

계통연계형 열병합발전시스템의 시뮬레이션모델

정종규, 윤동진, 권기현, 한병문  
명지대학교

Simulation Model of AC Interconnection System for  
CHP(Combined Heat and Power) Generationn

Jong-kyou Jeong, Dong-Jin Yun, Ki-Hyun Kwon, Byung-Moon Han  
Myongji University

**Abstract** - 본 논문은 계통연계형 열병합발전의 동작특성을 모의하는 시뮬레이션모델에 관해 기술하고 있다. 계통연계형 열병합발전은 가스엔진, 영구자석발전기, 전력변환기로 구성되어 있는데 본 연구에서는 가스엔진을 일정출력을 공급하고 다극형 영구자석발전기에서 생산되는 400Hz 출력을 컨버터와 인버터를 통하여 상용주파수의 교류로 전력계통과 연계하는 것으로 가정하였다. 개발된 시뮬레이션모델은 PSCAD/EMTDC를 이용하였고 전력회로는 내장모듈을 그리고 제어기는 C 프로그램으로 직접 개발하였다. 개발된 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션모델을 이용한 다양한 시뮬레이션을 실시하여 하드웨어 시뮬레이터를 설계하였다.

1. 서 론

열병합발전은 석유, 가스등의 1차 에너지로 원동기를 구동하여 전기를 생산하고, 이때 발생하는 폐열을 회수하여 유효 열로 이용함으로써 종합에너지 이용효율이 종래의 방식보다 높은 경제적인 발전방식이다.[1] 화석에너지의 고갈과 이산화탄소 배출에 따른 환경오염문제가 심각해지면서 각국은 대체에너지 개발에 많은 투자를 하고 있다.

열병합발전은 발전과정에서 발생하는 폐열을 이용함으로써 총 에너지 이용효율이 높고, 연료를 천연가스로 이용할 경우에는 청정에너지원으로써 환경오염저감에도 효과가 있다. 이에 따라 유럽과 일본 등에서는 점차 공급이 확산되어 가고 있으며, 우리나라에서도 2013년까지 열병합발전의 보급을 270만kW까지 중대시킴 계획이다.

향후 열병합발전이 보급이 되면 대부분 계통연계형으로 운전될 것이 예상되므로 안정된 계통운용을 위해서는 여러 가지 운전상황을 미리 모의할 수 있는 열병합발전시스템의 시뮬레이션 모델이 요구된다.[2] 따라서 본 연구에서는 열병합발전시스템을 모의하기위한 시뮬레이터 개발에 앞서 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션모델을 개발 하였다.

2. 본 론

2.1 열병합발전시스템의 특성

열병합발전의 특성을 장점과 단점으로 나누어서 살펴 보면 다음과 같다. 그림 1은 열병합발전의 가장 큰 장점을 보여주고 있다. 종래의 발전방식은 발전과정에서 폐열로 60%정도의 손실이 발생되고, 수송가와 멀리 떨어진 발전소에서 송전을 하는 동안에 송전손실이 발생한다. 이러한 손실로 인하여 종합에너지 이용효율은 30~35%밖에 되지 않는다. 하지만 열병합발전에서는 그림 1과 같이 에너지 이용효율이 약 75~85%로 거의 2배에서 3배 가까이 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 소용량 열병합발전은 분산형 전원으로 수용가에 가깝게 설치되면 부하전력 피크 시에도 안정된 전력수급에 기여한다.

그리고 설치장소의 제한이 거의 없으므로 빌딩형 DC micro-grid의 구성원으로서 적합하다. 마지막으로 청정연료인 도시가스 이용 시 환경공해 문제저감에 기여한다. 하지만 단점으로는 초기투자비가 비교적 크고, 향후 연료비의 불확실성이 있다. 또한 열 및 전력수요의 비율이 적절치 않으면 에너지 이용효율이 떨어진다는 단점도 있다. 하지만 열병합발전시스템의 연구가 활발해지면서 문제점들은 점차 개선되고 있다.

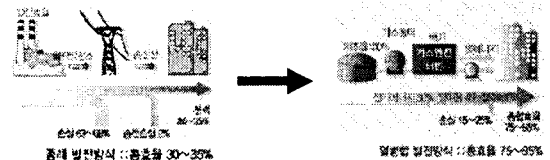


그림 1. 열병합발전방식의 특성

2.2 열병합발전시스템의 구성

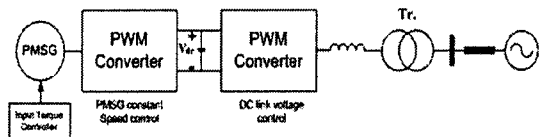


그림 2. 열병합발전시스템 구성도

그림 2는 본 논문에서 기술하고 있는 소용량 열병합발전시스템의 구성을 나타낸 것이다. 발전기는 다극형 PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator)를 사용하였고,[3] 발전기의 속도를 일정하게 유지하는 발전기 측 컨버터와 DC link전압을 일정하게 유지시키는 계통 측 컨버터를 이용하여 전력의 흐름을 양방향으로 제어하고 있다. 각 컨버터의 무효전력제어는 독립적으로 이루어지고 있다. 발전기의 출력전력량은 발전기를 일정속도로 제어하는 발전기 측 컨버터에 의해 발전기로 입력되는 토크의 크기에 비례적으로 증가하도록 제어하고 있다.

표 1. PMSG Parameter

Frequency	400 Hz
Phase / wire	3phase 3wire
Output	3 kW
Voltage	220 V
Running Current	7.9 A
Pole	28

표 1은 하드웨어 시뮬레이터를 개발하기위해 사용된 PMSG model과 Parameter를 나타냈다. 이 모델을

PSCAD/EMTDC 라이브러리에서 제공된 Synchronous machine을 이용해서 모델링하고 시뮬레이션을 수행했다.[4]

### 2.3 PSCAD/EMTDC Simulation

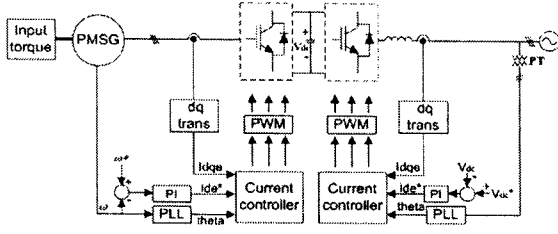


그림 3. 제어 구성도

그림 3은 열병합발전용 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션하기 위한 제어구성도이다. 제어기의 구성은 크게 2부분으로 나눌 수 있다. 먼저 발전기 측 컨버터를 제어하기 위한 MSC(Machine Side Converter)의 제어기 구성을 살펴보겠다. MSC를 제어하기 위한 전류제어기의 동기위상각  $\theta$ 를 생성하기 위해서는 발전기의 속도를 센싱해서 PLL제어기를 거쳐서 전류제어를 위한 동기위상각을 계산을 통해 생성한다. 전류제어기의 전류 기준값은 발전기의 속도를 센싱해서 속도 기준값과 비교한 오차가 PI제어기를 거쳐서 전류제어기의 전류 기준값  $I_d^*$ 를 생성한다. 3상전류는 dq변환을 통해서 Id 성분과 Iq 성분으로 나누어지고 전류 기준값과 비교되어 결과적으로 PWM신호를 생성한다. 생성된 PWM신호는 제어목적에 맞도록 스위치를 동작시킨다. 다음은 계통 측 컨버터를 제어하기 위한 GSC(Grid Side Converter)의 제어기 구성을 살펴보겠다. GSC의 제어목적은 DC link전압을 원하는  $V_{dc}^*$ 값으로 일정하게 유지하는 것이다. GSC가 일정하게 DC link전압을 유지함에 따라 PMSG에서 발생된 전력은 계통으로 전달된다. GSC의 전류제어기의 동기위상각  $\theta$ 는 계통 측 3상 평형전압을 센싱해서 PLL제어기를 거쳐서 생성되고,  $V_{dc}^*$ 와 측정값  $V_{dc}$ 를 비교하여 만들어진 오차는 PI제어기를 거쳐 계통 측 인버터의 d축 전류 기준값을 만든다. 계통 측 전류제어기에서 생성된 전류 기준값과 발전기 측 전류제어기의 d축 전류의 합이 계통 측 전류제어기의 d축 전류의 기준값으로 입력되어 결과적으로 계통 측 인버터의 PWM신호를 생성한다. 발전기 측 컨버터의 d축 전류제어를 실시할 경우 DC link전압이 감소하는 경우를 방지하기 위해 전압제어기에서 생성된 기준값에 발전기 측 전류제어기의 d축 기준전류를 합한다.

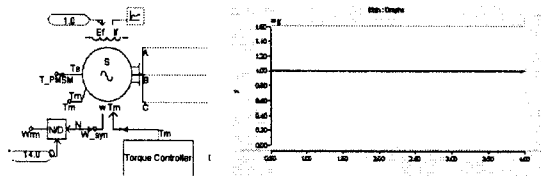


그림 4. 발전기 모델과 여자전류파형

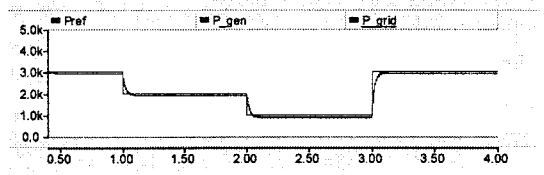
그림 4는 표 1의 발전기 모델을 PSCAD/EMTDC 라이브러리에서 제공하는 Synchronous machine을 이용해서 모델링한 그림과 영구자석동기발전기를 모의하기 위하여 정 전류원으로 동작시킨 결과파형을 나타낸 것이다. 권선동기발전기에서 권선에 흐르는 전류를 일정하게 제어하면 영구자석동기발전기와 비슷한 특성을 얻을 수 있다는 점을 이용해서 위와 같은 모델을 구성했다. 발전기의 출력전력의 변화에도 불구하고 if의 파형이 일정하게 유지되는 것을 확인함으로써 영구자석동기발전기의 모델

이 구현된 것을 알 수 있다. 시뮬레이션은 표 2와 같은 시나리오로 수행하였다. 부하변동에 따른 열병합발전시스템의 출력변동을 가정하고 발전전력이 변동하는 동안 각 부의 파형을 관찰함으로써 전체 시스템의 제어가 잘 이루어지고 있는지를 확인하였다.

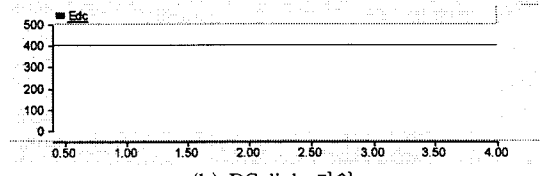
표 2. 시뮬레이션 시나리오

시간[s]	0~0.4	0.4~1	1~2	2~3	3~4
Pref[kW]	0	3	2	1	3

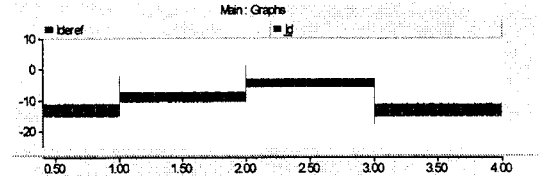
그림 5(a)는 발전기의 출력 기준값(Pref)에 따른 발전기의 출력전력(P\_gen)과 계통으로 전달되는 전력(P\_grid)을 나타낸 것이다. Pref는 발전기의 출력전력의 기준값으로 부하에서 필요로 하는 전력량이 정해지면 Pref가 정해지고 발전기의 입력토크의 크기는 발전기의 출력이 Pref를 추종하는 P\_gen이 되도록 하는 값으로 설정되어 발전기로 입력된다. 그림 5(b)는 DC link전압을 나타낸 것이다. 계통 측 컨버터에서는 DC link 전압을 400V로 일정하게 제어하고 있으므로 DC link 전압은 시뮬레이션을 하는 동안 일정하게 유지가 되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 발전기 측 전류제어기의 기준전류(idref)와 실제전류(id)를 나타낸 것이다. 발전기를 일정속도로 제어하기 위해 생성한 기준전류를 실제 전류가 잘 추종함으로써 제어가 잘 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(d)는 계통 측 전류제어기의 기준전류(idrefa)와 실제전류(ida)를 나타낸 것이다. DC link 전압을 일정하게 제어하기 위해 생성한 기준전류를 실제 전류가 잘 추종함으로써 제어가 잘 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 계통 측 전류제어기에는 전향 보상 전류(idrefa)가 포함되어 있다.



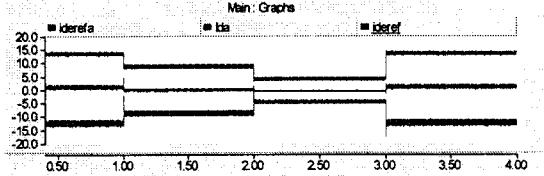
(a) 발전기 출력전력, 계통전력



(b) DC link 전압



(c) 발전기 측 컨버터 전류제어



(d) 계통 측 컨버터 전류제어

그림 5. 시뮬레이션 결과 파형

그림 6은 계통 측 컨버터의 출력전압, 전류파형을 나타낸 것이다. 컨버터의 출력전압은 계통과 동기를 맞추기 위해 수행된 PLL제어에 의해 상용주파수의 교류로 전력계통과 연계되고 있다. 컨버터의 출력전류 역시 상용주파수로 깨끗한 정현파가 출력되고 있다.

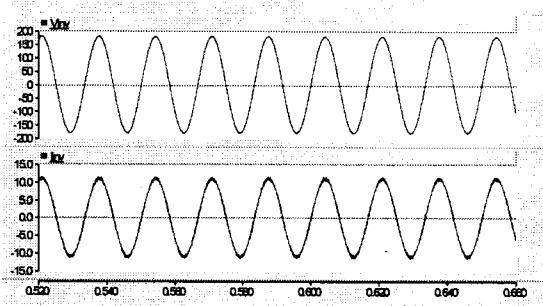


그림 6. 인버터 출력전압, 전류

## 2.4 하드웨어 시뮬레이터

그림 7은 본 연구를 토대로 구성계획중인 하드웨어 시뮬레이터의 구성을 나타낸 그림이다. 시뮬레이션에 사용된 발전기 모델과 전력변환기의 용량 및 기타 파라미터를 기초로 하드웨어 시뮬레이터를 개발할 예정이다. 열병합발전시스템에서 사용된 발전기는 출력전력의 주파수가 400Hz로 상용주파수보다 높다. 높은 주파수의 출력이 원활하게 제어되는 것을 시뮬레이션을 통해서 확인하였고, 출력의 변동이 있을 때 역시 시스템의 과도특성이 안정적인 것을 확인하였다. 열병합발전시스템은 유도전동기와 다극형 PMSG를 이용한 MG-set을 이용하여 모의하도록 할 예정이다. MG-set의 유도전동기는 4극 7.5kW용량으로 엔진을 대신해서 발전기에 토크를 입력해 준다. 발전기는 표 1에서 설명한 28극 3kW용량으로 선정하였다. 백투백 컨버터의 용량은 10kW이고, 계통연계 리액터는 3[mH]를 선정하였다. 발전기에서 출력된 전력은 백투백 컨버터를 통해서 계통과 연계된다.

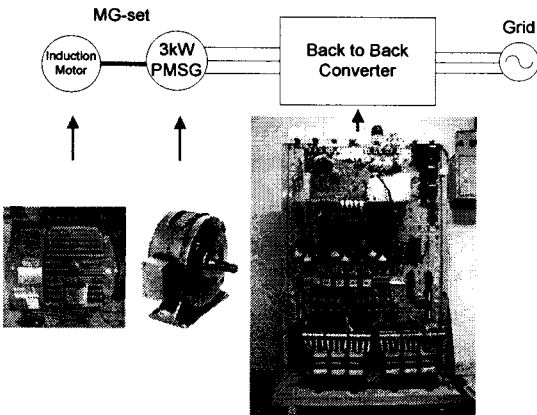


그림 7. 하드웨어 시뮬레이터 구성도

시스템을 운용하기위한 제어보드는 Texas Instrument사가 개발한 실수형 DSP(Digital Signal Processor)인 TMS320vc33-150와 Altera사에서 개발한 100,000 게이트 EPLD인 EP1K100QC208을 사용하였으며 그밖에 ADC 24ch, DAC 4ch, Digital Input 4ch, Digital Output 4ch, Encoder pulse input 1 module, RS232 port 1개 RS485 port 2개로 구성되어져 있다. TMS320vc33은 저가의 산

업용 DSP로서 150MHz의 clock cycle을 사용하며 Instruction cycle은 13.3nsec로 150MFLOPS의 성능을 가진다. 메모리는 내부에 1.1Mbit SRAM이 내장되어 있으며 4개의 외부 인터럽트와 타이머 인터럽트 2개를 가지고 있다. 그리고 SPI serial interface를 지원한다. EPLD(EP1K100QC208)에는 Address decoding logic, 2-set PWM logic, protection logic, ADC control logic 등으로 구성되어 있습니다. ADC는 24ch를 받을 수 있으며 4ch씩 동시 샘플링이 가능하다. 그러므로 하나당 2.5us씩 총 10us의 변환시간이 소요된다. 즉, Analog를 Digital로 바꾸는데 10kHz 제어 주기 시 90us의 여유시간이 있는 것이다. DAC는 Debugging용으로 8ch이 있다. Digital Input 4채널과 Digital Output 4채널은 외부 Relay를 구동하는데 사용되며 사용자 Interface용으로 사용된다. 그림 8는 제어보드 구성을 나타낸 것이다.

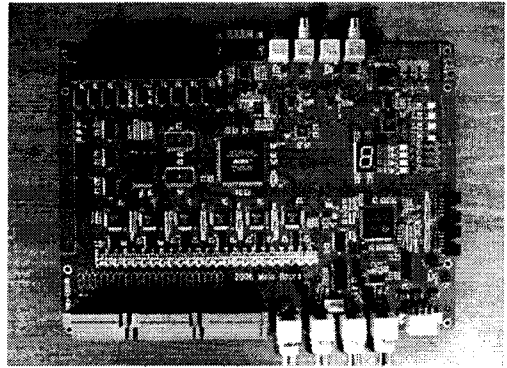


그림 8. 시스템 제어보드

## 3. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 열병합발전의 동작특성을 모의하는 시뮬레이션모델에 관해 기술하였다. 개발된 시뮬레이션모델은 PSCAD/EMTDC를 이용하였고 전력회로는 내장모듈을 그리고 제어기는 C 프로그램으로 직접 개발하였다. 개발된 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션모델을 이용한 다양한 시뮬레이션을 실시하여 계통연계형 열병합발전시스템의 동작특성을 분석하였고 이러한 결과를 바탕으로 엔진을 모의하는 유도전동기와 다극형 영구자석발전기로 구성된 하드웨어시뮬레이터를 설계하였다.

향후 하드웨어시뮬레이터를 제작하여 다양한 실험을 실시한 후 실제 전기적인 특성과 기계적인 특성을 확인 할 예정이다. 하드웨어시뮬레이터의 제작을 통해 다양한 계통연계 실험이 이루어지면 열병합발전시스템의 효율적인 운용과 개발에 활용 가능할 것으로 판단된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Harrison, J.D, "Micro combined heat and power: potential impact on the electricity supply industry", IEE Conf. Publ N o. 482, Page(s):5 pp. vol.4, 18-21 June 2001
- [2] Changhee Cho, Cheondon Son, Jinhong Jeon, Seulki Kim, Jongbo Ahn, Sungshin Kim, "Development of the integrated controllers for small CHP cogeneration system", 2007 IEEE Region 10 Conference Page(s):1 - 4, Oct. 30 2007-Nov. 2 20 07
- [3] James, B.P., Al Zahawi, B.A.T, "A high speed alternator for a small scale gas turbine CHP unit", Conf. Publ. No. 412 Page(s):281 - 285, 11-13 Sep 1995
- [4] Hak-man Kim, Myong-chul Shin, "EMTDC Model Development for Control & Protection Analysis of Co-Generation System based on On-site Characteristic Tests", Journal of K IEE vol.20, No5, pp.85~91 June 2006