

소형 열병합 가스엔진 발전 시스템의 통합 제어장치 개발

조창희\*, 김술기\*, 전진홍\*, 안종보\*, 김성신\*\*  
\*한국전기연구원, \*\*부산대학교

Development of the Integrated Control Unit for Small CHP Gas Engine Generator

Chang Hee Cho\*, Seul Ki Kim\*, Jin Hong Jeon\*, Jong Bo Ahn\*, Sung Shin Kim\*\*  
\*Korea Electrotechnology Research Institute, \*\*Pusan National University

**Abstract** - 소형 열병합 (CHP, Combined Heat & Power)은 발전 용량이 1 MW 이하인 발전 시스템을 지칭하는 용어로, 전기와 더불어 원동기에서 발생한 폐열을 회수하여 사용할 수 있는 발전 시스템을 말한다. 대표적인 원동기로서는 가스 엔진, 터빈, 마이크로 터빈, 연료 전지 등이 있다. 소형 열병합 시스템은 폐열 회수의 특징으로 기존 시스템에 비해 50% 이상의 에너지 이용 효율이 높으며, 기존의 대형 발전 시스템에서 필연적으로 존재하는 송전 및 배전 손실이 존재하지 않는 수유지 발전의 특징도 갖고 있어서 연료 절약형 에너지 생산 시스템으로서 높은 가치를 가지고 있다. 또 다른 장점으로 열병합 발전 시스템은 여름철의 최대 전력 부하를 제거하는 역할을 할 수 있으므로 국가 전력 수요 공급의 안정화에 기여하는 바가 크다. 본 논문에서는 최근에 개발된 325kW급 열병합 가스엔진 발전 시스템의 주제어를 담당하는 통합 제어 장치의 개발과 소형 열병합 시스템의 시험 결과에 대해서 소개한다.

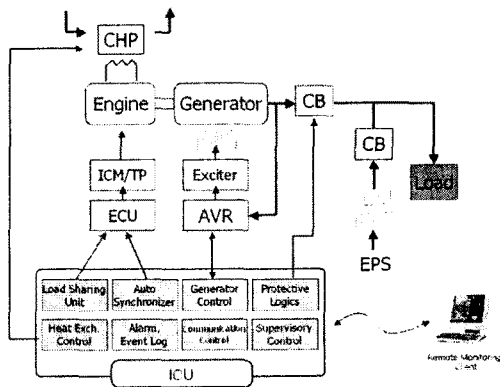
1. 서 론

소형 열병합 발전은 높은 에너지 효율을 가지며, 설비의 최대 전력 수요를 절감할 수 있는 면과 사용자의 전력 공급 계약액을 줄일 수 있다는 점에서 전력 수요자의 높은 주목을 받고 있다. 또한 고효율 에너지로서 국가 총 온실가스 배출량을 절감할 수 있으므로 환경적인 면에서 국가 에너지 정책의 주요 시책으로 채택되고 있다. 이러한 중요성을 감안하여 소형 열병합 발전은 국가 기술 지도에서 중요한 하나의 기술 항목으로 지정되었고, 중장기 전력 수급계획에도 포함되어 있다. 정부는 현재 열병합 발전 시스템의 공급을 금융 보조 프로그램을 통해서 지원하고 있으며 2012년까지 발전 설비 점유율 22%의 분산전원으로서 보급 목표로 설정하는 상황에서 경제적인 고효율 열병합 시스템의 보급 확대가 각광받고 있는 실정이다. 이러한 배경에서 국산 소형 열병합 발전 시스템의 신뢰성 및 경제성 확보를 위한 기술 개발과 장기 현장 검증시험 등의 수행이 절실한 상황이다.

2. 소형 열병합 시스템용 통합 제어장치 개발

2.1 소형 열병합 시스템의 제어

그림 1에 소형 열병합 시스템을 제어하기 위한 제어장치와 제어요소들의 구성을 간단한 블록도로서 볼 수 있다. 제어 대상 요소들은 크게 엔진, 발전기, 열병합 장치, 그리고 그 밖의 부가장치(차단기 등)로 구성된다. 가스 엔진의 속도 및 공연비 제어는 ECU(Engine Control Unit)가 담당한다. ECU는 현재 엔진 속도, 스로틀 위치 상태, 전력 부하상태, 산소(O<sub>2</sub>) 센서 등을 검지하여 엔진 점화를 담당하는 ICM(Ignition Control Module)을 조정하여 엔진을 제어한다.



<그림 1> 소형 열병합 시스템의 제어장치 구성

과제에 사용된 12 기통의 엔진을 제어하기 위하여 2개의 ICM이 각각 6기통의 점화 제어를 담당한다. ICM은 코일에 흐르는 전류의

레벨과 점화 시간(Dwell Time)을 제어하여 각 실린더내의 점화를 제어한다. 실린더 내부 온도나 압력, 점화 진각 등 이상 조건에서 엔진의 노킹(Knocking)이 발생할 수 있다. 이를 검지하기 위해서 각각의 6기통을 담당하는 2개의 노킹 검지 모듈(KDM)을 설치하였다. KDM은 각 실린더 내에 설치된 노킹 감지 센서를 모니터링하여 실린더의 노킹 발생여부를 판단하여 ECU에 정보를 전송해 준다.

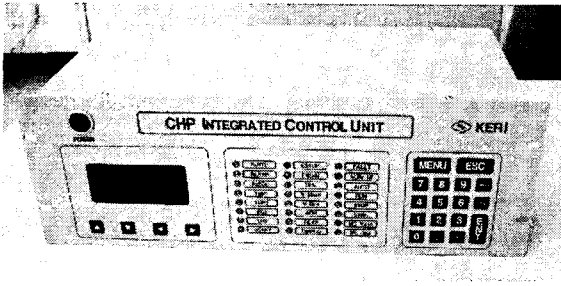
발전기의 전기적인 출력(전압, 전류, 무효전력 등)의 제어는 Digital AVR (Automatic Voltage Regulator)이 담당한다. AVR은 발전기 출력 전압, 전류, 위상각 등에 대한 정보를 바탕으로 발전기의 여자기(Exciter)의 전류를 제어함으로써 발전기 전압을 일정하게 조정한다. 여자는 발전기 제어의 가장 중요한 요소로써 발전기 필드(Field) 권선에 DC 자화 전류(Magnetizing Current)를 공급해주는 역할을 하여 최종적으로 발전기 고정자 권선(Stator/Armature winding)에 유도되는 AC 전압과 전류를 제어한다. 본 과제에서는 전압과 전류의 빠른 응답성을 위하여 AVR출력으로서 기존의 사이리스터 제어 위상 정류방식이 아닌 PWM 제어 초퍼(Chopper) 방식을 채택하였다.

2.2 통합 제어장치 개발

통합 제어장치(ICU, Integrated Control Unit)는 소형 열병합 발전 시스템 제어의 핵심 제어장치이다. ICU는 엔진, 발전기, 열병합 장치, 그리고 주변 장치에 대해서 필요한 정보를 센서 입력 또는 제어 장치로부터 전송 받는다. 이렇게 수집된 정보를 바탕으로 상황에 맞는 제어 명령과 운전 모드 등을 설정한다. 시스템 관리자/운영자는 ICU에 부착된 사용자 인터페이스(VFD, LED, Button, Numeric Button, Menu)등을 사용하여 시스템의 상태를 파악하고 엔진의 기동/정지 등 시스템 운영에 관련된 명령을 내릴 수 있다. ICU의 기능은 크게 4 가지 항목으로 구분되며 각각의 세부항목은 다음과 같다.

- 엔진-발전기의 제어 기능
  - 전압, 주파수, 실효/무효 출력 제어
  - 부하 분담 제어(부하 절체 제어)
  - 자동 동기 제어
  - 시퀀스 제어, 운전 모드 제어
  - 차단기(GCB, MCB) 제어
  - 배터리 충전기 제어
- 열병합 장치의 감시 및 제어 기능
  - 냉각수, 온수 모니터링(온도, 압력, 흐름)
  - 배기가스 온도 모니터링
  - 펌프, 밸브 제어
- 보호 기능
  - 엔진 보호(과속, 오일 압력, 냉각수 온도)
  - 발전기 보호(권선 온도 보호, 베어링 온도 보호)
  - Over/Under Voltage, Over/Under Frequency
  - Over/Reverse Power, Over Current
- 보조 기능
  - VFD 표시 기능, LED 표시 기능
  - Keypad 또는 Numeric 입력 기능
  - 이벤트 기록, 데이터 로깅
  - 고장/알람 표시 기능
  - Mobile SMS 발송 기능

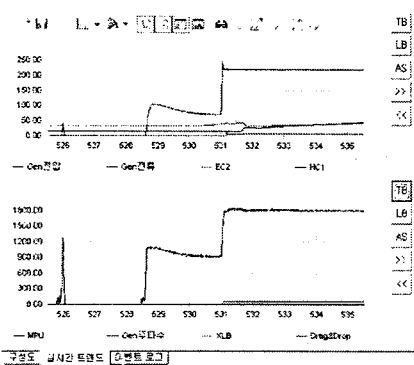
그림 2에서 개발된 통합 제어장치를 볼 수 있다. ICU는 150 Mhz, 32 비트 DSP를 기본 CPU로 하고 RAM, ROM, Flash 메모리 인터페이스, 통신 인터페이스 등을 포함하는 CPU 보드, 별도의 아날로그 및 디지털 입, 출력 신호처리 및 인터페이스를 위한 터미널 보드, 그리고 전원의 VFD와 LED, Keypad, Numeric 등을 포함하는 사용자 인터페이스 패널로 구성된다. 다수의 엔진 발전기가 병렬로 연결되는 경우에 각 엔진 발전기 시스템의 부하 분담 상황과 운전 상황들에 대한 정보를 각각이 공유할 필요가 있으므로 다중 통신 네트워크에 의한 다수 제어기의 통신 연결을 구성하였다. 그리고 다중통신 네트워크상에 감시제어용 PC를 설치하여 전체 시스템의 모니터링 및 중앙 관리제어 기능을 수행한다.



〈그림 2〉 통합 제어장치

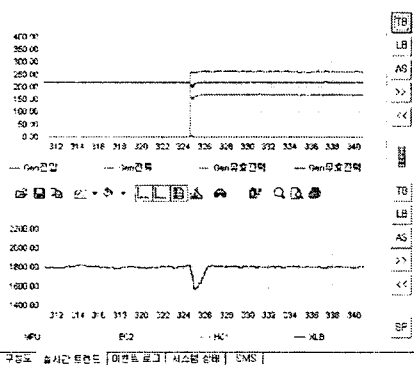
### 2.3 통합 제어장치의 시험

소형 열병합의 주요 제어장치 및 부품들은 여러 업체 및 기관에서 제작 또는 구매 절차를 거쳐서 최종 시스템으로 조립되어 완성된다. 그러므로 각각의 구성 기기 및 제어 장치들은 시스템으로 조립되기에 앞서서 자체의 성능 및 기능에 대한 시험 및 평가를 거치는 절차가 필요하다. 이를 단품 시험으로 정의하며 가스 엔진, 열교환기, 고효율 발전기, 엔진 제어장치(ECU), 발전기 제어장치(AVR), 통합 제어장치(ICU) 등이 그 대상으로 하였다. 시스템의 조립이 완료된 시점에서는 효율, 운전특성, 부하 투입, 차단, 보호 장치 기능 시험 등 다양한 내용의 통합 성능시험이 수행되었다.



〈그림 3〉 기동 시이퀀스 시험

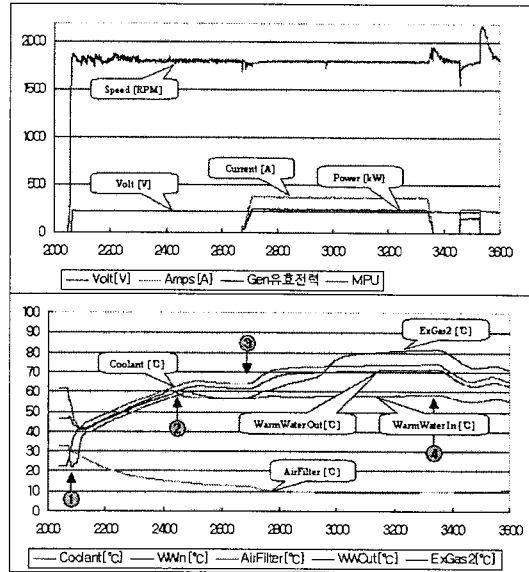
그림 3은 위의 그림에서는 통합 제어장치의 기동/정지 시이퀀스에 따라서 제대로 가스 엔진이 시작하고 정지하는 것을 확인하는 시이퀀스 시험의 결과이다. 초기에 아이들 모드로 운전하다가 냉각수가 충분히 예열된 후 정상 속도로 동작하는 모습을 볼 수 있다. 기동 특성은 자동 운전모드와 수동 운전모드에 따라서 약간의 차이가 있다. 수동 모드의 경우 판넬 전면의 시작 버튼을 누름으로서 기동 시이퀀스가 시작한다. 시이퀀스의 시작과 동시에 시동 모터에 전원이 인가되고(Cranks) 일정한 시간의 시차(Ignition Time Delay, Gas Valve Time Delay)를 두고 ECU의 점화와 가스 밸브의 개로(Open)를 제어한다. 이 같은 시차를 두는 것은 시동 초기에 배관에 남아있을 수 있는 혼합가스가 점화되어 역화(Flashback) 현상을 제거하기 위함이다.(Purging 제어) 엔진 속도가 일정 속도(Crank Disconnect Speed) 이상으로 상승하면 시동 모터를 중지한다. 초기에 엔진이 충분히 가열되지 않은 상태에서 부하를 인가하는 것은 좋지 않은 결과를 가져오므로 냉각수 온도가 Warmup 온도 이상이 될 때까지 엔진을 1,000 RPM 이하의 아이들 속도로 운전하도록 ECU에 지령한다. 이때 엔진 과속, 오일압력, 냉각수 파온 등의 기본적인 엔진 보호 제어를 수행한다. 엔진이 Warmup 되면 ECU로의 IDLE 플래그를 제거하여 정격 속도로 운전을 시작하며 발전기 쪽의 전압이 정격으로 확립된 것을 확인한 후 기동 시이퀀스를



〈그림 4〉 50% 부하 인가 시험

자동 제어모드의 경우 2 가지 면에서 수동 모드와 차이를 갖는다. 첫째는 기동 시작이 버튼이 아닌 메인 쪽 전력이 미리 설정된 기동 전력치 이하로 높아났을 경우 자동 기동을 시작한다는 점이다. 두 번째는 엔진 속도가 Crank Disconnect Speed 이상으로 상승하지 못하는 기동 실패 시 충분한 Crank Rest Time의 여유를 가진 뒤 3 번까지 다시 재시도 한다는 점이다.

그림 4는 엔진의 과도 속도 제어특성에 대한 정밀 조정이 완료된 후의 50 % 부하 인가 및 차단 시험의 결과를 보여주는 그림이다. 부하 투입시의 최대 전압/주파수 강하 특성과 전압/주파수 회복시간이 모두 ISO 8528 Class G3 사양에 적합한 결과를 보여주고 있다.



〈그림 5〉 열병합 시스템 감시제어 데이터 로그

위의 그림 5는 감시제어 프로그램이 PC의 하드디스크에 저장한 2006년 4월13일 20시 33분부터 21시 정각까지의 시험 데이터를 보여준 그림이다. 위의 그림에서 기동 시이퀀스에 따른 엔진의 기동과 점차적인 부하의 인가 및 부하 차단, 그리고 50 % 부하의 투입 및 차단 등에 대한 엔진 속도 변동, 전압, 전류, 유효 전력 데이터의 변동 등 시험 결과를 볼 수 있다. 시험이 저녁시간에 행해진 관계로 인클로저 내부의 온도(Air Filter 온도)가 점차 내려가는 것을 볼 수 있다. 엔진의 기동이 완료된 후 발전기 전압이 확립되면 냉각수 순환펌프와 온수 순환 펌프가 작동하므로 냉각수 순환에 따른 일시적인 온도 강하를 볼 수 있다. 이후 엔진이 동작함에 따라서 모든 온도는 조금씩 증가한다. 2번 지점에서는 온수 입구 온도 60℃에 맞추도록 조절된 온도 자동 조절 밸브의 역할로 냉각수와 온수 등의 온도가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 약 75 %의 부하가 인가되는 시점인 3에서부터 엔진 냉각수와 배기가스의 온도가 급격히 증가되는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 마지막으로 부하가 차단되는 4번 지점에서부터 천천히 각 부분의 온도가 천천히 강하하는 모습을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

이 논문에서는 계통 연계형 소형 열병합 발전 시스템의 제어를 위한 통합 제어장치에 대하여 소개하였다. 통합 제어장치는 소형 열병합을 운용하는데 핵심 역할을 하는 제어장치로서 소형 열병합 제어 계층의 최상위에 있는 제어장치이다. 가격이나 기능 면에서 경쟁력 있는 열병합 시스템의 개발을 위하여 여러 가지 기능이 통합된 통합 제어장치는 시스템의 필수적인 요소로 인식되고 있으며 에너지 효율 면에서 월등한 열병합 시스템의 시장 확대를 대비해서 고성능의 제어 장치를 개발하고 시험하는 일은 중요한 일이다. 현재 각 개발품의 단품시험 및 시스템 통합 성능시험을 수행하였고, 전체 시스템의 24시간, 72시간, 720시간의 연속시험을 무사히 완료하였다.

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] Guzzella, L., Amstutz, A. "Control of Diesel Engines", Control Systems Magazine, IEEE, Volume: 18, 5, 1998, pp:53 - 71
- [2] Kimura, M.; Koharagi, H.; Imaie, K.; Dodo, S.; Arita, H.; Tsubouchi, K. "A permanent magnet synchronous generator with variable speed input for co-generation system" Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, 3, Jan.-1 Feb. 2001, pp:1419 - 1424 vol.3
- [3] Jiang, J.; "Optimal gain scheduling controller for a diesel engine" Control Systems Magazine, IEEE, 14, 4, 1994 pp:42 - 48.