

병렬 운전형 디젤 엔진 동기 발전기의 디지털 제어 시스템에 관한 연구

조창희, 박민국, 안종보, 권순만, 김성신  
한국전기연구원, 부산대학교

Study on the Digital Control System for the Parallel Operation of Diesel Engine Synchronous Generators

Chang Hee Cho, Min Kook Park, Jong Bo Ahn, Soon Man Kwon, Sung Shin Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute, Pusan National University

**Abstract** - 현대 도시인들에게 전력의 신뢰성있는 공급은 당연시되고 있다. 그러나, 2002년 캘리포니아에서 있었던 대규모의 정전 사고는 불안정한 전력의 공급이 현대 문명 생활에 있어서 얼마나 큰 영향을 끼치며, 개별적인 보완 전력 공급의 중요성에 대해서 일깨워주는 계기가 되었다. 지금까지 이러한 전력 공급의 중단에 대한 주요 대비책으로서 비상용 엔진 발전기 시스템은 보조 전원의 중요한 역할을 해왔다. 여기에서 더 높은 효율과, 침투 부하 절감의 기능, 그리고 전력 계통과의 Co-generation 기능을 가지는 고기능의 제어 시스템에 대한 수요가 증대되어지고 있는 상태이다. 본 논문에서는 다수 비상용 발전기들의 병렬 운전 및 전력 계통과의 연계 운전을 지원하는 고기능의 디지털 전력제어 시스템과 운전 지원을 위한 감시 제어 시스템에 대해 소개한다.

1. 서 론

현대 문명의 발전과 함께 산업화 및 도시화가 급속히 진행됨에 따라서 대형 빌딩, 공장 또는 집단 생활 시설 등 전기 에너지의 대단위 수용가의 수가 급증하고 있다. 따라서 대단위 수용가의 전력 공급 신뢰성 확보 방안의 하나로 필수적으로 이용되는 비상용 전원설비의 수요 또한 급격히 증가하고 있다. 최근까지의 비상용 전원 설비의 대부분을 차지하는 비상용 디젤 엔진 발전기는 주로 지역적인 독립 전원으로서의 역할을 수행했다. 즉 한대 또는 여러대의 엔진 발전기들이 설치되어 계통 전원에 이상이 있을 경우에만 전원을 공급하는 비상용 전원의 역할을 수행해왔다. 그러나, 부하변동의 경향이 매우 복잡하고, 악성 침투 부하가 점점 증가하는 현재의 경향을 볼때 소용량의 엔진 발전기 경우에도 단순한 단독 운전의 보조 전원으로서의 기능은 물론이러, 다수 엔진 발전기 구성에 의한 병렬 운전 기능, 그리고 전력 계통과의 병렬 운전 기능을 제공할 필요성이 높아졌다. 전력 계통과의 병렬 운전은 계통으로부터 받는 에너지의 절감과 악성 침투부하를 제거할 수 있다는 측면에서 각광 받고 있으며, 상용 발전 시스템의 경우 열병합 발전을 채택함으로써 시스템 전체의 효율이 90%에 근접하므로 에너지 절약의 효과도 크다. 소형 발전 시스템에서 이러한 계통 병렬운전이 가능하려면, 병렬 운전의 필수 부가 기능인 자동 동기 기능 및 부하 분담 기능, 무효전력 및 역률 제어 기능 등이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 계통 병렬운전을 위해 개발된 디지털 엔진 발전기 제어 시스템에 대해 소개한다. 두 세트의 엔진 발전기와 계통의 병렬운전을 위한 제어 장치의 하드웨어 및 소프트웨어에 대한 설명과 함께 감시 제어 시스템을 위한 관리 소프트웨어 및 통신 시스템도 간단히 소개된다.

2. 시스템 구성

비상용 발전기라는 이름에서 알 수 있듯이 이는 주로 전력 계통(EPs; Electrical Power System)이 상실된 경우의 보조 전력 공급원으로 사용되어진다. 비상용

발전기는 원동기를 담당하는 엔진과 전기를 생산하는 발전기로 크게 두 부분으로 구분된다. 가장 많이 쓰이는 원동기는 개발역사가 길고 설치, 관리 및 보수면에서 뛰어난 디젤 엔진이며 발전기는 브러시와 슬립링이 없어 유지 보수가 쉬운 브러시리스 동기 발전기다 주로 쓰인다. 엔진은 시동모터와 조속기 그리고 배터리와 배터리 충전장치등과 같이 공급되고, 발전기는 초기 전압 형성을 위한 Flashing 장치와 발전기 단자전압의 제어를 위한 자동 전압 조정기(AVR; Automatic Voltage Regulator)와 같이 공급된다.

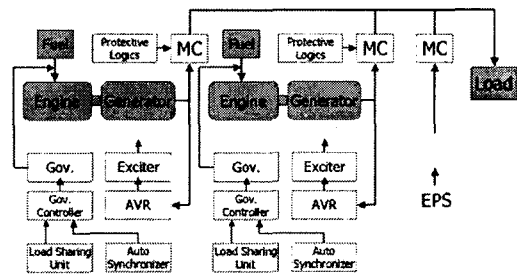


그림 1 전력 계통과의 연계 운전이 고려된 다수 엔진 발전기 시스템의 구성

2.1 다수기 병렬운전 시스템

다수 엔진 발전기 시스템에서 모든 발전기는 전력 계통과 연계하기 위한 장치를 가지고 있다. 단독 운전 시스템에서는 필요하지 않은 자동 동기 장치와 부하 분담 장치를 볼 수 있다. 기본적인 운전 모드는 부하 운전을 하고 있는 온라인 상태의 발전기에 오프라인 발전기를 투입하는 것으로 새롭게 투입되는 발전기의 주파수와 위상 그리고 발전 전압을 일정 오차한계 내에서 제어할 필요가 있다. 상호 병렬운전이 되고있는 상황에서 발전전압간의 불일치는 발전기 간의 무효 순환전류를 발생시킨다. 이 순환전류는 한쪽 발전기의 저항손을 증가시키고 다른 쪽 발전기는 철손을 증가시킨다. 또한 과도한 순환전류는 발전기 고정자 권선의 파괴의 원인이 되기도 한다. 발전기 유효전력의 경우에도 잘못된 유효전력의 분배는 갑작스런 부하변동이 있을 경우, 발전기 난조(Flunting)의 원인이 된다. 위와같은 문제를 극복하기 위해서 병렬운전을 위한 제어 시스템은 발전기의 유효 및 무효 전력에 대한 점검을 하여야 하며, 각 발전기의 조속기와 여자 제어기에 적절한 명령을 하여 유효 및 무효 전력의 공급을 가능하게 하여야 한다. 하나의 대형 발전기를 사용한 시스템의 경우와 비교한 다수의 소형 발전기의 병렬운전 시스템의 잇점을 다음과 같다.

- 효율 ..... 거의 모든 발전기들이 전부하 조건의 최대 효율 영역에서 운전됨
- 가용성 ..... 한 발전기에 치명적인 문제가 있을 경우에도 그 발전기만을 제외하고 계속 운전이 가능. 이 가용성은 더 신뢰성있는 전원 공급을 위해 중요

- 유지보수 ... 부하운전을 하고 있는 상태에서 각 발전기의 개별 점검 및 보수가 가능
- 이와는 반대로 다수 발전기의 병렬운전 시스템은 다음과 같은 단점을 보인다.
- 비용 ..... 병렬 운전용 보조 장비의 추가비용 상승
- 운전 곤란 ... 다수 장치로 운전이 복잡, 오동작으로 인한 고장 발생 가능성 증대

### 3. 디지털 전력 제어 시스템

이 연구의 목적은 다수 엔진 발전기 시스템을 위한 고성능의 디지털 제어를 개발하는 것이다. 제어기의 확장성과 유연성을 위하여 계층 구조와 모듈화 설계를 채용하였다. 제어 시스템 계층의 최상위층은 HMI (Human Machine Interface)를 담당하는 산업용 PC이다. HMI station에서 운영자는 정보를 획득하고 제어 명령을 하위 제어기에 전달한다. 중간 계층에는 마스터 제어기가 있다. 마스터 제어기는 하위 슬레이브 제어기와 상위 산업용 PC사이의 데이터 전달 통로로서, 슬레이브 제어기로부터 데이터를 수집하며, 자신이 자체적으로 계산한 명령값이나 상위 산업용 PC로부터의 명령데이터 등을 슬레이브 제어기에 전달한다. 제어 계층의 최하위에 존재하는 슬레이브 제어기는 2개가 한쌍으로 하나의 엔진 발전기를 제어하는데 발전기를 제어하는 DAVR (Digital Automatic Voltage Regulator)와 엔진을 제어하는 DALG (Digital Auto Synchronizer and Load Sharing Governor Controller)이다.

개발된 전력 제어 시스템은 자동 모드와 수동 모드의 2 가지 동작 모드를 제공한다. 이 제어 모드는 HMI의 파라미터 설정 화면에서 선택하는데 수동 모드의 경우 운전자는 전압이나 속도 기준치, MC (Magnetic Contact)의 투입 여부, 부하 기준치의 변경 등을 설정 개별적으로 설정할 수 있다. 자동 운전 모드에서는 각 발전기는 완전히 독립적으로 엔진의 기동 및 정지, 온라인 상태의 발전기와의 동기 유지, MC 스위치의 투입 및 절제, 부하 투입 제어, 부하 분담 제어, 무효전력 제어, 역률 제어 등이 자동적으로 이루어 진다.

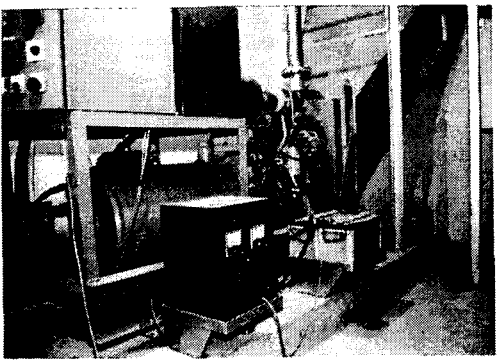


그림 2 디젤 엔진 발전기

그림 2에서 현대의 디젤엔진 발전기를 볼 수 있다. 엔진은 방진 스프링을 통해서 지지대 위에 설치되었으며, 배터리와 배터리 차저를 엔진 전방에 볼 수 있다. 발전기 위에는 연료 탱크와 로컬 제어반이 설치되어 있다. 로컬 제어반에서 사용자는 냉각수 온도와 윤활유 압력, 엔진 속도 등의 기본적인 엔진 점검과 엔진 기동/정지와 주 차단 스위치의 개/폐 등을 제어할 수 있다.

다양한 종류의 부하조건을 시험하기 위하여 부하 제어반으로 제어할 수 있는 3상 저항 부하가 설치되었으며, 리액터 부하를 이용하여 다양한 Power Factor 조건에서의 시험도 가능하도록 구성하였다. 표 1에서 엔진 발

전기 시스템의 기본 정격 및 사양을 볼 수 있다.

엔진	Capacity	3920 [cc]
	Type	4 Cyl. Diesel Turbo
	Norm. Torque	403 [N·m]
	Power(Standby)	84 [HP]
	Power(Cont)	75 [HP]
	Speed	1800 [rpm]
	Speed dev	± 5 [%]
	Fuel	Direct Injection
발전기	Excitation	Self Ex Brushless
	Type	3 Phase Synchronous
	No of Poles	4 [POLE]
	Power(Standby)	60 [kVA] 48 [kW]
	Power(Cont)	54 [kVA] 43 [kW]
	Power Factor	0.8 Lag
	Voltage	220 [V]
	Current	158 [A]
	Frequenc	60 [Hz]
	Speed	1800 [rpm]
Insulation	F	

표 1 엔진 발전기 사양

#### 3.1 자동 동기 장치

자동동기장치는 온라인 버스 와 이에 병렬 투입할 예정의 오프 라인 발전기 사이의 주파수와 위상각(Phase Angle)를 점검한다. 온라인 버스와 병렬 운전할 발전기 간의 전압도 동시에 측정하며 둘 사이에 오차가 있을 경우 투입 발전기에 전압 증가 또는 감소 신호를 보낸다. 주파수 또는 위상각의 차이가 있을 경우에 동기 장치는 오프라인 발전기의 속도 제어를 하여 오차를 없애도록 제어하며 오차가 없어지는 순간 두 시스템 사이의 차단기를 투입하여 병렬운전에 돌입한다.

#### 3.2 부하 분담 장치

둘 이상의 발전기가 병렬 운전을 하고 있는 경우, 하나의 원동기의 기계적인 입력이 증가하였을 경우, 그 발전기에 유기된 전압의 위상도 다른 발전기에 비해서 앞서게 된다. 이와 같은 경우에, 선행하는 발전기와 뒤처진 발전기사이에는 동기화 힘이 발생하게되어 선행하는 발전기가 분담해야할 부하는 증가하고, 뒤따르는 다른 발전기의 부하는 감소하게 된다. 이것이 병렬 운전하는 다수 발전기 사이의 기본적인 부하 분담의 원리이다. 개발된 마이크로프로세서 기반 부하 분담 장치는 부하 측정, 데드 버스 검출, 부하 이송 제어, 부하 증감 제어, VAR/PF 제어 등의 기능을 갖는다.

### 4. 감시 제어 시스템

#### 4.1 HMI 소프트웨어

운영자 레벨의 인터페이스를 위하여 상용 HMI 프로그램(Wonderware)을 사용하였다. 이 소프트웨어는 마이크로소프트 윈도우 OS 환경에서 동작하며 객체 지향 그래픽(OGG; Object Oriented Graphics)을 지원함으로써 사용자가 필요에 따른 응용 프로그램의 쉽고 빠르게 작성할 수 있도록 보조한다. 다른 응용 프로그램들과의 데이터 교환을 위해서 윈도우 환경의 표준 통신 프로토콜인 DDE(Dynamic Data Exchange)와 OPC (OLE for Process Control)를 지원한다. DDE는 마이크로소프트 윈도우의 프로세스간 통신 방식 중의 하나로 윈도우 내부의 서버와 클라이언트 간의 메시지 송수신을 기반으로 하고 있다. 이 HMI 소프트웨어는 실시간 데이터베이스, 애니메이션 링크, 또는 액션 스크립트 등의 지원으로 다양하면서도 직관적인 그래픽 화면을 쉽

게 구현할 수 있다. 애니메이션 링크 또는 액션 스크립트를 사용함으로써 사용자는 그래픽 객체의 모양이나 색은 물론 움직임 까지도 제어가능하여 사용자가 원하는 표현을 손쉽게 할 수 있도록 도움을 준다.

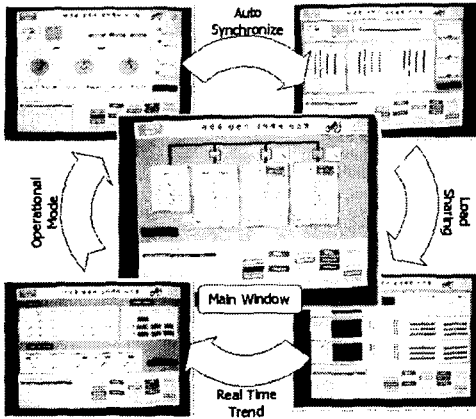


그림 3 HMI 소프트웨어의 구성

그림 3에서 이 HMI 소프트웨어를 이용하여 작성된 감시제어 시스템의 화면을 볼 수 있다. 감시 제어 시스템은 엔진 발전기의 운전 순서에 따르는 여러개의 화면으로 구성된다. 메인 페이지에서는 전체 시스템에 대한 구성도를 볼 수 있으며 현재의 엔진 발전기들의 운전 상태와 MC스위치의 상태 등을 볼 수 있다. 파라미터 윈도우 페이지에서 사용자는 엔진 발전기의 정격 또는 각 제어 장치들의 운전 모드 등의 운전 파라미터를 엔진 발전기가 온라인 상태 중에서도 변경 가능하다. 동기 윈도우 페이지에서 운전자는 자동 또는 수동 동기 모드 상태에서 엔진 발전기를 부하 발전중인 다른 발전기와 접속시킨다. 자동 모드에서 운전자는 자동으로 주파수 및 위상각이 조정되어 스위치가 투입되는 것을 볼 수 있으며 수동 모드 경우 운전자가 수동으로 동기되는 것을 확인하여 스위치를 수동 투입해 준다. 동기가 완료된 후에 필요한 전력 제어는 전력 제어 윈도우 페이지에서 볼 수 있다. 이 또한 자동 또는 수동 모드를 선택할 수 있는데, 수동 모드 경우 운전자가 각 발전기의 전력 기준치를 설정해 주어야 하며 자동 모드 경우에는 각 발전기의 용량에 비례한 필요 전력의 기준치가 마스터 제어기에서 계산되어 각 제어기에 제어 명령으로 지시된다. 실시간 트렌드 윈도우 페이지에서는 발전기에서 수집된 거의 모든 데이터를 트렌드 화면으로 볼 수 있다. 또한 각 제어기의 게인이나 각종 기준치를 슬라이드 막대 또는 에디트 박스에 입력하여 변경할 수 있어서 제어기 게인 조정 등의 작업을 쉽게 할 수 있다. 데이터 로깅 및 점검을 위해서 히스토리컬 트렌드 윈도우 페이지가 있다. HMI 소프트웨어의 각 내부 변수는 로깅할 것인지 아닌지 여부를 별도로 지정할 수 있어서 이력데이터를 산업용 PC내부의 하드디스크에 저장할 수 있으며 히스토리컬 트렌드 윈도우에서 필요한 시간의 데이터를 시간 또는 정보 축으로 확대 또는 축소해가면서 점검할 수 있다. 모든 디스플레이 페이지는 최하단에 이벤트 로그 및 상태 윈도우를 포함하고 있어서 전체 시스템의 상태 및 사건 발생에 대한 정보를 즉각적으로 파악할 수 있다.

#### 4.2 통신 시스템

그림 4에서 전체 시스템의 양방향 데이터 흐름을 볼 수 있다. 이 구성에서 데이터의 흐름은 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 구분할 수 있다. 하드웨어 통신은 직렬과 병렬 통신이 동시에 사용되는데 하나의 마스터 제어기와 여러 슬레이브 제어기의 1 대 다 통신은 멀티

드롭 직렬 통신을 사용한다. 마스터는 직렬 통신의 관리자 역할을 하는데 각각의 슬레이브 제어기를 순차적으로 호출해서 작동 명령을 전달하고 반대 방향으로 슬레이브 제어기의 필드 데이터와 제어기 상태 정보 등을 수집한다. 마스터 제어기와 산업용 HMI PC는 양방향 병렬 포트를 이용하여 데이터를 교환한다. 전용의 PIO (Parallel Input Output)를 사용하여 8 비트 스트로브 양방향 통신 버스를 구성한다. 마스터 제어기는 상위 HMI 컴퓨터와 하위 슬레이브 제어기들 간의 통신 중재 역할을 하므로 다수의 슬레이브 제어기와는 비교적 낮은 속도로 연결되지만 상위 제어기와는 하위의 여러 제어기의 정보가 집합되어 많은 양의 데이터를 교환할 필요가 있으므로 더 높은 밴드 폭을 갖는 병렬 통신 방식을 채택하였다. 하드웨어 통신에 의해서 수집된 데이터는 상위의 DDE/Com 서버에 의해 HMI 소프트웨어까지 전달된다. 전송한 바와 마찬가지로 PC내부의 데이터 전달은 DDE 통신에 의해서 이루어진다. 읽기 전용의 변수는 DDE Cold Link를 통해서 연결되고 쓰기 변수는 DDE Hot Link를 통해서 연결된다. DDE/Com 서버는 주기적으로 입출력(통신) 포트를 확인하며, 일정량 이상의 데이터 변동이 있을때만 DDE 통신을 시작함으로써 최적의 속도로 운용된다.

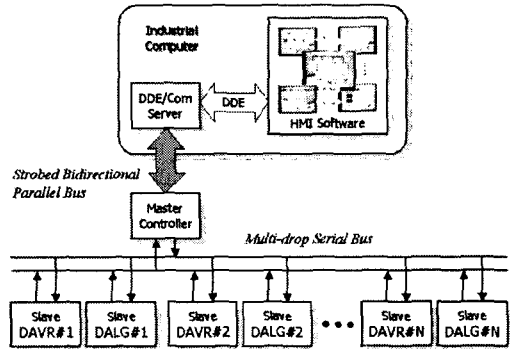


그림 4 통신 시스템의 구성

#### 5. 결 론

이 논문에서 전력 계통과의 계통 병입 운전과 다수기 병렬운전이 가능한 디지털 제어 시스템을 소개하였다. 지금까지 단순한 백업 발전기로서의 소용량 발전기도 계통 병입 운전에서 사용되어질 수 있으며 이것은 엔진 발전기 시스템의 가격 및 기능 경쟁력에 있어서의 성능 향상을 의미한다. 또한, 사용자에게 친숙한 GUI 방식의 HMI 시스템을 채용함으로써 시스템 관리자는 더 손쉽고 효율적으로 전체 시스템을 운용할 수 있게 되었다.

#### [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.  
 [4] Muljadi, E.; McKenna, H.E.; "Power quality issues in a hybrid power system" Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE, 2, Sept. 4 Oct. 2001 pp:773 - 781 vol.2