

그림 8은 유효전력제어기의 지령값  $P_{set}$ 을 초기 0pu에서 0.4pu(20kW)로 증가시켰을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 8-(a)는 0pu에서 0.4pu까지 증가된 유효전력 지령값  $P_{set}$  (파란색)을 디젤발전기의 유효전력(빨간색)이 40초의 정상상태 도달 시간을 가지며  $P_{set}$ 을 추종하고 있음을 보여준다. 무효전력은 그림 8-(b)와 같이 0에 수렴한다. 그림 8-(c)에서 전압크기는 1pu로 일정하고 전류크기는 0pu에서 0.4pu까지 도달하는데 40초의 정상상태 도달시간을 갖는다. 전압과 전류는 동상으로, 계통으로 20kW만큼 발전하고 있음을 그림 8(d)에서 확인할 수 있다.

디젤발전기가 20kW로 발전하고 있을 때, 시뮬레이션에서 확인되는 유효전력은 20kW, 무효전력은 0Var, 회전자각은 22.1°이다. 시뮬레이션에서 출력되는 결과를 참고하여 식 (12), (15), (16)으로부터 유효전력, 무효전력 그리고 회전자각을 계산하면 유효전력은 19.8kW, 무효전력은 420Var, 회전자각은 23.3°로 시뮬레이션 결과와 비교하여 유효전력은 1%, 무효전력은 2.1%의 오차가 있지만 시뮬레이션과 수식 계산과의 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

그림 9는 유효전력제어기의 지령값  $P_{set}$ 을 초기 0.4pu에서 0.8pu(40kW)로 증가시켰을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 9(a)는 0.4pu에서 0.8pu까지 증가된 유효전력 지령값  $P_{set}$  (파란색)을 디젤발전기의 유효전력(빨간색)이 40초의 정상상태 도달 시간을 가지며  $P_{set}$ 을 추종하고 있음을 보여준다. 무효전력은 그림 9-(b)와 같이 0에 수렴한다. 그림 9-(c)에서 전압크기는 1pu로 일정하고 전류크기는 0.4pu에서 0.8pu까지 도달하는데 40초의 정상상태 도달시간을 갖는다. 전압과 전류는 동상으로, 계통으로 40kW만큼 발전하고 있음을 그림 9(d)에서 확인할 수 있다.

디젤발전기가 40kW로 발전하고 있을 때, 시뮬레이션에서 확인되는 유효전력은 40kW, 무효전력은 0Var, 회전자각은 38.4°이다. 시뮬레이션에서 출력되는 결과를 참고하여 식 (12), (15), (16)으로부터 유효전력, 무효전력 그리고 회전자각을 계산하면 유효전력은 39.8kW, 무효전력은 1kVar, 회전자각은 39.5°로 시뮬레이션 결과와 비교하여 유효전력은 0.5%, 무효전력은 2.5%의 오차가 있지만 시뮬레이션과 수식 계산과의 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

그림 10은 유효전력제어기의 지령값  $P_{set}$ 을 초기 0.8pu에서 0.4pu로 감소시켰을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 10(a)는 0.8pu에서 0.4pu까지 감소된 유효전력 지령값  $P_{set}$

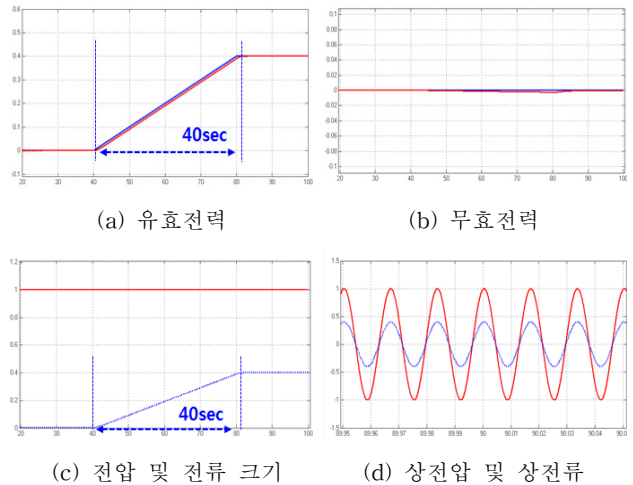


그림 8  $P_{set}$  0pu→0.4pu로 증가시킨 경우 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Simulation results when  $P_{set}$  increases from 0pu to 0.4pu

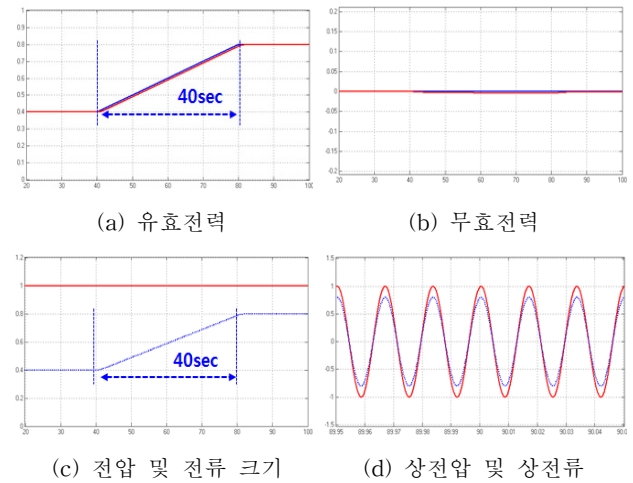


그림 9  $P_{set}$  0.4pu→0.8pu로 증가시킨 경우 시뮬레이션 결과  
Fig. 9 Simulation results when  $P_{set}$  increases from 0.4pu to 0.8pu

(파란색)을 디젤발전기의 유효전력(빨간색)이 40초의 정상상태 도달 시간을 가지며  $P_{set}$ 을 추종하고 있음을 보여준다. 무효전력은 그림 10(b)와 같이 0에 수렴한다. 그림 10-(c)에서 전압크기는 1pu로 일정하고 전류크기는 0.8pu에서 0.4pu까지 도달하는데 40초의 정상상태 도달시간을 갖는다. 전압과 전류는 동상으로, 계통으로 20kW만큼 발전하고 있음을 그림 10(d)에서 확인할 수 있다.

디젤발전기가 20kW로 발전하고 있을 때, 시뮬레이션에서 확인되는 유효전력은 20kW, 무효전력은 0Var, 회전자각은 22.1°이다. 시뮬레이션에서 출력되는 결과를 참고하여 식 (12), (15), (16)으로부터 유효전력, 무효전력 그리고 회전자각을 계산하면 유효전력은 19.8kW, 무효전력은 420Var, 회전자각은 23.3°로 시뮬레이션 결과와 비교하여 유효전력은 1%, 무효전력은 2.1%의 오차가 있지만 시뮬레이션과 수식 계산과의 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

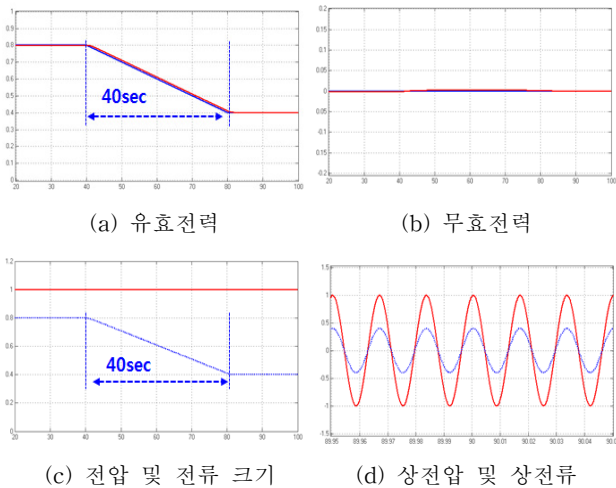


그림 10  $P_{set}$  0.8pu→0.4pu로 감소시킨 경우 시뮬레이션 결과  
 Fig. 10 Simulation results when  $P_{set}$  increases from 0.8pu to 0.4pu

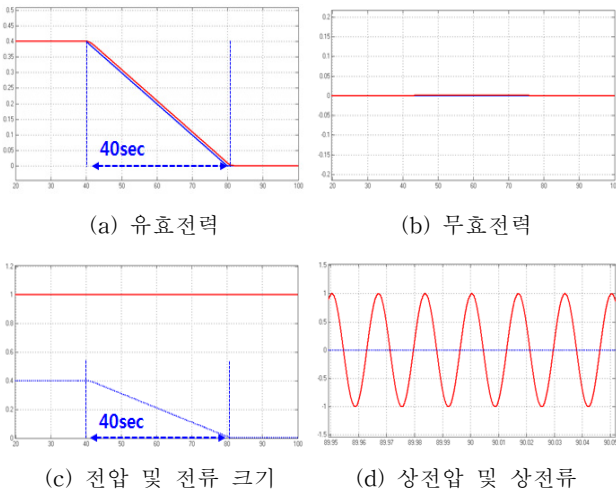


그림 11  $P_{set}$  0.4pu→0pu로 감소시킨 경우 시뮬레이션 결과  
 Fig. 11 Simulation results when  $P_{set}$  increases from 0.4pu to 0pu

그림 11은 유효전력제어기의 지령값  $P_{set}$ 을 초기 0.4pu에서 0pu로 감소시켰을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 11-(a)는 0.4pu에서 0pu까지 감소된 유효전력 지령값  $P_{set}$  (파란색)을 디젤발전기의 유효전력(빨간색)이 40초의 정상상태 도달 시간을 가지며  $P_{set}$ 을 추종하고 있음을 보여준다. 무효전력은 그림 11-(b)와 같이 0에 수렴한다. 그림 11-(c)에서 전압크기는 1pu로 일정하고 전류크기는 0.4pu에서 0pu까지 도달하는데 40초의 정상상태 도달시간을 갖는다. 전압과 전류는 동상으로, 계통으로 0W만큼 발전하고 있음을 그림 11-(d)에서 확인할 수 있다.

디젤발전기 출력은 0W로 대기상태에 있을 때, 시뮬레이션에서 확인되는 유효전력은 0W, 무효전력은 0Var, 회전자 각은 0°이다. 시뮬레이션에서 출력되는 결과를 참고하여 식 (12), (15), (16)으로부터 유효전력, 무효전력 그리고 회전자 각을 계산하면 유효전력은 0W, 무효전력은 5.5Var, 회전자

각은 0.9°로 시뮬레이션과 수식계산과의 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

그림 12는 계통연계형 50kW 디젤발전기를 구현한 실증 사이트이다. 그림 12(a)는 50kVA 디젤발전기, 그림 12(b)는 디젤발전기 제어 프로그램, 그림 12(c)는 디젤발전기 제어반, 그림 12(d)는 부하 및 계통 분전반이다. 디젤발전기는 통신을 이용하여 그림 12(b)와 같은 EMS로 제어하고, 디젤발전기의 정격 및 파라미터는 표 1, 2와 같다. 디젤발전기 출력의 결과는 DSP28335 제어보드를 사용하여 측정하였다.

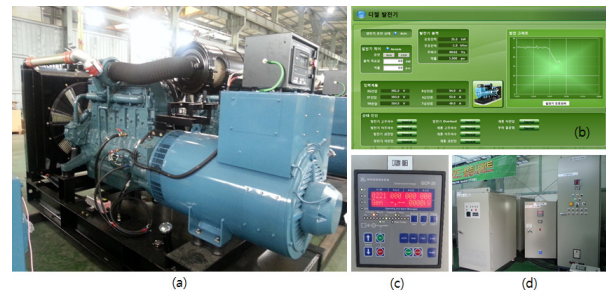


그림 12 디젤발전기 실증 사이트  
 Fig. 12 The demonstration sites of diesel generator

그림 13은 계통연계운전에서  $P_{set}$ 을 0W에서 40kW로 증가시켰을 경우의 실험 결과이다. 그림 13-(a)는 디젤발전기 전압 크기(Ch.1 100V/div), 디젤발전기 전류 크기(Ch.2 20A/div), 유효전력(Ch.3 10kW/div), 무효전력(Ch.4 10kVar/div)을 보여준다. 유효전력은 0W에서  $P_{set}$ 이 변함에 따라 정상상태 40kW까지 80초가 소요되고 전류 크기도 동일한 시간으로 상승한다. 무효전력은 초기 디젤발전기가 구동하기 전에는 유도성 부하로 동작하기에 음의 무효전력이 발생하지만, 디젤발전기가 발전하면서 3.1kVar로 바뀐다. 전압은 디젤발전기가 발전하여도 그 크기는 변하지 않고 311V<sub>peak</sub>를 유지한다. 그림 13-(b)는 디젤발전기가 40kVA만큼 발전하고 있을 경우의  $V_r$ (Ch.1)과  $I_r$ (Ch.2)로, 전압과 전류의 위상 차이는 약 4.4°로 역률 0.997을 보이며 동상에 가깝게 출력된다.

그림 14는 계통연계운전에서  $P_{set}$ 을 40kW에서 0W로 감소시켰을 경우의 실험 결과이다. 그림 14-(a)는 디젤발전기 전압 크기(Ch.1 100V/div), 디젤발전기 전류 크기(Ch.2 20A/div), 유효전력(Ch.3 10kW/div), 무효전력(Ch.4 10kVar/div)을 보여준다. 유효전력은 40kW에서  $P_{set}$ 이 변함에 따라 정상상태 0W까지 80초가 소요되고 전류 크기도 동일한 시간으로 감소한다. 무효전력은 디젤발전기가 40kVA로 발전하고 있는 경우에는 3.2kVar이지만, 유효전력이 0W로 제어되면 다시 유도성 부하로 동작하여 -2.8kVar로 변한다. 전압은 디젤발전기의 발전량이 감소하여도 그 크기는 변하지 않고 311V<sub>peak</sub>를 유지한다. 그림 14-(b)는 디젤발전기가 0VA로 발전하고 있지 않는 경우의  $V_r$ (Ch.1)과  $I_r$ (Ch.2)로, 전류는 무효성분만이 출력된다.

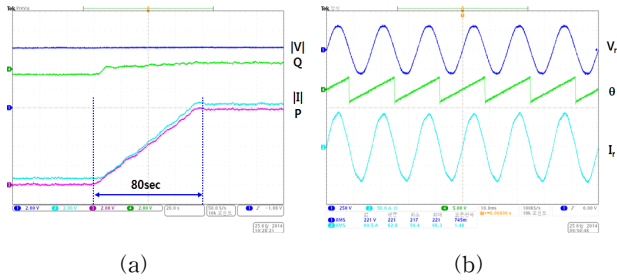


그림 13  $P_{set}$ 을 0W→40kW로 증가시킨 경우의 실험 결과  
 Fig. 13 Experiment results when  $P_{set}$  increases from 0W to 40kW

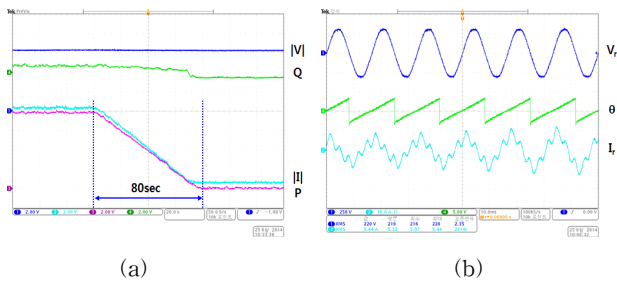


그림 14  $P_{set}$ 을 40kW→0W로 감소시킨 경우의 실험 결과  
 Fig. 14 Experiment results when  $P_{set}$  decreases from 40kW to 0W

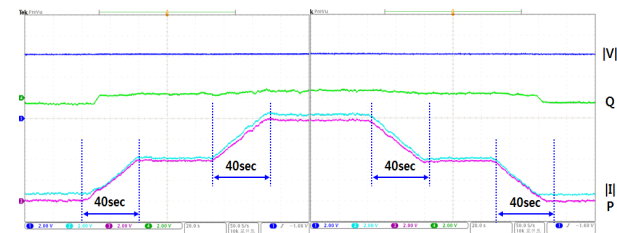


그림 15  $P_{set}$  지령치 변화에 따른 실험 결과  
 Fig. 15 Experiment results when  $P_{set}$  is variable value

그림 15은 계통연계운전에서  $P_{set}$ 을 0W에서 20kW, 40kW로 증가시키고 다시 40kW에서 20kW, 0W로 감소 시킨 실험과형 결과이다. 디젤발전기 전압 크기(Ch.1 100V/div), 디젤발전기 전류 크기(Ch.2 20A/div), 유효전력(Ch.3 10kW/div), 무효전력(Ch.4 10kVar/div)이다.  $P_{set}$ 이 20kW씩 증가 또는 감소하는 경우 디젤발전기의 유효전력이 지령값을 추종하여 정상상태까지 도달하는데 20kW당 40초 소요된다. 이는 시뮬레이션 결과와 동일한 정상상태 도달시간을 갖는다. 유효전력의 변화에 따라 전류가 변하는 시간도 동일한 소요시간을 가지며, 유효전력이 바뀌어도 전압은 일정하게 유지된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 50kW 계통연계형 디젤발전기의 동작을 해석하고 모델링하였다. 디젤발전기 출력  $P$ 와  $Q$ 는 전압과

전류의 위상으로 계산할 수 있는 것뿐만 아니라 상호임피던스( $X_{ad}$ ), 계자전류( $i_{fd}$ ) 그리고 회전자각( $\delta_i$ )으로 계산이 가능하고, 이러한 파라미터로 계산할 경우  $X_d$ 와  $X_q$ 의 서로 다른 임피던스 차이를 고려하여 돌극형 디젤발전기의 유효전력과 무효전력의 수식을 해석하였다. 디젤발전기 제어는 조속기와 여자기로 구성되고 실제의 액츄에이터, 엔진 동작, 여자기 동작을 고려하여 MATLAB/Simulink로 50kVA 디젤발전기를 모델링하였다. 조속기는 유효전력제어기와 속도제어기로 구성되고, 여자는 무효전력제어기와 전압제어기로 구성된다. 시뮬레이션 결과 계통연계운전 시 유효전력은 지령에 따라 0.1pu당 10초의 정상상태 도달시간을 갖고, 무효전력은 0으로 추종한다. 디젤발전기 실증 사이트에서 실험한 결과 계통연계운전 시 유효전력이 0.1pu 변화됨에 따라 10초의 정상상태 도달시간을 가지며 유효전력은 증가하고 무효전력은 0VA를 추종한다. 실험과 시뮬레이션을 비교한 결과 두 결과가 일치함을 보여 MATLAB/Simulink를 이용한 디젤발전기의 모델링이 올바르게 되었음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다. (No.20123010020080).

### References

- [1] A. Elmitwally, Mohamed Rashed, "Flexible Operation Strategy for an Isolated PV-Diesel Microgrid Without Energy Storage", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.26, No.1, March, 2011.
- [2] S.Mishra, D.Ramsasubramanianm and P.C.Sekhar, "A Seamless Control Methodology for a Grid Connected and Isolated PV-Diesel Microgrid", IEEE Trans. on Power System, Vol.28, No.4, November, 2013.
- [3] Sang-Seok Han, Hoo-sek Han, Chang-Goo Lee, "A Study on the Controller Developmetn Depending Load Variation of a Diesel Generator for Power System Connection of Distributed-source", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.22, No.5, pp 53-57, May, 2008.
- [4] J.H.Park, K.H.Choi, S.G.Lee, "Analysis and Evaluation Study on Diesel Generator Engine Operation Signature", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.13, No.5, pp 82-88, Oct, 2009.
- [5] J.H.Park, K.H.Choi, S.G.Lee, "Analysis and Evaluation Study on Diesel Generator Engine Operation Signature", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.13, No.5, pp 82-88, Oct, 2009.

- [6] Prabha Kunder, "Power System Stability and Control", Electric Power Research Institute.
- [7] S.Roy, O.P.Malik and G.S.Hope, "An Adaptive Control Scheme for Speed Control of Diesel Driven Power-Plants", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.6, No.4, December, 1991.
- [8] G.S.Stavarakakis, G.N.Kariniotakis, "A General Simulation Algorithm for The Accurate Assessment of Isolated Diesel - Wind Turbines Systems Interaction. Part I: A General Multimachine Power System Model", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No.3, September, 1995.
- [9] "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Standard, 1992.
- [10] Ahmad Darabi, Colin Tindall, and Stuart Ferguson, "Finite-Element Time-Step Coupled Generator, Load, AVR, and Brushless Exciter Modeling" IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.19, No.2, June 2004.

## 저 자 소 개



### 이 우 종(Wujong Lee)

2009년 충남대 전기공학과 졸업  
 2011년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업  
 2011년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중.



### 이 학 주(Hak Ju Lee)

1966년 12월 5일생  
 1989년 충남대학교 전기공학과 졸업  
 1991년 동 대학원 전기공학 석사 졸업  
 2004년 동 대학원 전기공학 박사 졸업  
 1995년 한전 전력연구원 선임연구원  
 2014년~現 한전 전력연구원 책임연구원  
 Tel : 042-865-5982, Fax : 042-865-5944  
 E-mail : juree@kepco.co.kr



### 차 한 주(Hanju Chag)

1988년 서울대 전기공학과 졸업, 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사), 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박), 1990~2001년 LG 산전 연구소 책임연구원, 2009년 미국 United Technology Research Center 방문 교수, 2005년~현재 충남대학교 전기공학과 교수.