

## 시뮬레이션에 의한 계통연계형 열병합 발전의 동작특성 분석

오승진, 한병문  
영지대학교

### Analysis of operation characteristics for grid interconnected Cogeneration by simulation

Seung-Jin Oh, Byung Moon Han  
Myongji University

**Abstract** - 본 논문은 계통연계형 열병합 발전의 동작특성을 시뮬레이션을 통해 분석하는데 목적이 있다. 계통연계형 열병합 발전은 가스엔진, 영구자석형 동기발전기, 전력변환기로 구성되어 있는 것을 모델링하였다. 본 연구에서는 가스엔진이 일정속도로 동작하고 다극형 영구자석형 발전기에서 생산되는 400Hz 출력을 컨버터와 인버터로 구성되어 있는 전력변환기를 통해 상용주파수의 교류로 전력계통과 연계하는 것을 모의 하였다. 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하였고 시뮬레이션모델을 통해 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 실제 모델의 축소 모형을 설계하여 하드웨어 시뮬레이터를 제작하였다.

#### 1. 서 론

열병합발전시스템은 하나의 에너지원으로부터 전력과 열을 동시에 발생시키는 종합에너지 시스템으로 발전시 부수적으로 발생하는 배열을 회수하여 이용하므로 에너지 종합 이용효율을 높이는 것이 가능하기 때문에 산업체, 건축물 등의 전력 및 열원으로 주목받고 있다. 열병합발전 시스템은 환경 친화적인 동시에 상대적으로 고 효율의 에너지 시스템으로서 분산 발전설비의 혁신 기술 중 하나이다.[1] 아울러 열병합발전 시스템은 열과 전기의 분산공급에 적절한 발전 시스템이다.[2] 그러나 열병합발전 시스템의 계통 연계는 전압 조정, 전압변동, 보호협조, 안전등의 제반 연계문제를 수반한다. 특히, 이러한 연계문제 중 열병합발전 시스템의 배전계통 연계, 분리 운전은 배전계통의 전압조정 및 변동에 영향을 미칠 것이 예상된다. 열병합발전시스템의 모델은 열적 모델, 전기적 모델로 나누어 모델링이 가능하다. 그러나 열병합발전 시스템을 계통 연계 측면에서 보면 열적 모델링은 생략 가능하다.

최근 수용가 소유의 컴퓨터 및 민감한 전자소자의 사용증가로 인하여 전력품질은 중요한 고려사항이 되고 있다. 따라서 열병합발전 시스템과 관련한 전압품질은 반드시 분석되어야만 한다. 왜냐하면 전압품질은 전력품질의 중요한 요소이기 때문이다. 안정된 계통운용을 위해서는 여러 가지 운전상황을 미리 모의할 수 있는 열병합발전 시스템의 시뮬레이션 모델이 요구 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 계통연계형 열병합발전 시스템을 모의하기 위한 시뮬레이터를 개발하기 앞서 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

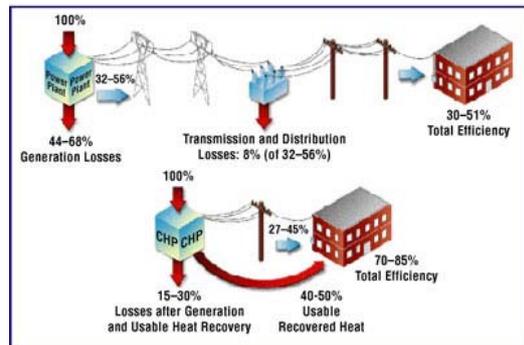
#### 2. 본 론

##### 2.1 열병합발전시스템의 특징

열병합발전은 액화석유가스, 천연가스 등의 원료로 사용하여 가스엔진, 디젤엔진, 가스터빈 등의 원동기를 구동하고 그 동력과 배열을 유효하게 이용하는 시스템을 말하는데 장·단점에 대해 특징별로 살펴보면 가장 큰 장점으로 전력과 열에너지를 동시에 생산하며, 배열을 효과적으로 이용함으로써 종합에너지 이용효율을 향상시킬 수 있다는 점이다.

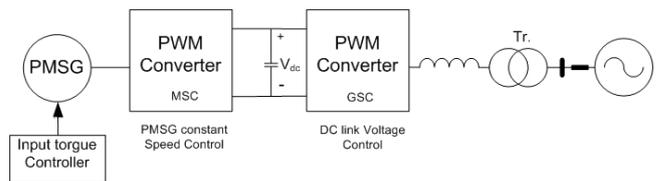
종래 발전방식은 발전과정에서 발생하는 폐열로 인해 44~60% 정도의 손실이 발생하고 송전과 배전과정에서 다시 8% 정도의 손실이 발생하여 종합에너지 이용효율은 30~51% 밖에 되지 않는다. 하지만 열병합 발전은 발전은 그림1에서 알 수 있듯이 발전과정에서 발생하는 열을 다시 에너지원으로 사용하고, 수용가에도 가깝게 위치하기 때문에 송전과정에서 발생하는 손실 또한 감소시켜 종합에너지 이용효율을 70~85%까지 향상시킬 수 있다. 또한 열병합발전은 분산형 전원으로 하절기 전력 Peak-cut용으로 이용 가능하여 안정된 전력수급에 기여할 수 있으며, 청정연료인 도시가스 이용시 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 억제 및 환경공해 문제 저감에 기여할 수 있다. 그리고 전력 자체생산으로 계약전력 감소에 의한 전력요금 저감 및 전력회사에 역송전시 전력판매도 가능하다. 반면에 단점으로는 개별 수용가 입장에서 투자비가 비교적 크고, 시설단위가 전력회사의 기존 발전시설에 비해 매우 작으며, 화석연료(가스, 유류)를 주로 사용함으로써 향후 연료비의 불확실성, 규모의 비경제성에 따른 위험성이 있다. 하지만 이러한 문제점은 열병합발전시스템의 연구가 활발해

지면서 점차 개선되어질 것으로 보인다.



〈그림 1〉 열병합발전시스템의 효율

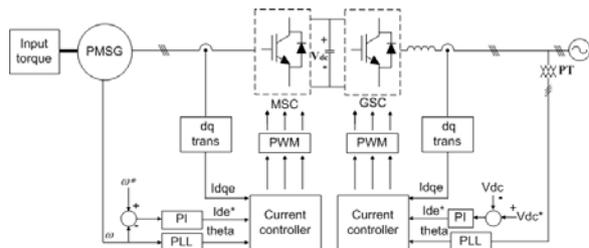
##### 2.2 열병합발전 시스템의 구성



〈그림 2〉 열병합발전시스템의 구성도

열병합발전시스템은 위의 그림2와 같이 다극형 PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator)와 발전기를 정속도로 유지시키기 위한 MSC(Machine Side Converter), DC Link 전압을 일정하게 유지시키기 위한 GSC(Grid Side Converter)로 구성되어 있다. MSC에 의해 발전기를 정속도로 제어하고 GSC에 의해 DC Link 전압이 일정하게 제어되면 발전기에서 생산된 전력이 모두 계통으로 출력될 수 있다. 원하는 출력 전력을 입력하면 연산과정을 통해 그 값이 토크 값으로 바뀌고 그 토크 값을 발전기를 제어하는 제어량 값으로 입력시켜 원하는 전력을 출력할 수 있게 된다. 무효전력은 각 컨버터에서 독립적으로 제어된다. 이러한 다극형 발전기는 낮은 회전속도에서도 발전이 가능하다는 장점을 가지고 있다.[3]

##### 2.2 열병합발전시스템의 시뮬레이션



〈그림 3〉 제어 구성도

그림3은 열병합발전시스템을 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 수행하기 위한 제어 구성도를 간략하게 나타낸 것이다. 전체적인 구성은 PMSG

가 Back to Back Converter를 통해 계통에 연계되어 있는 형태로 구성되어 있다. 먼저 MSC의 제어를 살펴보면, 전류제어를 하기 위해서는 동기위상각을 알아야 한다. MSC측 동기위상각은 발전기의 회전속도를 센싱하여 PLL(Phase Locked Loop)제어기를 거치면 전류제어를 위한 동기위상각이 생성된다. 발전기의 정속도 제어는 속도리퍼치  $\omega^*$ 와 실제 속도를 비교하여 그 오차를 PI제어기를 거치면 전류제어기의 전류 기준값  $I_{dc}^*$ 를 생성한다. 3상교류전류는 dq변환을 통해 2상 직류성분인  $I_{dc}$  성분과  $I_{qe}$  성분으로 나누어지게 된다.  $I_{dc}$ 는  $I_{dc}^*$ 와 비교하고 PI제어기를 통해 최종적으로 PWM신호를 발생시키게 된다. 여기서 발생된 PWM신호는 발전기가 일정한 속도를 유지할 수 있도록 컨버터를 제어하게 된다. 다음으로 GSC 제어기에 대해 알아보겠다. GSC 제어기의 목적은 DC Link 전압을 일정하게 유지 시켜주게 되는데 이렇게 DC Link 전압이 일정하게 유지되어야만 발전기에서 생성된 전력이 계통으로 안정하게 전달될 수 있기 때문이다. GSC의 동기위상각은 계통의 평형전압을 센싱해서 PLL제어기를 거치며 얻어지게 된다. 원하는 DC Link 전압인  $V_{dc}^*$ 와 실제 측정해온 DC Link 전압  $V_{dc}$ 를 비교하여 오차 값을 PI제어기를 통해 인버터의 기준 d축 전류 성분을 만들어 준다. GSC에서 출력되는  $I_{dc}$  값과 제어를 통해 나온  $I_{dc}^*$  값을 전류제어기에 입력하여 계통측 인버터의 PWM신호를 생성시켜 준다. 이를 통해서 GSC는 DC Link의 전압을 일정하게 유지시켜 주게 되고, 전력변환기에서 나오는 출력 주파수를 계통에서 사용하는 상용주파수인 60Hz로 동기화 시켜주게 된다.

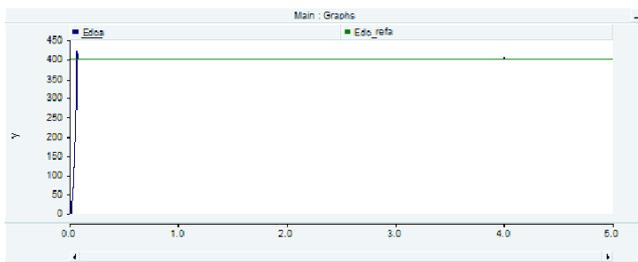
PSCAD/EMTDC 시뮬레이션에서 발전기는 실제 하드웨어에서 사용될 발전기의 파라미터를 고려하여 PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 Synchronous machine을 이용해서 모델링 했다.[4]

PSCAD/EMTDC에서 제공하는 영구자석형 동기발전기는 원하는 퍼포먼스를 얻기 힘들기 때문에 권선형 동기발전기에 일정한 계자전류를 흘려주어 실제하드웨어 시뮬레이터에서 사용하는 영구자석형 동기발전기와 같은 동작을 하게 하였다.

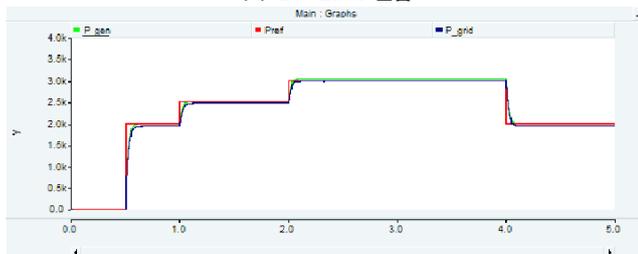
시뮬레이션은 표1과 같은 시나리오로 수행하였다. 부하변동에 따라 열병합발전시스템의 출력전력을 변화 시켜 원하는 만큼의 전력을 생산해 내도록 발전기를 제어하였고, 그동안의 각 부의 과정을 분석하여 제어가 원하는 대로 잘 수행하고 있는지를 확인해 보았다. 그림4(a)는 DC Link 전압을 나타낸 것으로 400V를 유지하게 제어를 하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 제어 목표치를 실제로 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었고 그림4(b)는 발전기 출력 전력 지령치, 발전기 출력 전력 그리고 계통 출력 전력을 하나의 그래프에 모아서 나타낸 것인데, 발전기 출력 전력 지령치와 실제 발전기 출력 전력이 일치 하였고 발전기에서 출력되는 전력이 모두 계통으로 전달되는 것을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 시뮬레이션 시나리오

time[sec]	0~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~4	4~5
Pref[kW]	0	2	2.5	3	3	2



(a) DC Link 전압



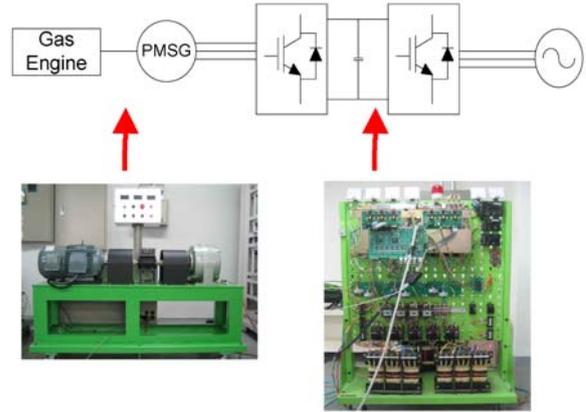
(b) 발전기 출력 전력, 계통 전력

〈그림 4〉 시뮬레이션 결과 파형

### 2.3 하드웨어 시뮬레이터

그림 5는 본 연구에서 제시하는 시뮬레이션을 실제 실험을 통해서 결과를 확인해 볼 수 있는 하드웨어 시뮬레이터 구성을 나타낸 것이다. 시뮬레이션에서 사용된 발전기 모델과 전력변환기의 용량 및 기타 파라미터들을 기초로 하여 하드웨어 시뮬레이터를 개발하였다.

열병합발전시스템 시뮬레이터에서 사용된 다극형 동기발전기의 출력 주파수는 400Hz로 계통 상용주파수보다 높다. 높은 주파수의 출력이 원활하게 제어되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인 하였고, 출력변동이 있을 때 시스템의 과도특성이 안정적인 것을 확인 하였다. 열병합발전시스템은 유도전동기와 다극형 PMSG를 이용하여 그림5와 같이 MG-set를 구성하여 실험을 진행중이다. 발전기에서 출력된 전력은 Back to Back Converter를 통해서 계통과 연계된다.



〈그림 5〉 하드웨어 시뮬레이터 구성

### 3. 결 론

본 논문은 시뮬레이션을 이용하여 계통연계형 열병합발전 시스템의 동작특성을 분석하였다. 개발된 시뮬레이션 모델은 PSCAD/EMTDC를 이용하였고 시뮬레이션 모델을 통해 다양한 시뮬레이션을 실시하여 계통연계형 열병합발전시스템의 동작특성을 분석하였다. 이러한 결과를 바탕으로 가스엔진을 모의하는 유도전동기와 다극형 PMSG 그리고 전력변환기로 구성된 하드웨어 시뮬레이터를 구성하였다. 시뮬레이션에 의한 결과를 바탕으로 실제 하드웨어 실험을 통해 전기적인 특성과 기계적인 특성을 함께 확인할 예정이다. 하드웨어 실험을 통해 다양한 상황에 대한 모의가 이루어지면 열병합발전시스템이 계통연계시 나타날 수 있는 여러 가지 현상에 대한 분석이 이루어질 수 있고 이것은 열병합발전시스템의 효율적인 운영과 개발에 활용 가능 할 것이라 믿는다.

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성 사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

### 〔참 고 문 헌〕

[1] Harrison, J.D, "Micro combined heat and power : potential impact on the electricity supply industry", IEE Conf. Publ No. 482, Page(s) : 5 pp. vol4, 18-21 June 2001  
 [2] R.Lasseter and P. Piagi, "Providing premium power through distributed sources", in Proceedings of the 33rd Annual Hawaii Interational Conf. on Systems Sciences, IEEE, 2000 pp, January  
 [3] Micheal J. Ryan, Robert D. Lorenz, "A "Power-Mapping" Variable-speed Control Technique for a Constant-Frequency Conversion System powered by a IC Engine and PM Generator", IEEE IAS 2000 Annual Meeting, Rome, Italy, pp 2376-2382, 2000  
 [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 KIEE vol.20, No5, pp 85~91 June 2006