

부하를 분담하고 있는 디젤발전기의 무한대 모선과의 병렬운전 시스템

천 행 춘†

(원고접수일 : 2004년 6월 30일, 심사완료일 : 2004년 8월 27일)

Parallel Running System of the Loaded Diesel Generator to Infinite Bus

Haeng-Choon Chun†

Abstract : Generally generator is connected to the bus with no load. After the connection to the bus, the frequency of generator system with no load has to be increased for preventing the reverse power. But in a few case of parallel running with infinite bus system, we have to synchronize the loaded generator to the infinite bus. The frequency of generator system with load has to be lowered for prevention of load shift to the bus system. The blackout of infinite bus decreases the parallel running generator's frequency because of load increasing. In this paper we propose a method that the generator with load maintains the frequency constantly after the blackout of infinite bus. With the constant speed control and load control method of parallel running system to the infinite bus we apply the method to the industrial generating system.

Key words : Parallel running(병렬운전), Infinite bus(무한대 모선), Constant frequency(일정 주파수), Synchronizing(동기)

1. 서 론

발전시스템을 단독 운전하는 경우는 임시 발전 시스템이나 비상발전 시스템이 대부분이고, 상용으로 운전하는 경우는 병렬운전을 하는 시스템이 대부분이다^[1].

일반적으로 병렬운전 시스템의 발전기는 병렬 운전시작 시에 무부하 상태로 동기하여 병렬운전에 들어가게 되고 병렬운전 후에 부하를 점차 분담해 나가는 운전 방법을 사용한다^[2]. 또 병렬 운

전은 선박에서와 같이 용량이 같거나 다른 발전기 간에 이루어지는 경우가 있고, 육상의 상용 자가 발전 시스템처럼 유틸리티의 무한대 모선과 병렬운전을 하는 경우가 있다^[2].

본 논문에서는 상용 자가발전 시스템이 유틸리티의 무한대 모선과 병렬 운전되는 경우에 대해서 논한다. 병렬 운전 도중에 유틸리티의 전기가 정전이 되는 경우가 발생되면 자가 발전 시스템은 단독으로 부하시스템에 전력을 공급하여야 하는 경우가 있다. 그리고 유틸리티의 전기가 복전된

† 책임저자(한국해양대학교 대학원), E-mail : chunhc@hhu.ac.kr

후에는 자가발전 시스템을 다시 무한대 모선에 병렬운전을 하여야 하는 경우가 발생하게 되는데 이때 자가발전 시스템을 무한대 모선에 병렬운전시키기 위해서는 무부하 상태가 아닌 부하를 분담하고 있는 자가발전 시스템의 주파수 및 전압을 조정하여 유틸리티의 무한대 모선과 병렬운전에 들어갈 수 있도록 하여야 한다.

보통 이 과정에서 발전기의 전기가 역 송전되거나 시스템의 불안정에 기인한 트립이 많이 발생하고 있다. 무부하 상태의 발전기를 병렬 운전할 때는 모선의 전압과 같게 전압을 조정하고 주파수를 일반적으로 약간 높게 하여 동기검정기가 빠른쪽(fast)으로 회전하는 상태로 하여 병렬운전에 도입하게 되는데, 이것은 병렬운전에 들어간 발전기가 부하를 분담함으로써 해서 주파수가 떨어져 역전력 상태로 되는 것을 막기 위해서 이다.

따라서 병렬운전에 들어가면 병렬 들어간 발전기의 속도와 전압을 높여주어 부하를 분담할 수 있도록 하는 것이 일반적인 병렬운전 방법이다.

그러나 부하를 분담하고 있는 발전기의 경우는 무한대 모선과 병렬운전에 들어간 후에는 무부하 발전시스템의 경우와는 반대로 속도를 낮춰서 분담하고 있던 부하의 일부를 무한대 모선쪽에서 담당하도록 해야 한다. 그렇지 않으면 병렬 들어간 발전기의 주파수가 높아짐으로써 해서 추가의 부하를 유틸리티 쪽에서 가져오게 되고, 이때 발전기의 전력이 유틸리티 쪽으로 역 송전되어 유틸리티 브레이커가 트립되는 경우가 발생되게 된다.

대부분의 발전기가 무한대 모선과 병렬운전을 하는 경우는 드롭(Droop)모드로 병렬운전을 하게 된다^[1]. 이러한 병렬운전 방법은 안정된 병렬운전이 가능하나 다음과 같은 두 가지의 문제점이 있다. 첫째로 무한대 모선이 정전되면 단독운전으로 바뀌면서 발전기의 주파수가 변동되게 된다. 주파수가 변동되면 부하시스템에 영향을 미치게 되고 안전장치에 의한 고 주파수나 저 주파수 트립이 작동될 수가 있다. 둘째로 무한대 모선이 복전된 후에 병렬운전에 다시 도입할 때에는 무부하 병렬할 때와는 반대로 동기 후 부하가 무한대 모선 쪽

으로 옮겨 가도록 조작해야 하므로 동기시의 시퀀스를 부하의 유무에 따라 달리해야 한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 보완한 방법으로 무한대 모선과 병렬운전 중에 무한대 모선이 정전 되더라도 현재의 주파수로 계속 운전할 수 있도록 하는 방법과 복전 후 병렬 운전에 들어갈 때에 현재 감당하고 있는 실제부하에 해당하는 부하 설정값으로 부하 설정시스템을 리셋트하여 병렬 운전이 이루어지는 시스템에 대해서 고찰하고 그러한 시스템을 구성하여 실제 시스템에 적용하고자 한다.

실제 시스템의 모델이 된 삼성코닝(주) 수원공장의 열병합 발전 시스템의 무정전 병렬운전 시스템에 설계된 시스템을 적용하여 병렬운전 및 부하 분담 운전을 행하고 그 결과를 고찰하고자한다.

2. 병렬운전 시스템 설계

발전 시스템의 운전 방법은 그 특성상 무부하시나 부하시나 할 것 없이 항상 일정한 속도로 운전해야 한다. 왜냐하면 발전 시스템은 부하의 많고 적음에 관계없이 항상 일정한 주파수를 유지해야 하기 때문이다^[3,4,5].

주파수는 조속기로 조정하고 있으며 조속기의 운전 방법은 흔히 두 가지를 적용한다^[6]. 그 하나는 부하에 관계없이 항상 일정한 속도로 조속하는 일정속도(Isochronous)운전 방법이고, 다른 하나는 부하가 많아지면 조속하는 속도를 부하에 비례하여 떨어뜨리는 드롭(Droop) 운전 방법이다. 이 때는 부하가 증가하여 주파수가 떨어지면 속도 설정 값을 올려서 주파수를 일정하게 유지한다. 발전시스템의 조속방법은 Fig. 1에 보인다.

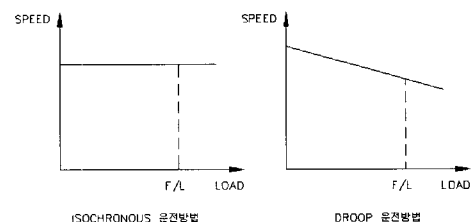


Fig. 1 Governing of the generator system

무한대 모선과의 일반적인 병렬운전방법은 드롭 운전방법을 채택하고 있다. 그러나 이 방법은 부하 운전 중에 무한대 모선의 정전으로 인한 병렬분리 상태가 발생하게 되면 무한대 모선이 담당했던 부하가 발전기쪽으로 이동하게 되어 발전기는 분담하는 부하의 양이 많아지게 되므로 주파수가 낮아지게 되어서 일정한 주파수유지 운전이 안 된다⁽⁷⁾.

그러므로 병렬운전 중에 무한대 모선의 정전으로 인한 병렬분리가 발생되더라도 일정한 주파수 운전이 가능한 일정 주파수유지 병렬운전법을 설계하여 병렬 시스템을 구성하고자한다. 일정 주파수 운전은 속도와 부하의 함수관계가 없으므로 부하감지기와 부하제어기를 추가하여 병렬운전을 행하여야 한다.⁽²⁾

발전기간의 일정속도 병렬운전은 부하감지기 및 부하비교회로를 추가하면 병렬운전이 부하의 크기에 상관없이 일정 주파수로 이루어질 수 있다. 또 무한대 모선과의 일정 주파수 병렬운전을 행하기 위해서는 부하감지기와 부하비교기 외에 발전기의 부하를 조절할 수 있는 부하 조정장치가 필요하다. 그리고 부하운전 중에 무한대 모선의 정전에 의한 병렬 분리가 발생되면 자동으로 발전기간 일정 주파수 병렬운전 모드로 전환될 수 있도록 구성할 필요가 있다^(2,8).

무한대 모선의 정전 후에 다시 복전이 되면 부하운전 중인 발전기를 무한대 모선에 동기운전을 행하여야 한다. 이 때 정전 분리되기 전에 설정한

발전기의 부하분담 설정값을 현재 발전기가 부담하고 있는 부하량과 같게 설정해주지 않으면 동기 투입 후에 무한대 모선과 분리되기 전의 부하 설정값으로 되돌아가므로 부하설정값이 현재의 발전기가 분담하고 있는 부하값과 같아지게 재 설정 후 병렬운전을 행하여야 안정적인 병렬운전이 가능하다. 그리고 부하감지기나 부하 제어기가 고장이 발생한 경우는 기존의 발전기처럼 수동으로 드롭 병렬운전이 가능하도록 해야 하는 설계조건을 충족하도록 제어시스템을 설계하였다. 일반적인 발전기의 병렬운전 종류는 Table 1에 나타내었다⁽²⁾.

Fig. 2는 발전기간의 일정 주파수 병렬운전 시스템의 구성도이다. 조속기는 항상 주파수가 일정하게 조속을 하며 부하감지기 및 부하비교기를 가지고 일정 주파수 운전 중에 발전기간의 부하를 일정한 비율로 유지시키고 있다.

Table 1 Operation mode of generator

	운전 모드	운전 가능 종류
1	발전기 단독운전	드롭 운전
		일정 주파수 운전
2	발전기간 병렬운전	드롭 운전
		일정 주파수 운전
3	유틸리티와 병렬운전	드롭 운전
		일정 주파수 운전

부하제어기가 없는 시스템은 주파수를 일정하게 유지하고 안정되게 부하를 분배하는 잇점이 있

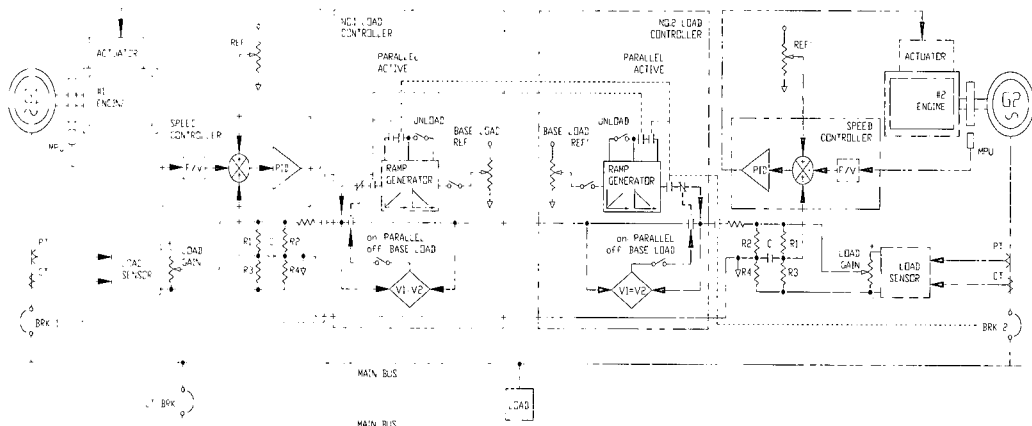


Fig. 2 Isochronous parallel running schematic between generators

나 병렬운전 돌입 시에 부하의 변동이 2대 병렬일 경우에 절반이나 이동하게 되어 주파수의 난조를 일으킬 수 있다.

따라서 발전 시스템의 규모가 중형 이상이 되면 일정 주파수 병렬운전에 돌입할 때에 부하의 이동이 서서히 이루어지게 할 필요가 생긴다. 이러한 요건을 충족시키기 위해서 발전기간에는 펌프레스(bumpless) 부하배분이 이루어질 수 있도록 하고, 무한대 모선과의 병렬운전 시에는 발전기가 분담 가능한 부하를 조정할 수 있도록 하는 부하 제어가 필요하다^[2]. Fig. 2의 부하 제어기는 기존 부하운전 되고 있는 발전기에 새로 병렬 투입된 발전기는 부하 램프에 의해 부하가 서서히 증가하게 되며 이때 기존 발전기의 부하는 줄어들게 된다. 기존 발전기와 새로 병렬 투입된 발전기의 부하가 같아지면 부하조정라인을 연결시켜 두 발전기가 같은 부하로 운전되게 하는 방법이다. 또 무한대 모선과의 병렬운전 시는 부하램프의 설정값을 조정하여 주어서 원하는 부하를 발전기에 분담시킬 수 있다. 이상의 부하제어기가 부하를 조정하는 방법으로 발전기간 병렬운전 시와 무한대 모선과의 병렬운전 시에 대해 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

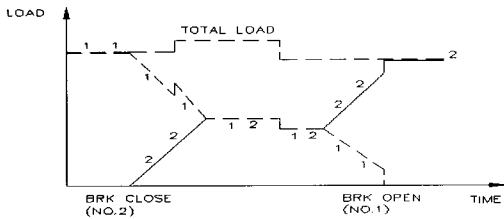


Fig. 3 Parallel load control between generators

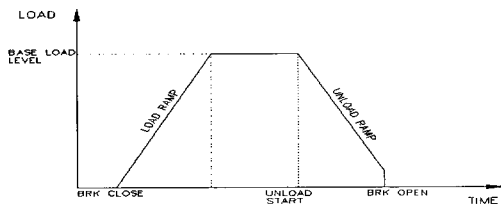


Fig. 4 Parallel load control between generator and infinite bus

부하제어기를 갖춘 무한대 모선과의 병렬운전 시스템은 Fig. 5와 같이 설계할 수 있다. 부하제

어기는 원하는 부하만 발전기가 분담하도록 부하 설정값으로 세트된 값과 동일하게 발전기의 부하 센서의 값이 되도록 조속기에 신호를 전달한다.

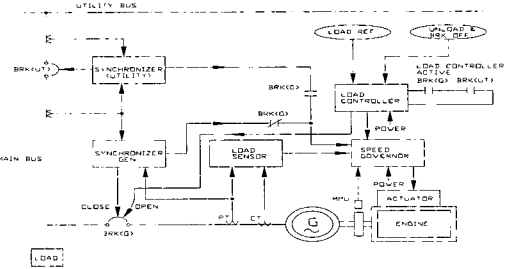


Fig. 5 Design of parallel running system with load controller between generator and infinite bus

3. 구성된 제어 시스템

위에서 설계한 조속 시스템 외에 실제 시스템에 적용하기 위하여 필요한 모드에 따른 동작이 잘 이루어지도록 통합적인 시스템을 구성하였다. 적용하고자 하는 시스템의 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of applied system

발전기 (Generator)	
Synchronous Generator SN.	4547374/4547375
kVa	8025 kVa
P.F.	0.8
rpm	720 rpm
Volt	6600 V
Ampere	702 A
frequency	60 Hz
Insulation class	F
phase	3
Excitor voltage	105 V
Excitor current	5.6 A
Excitor frequency	48 Hz
Enclosure	I.P. 44/ I.P. 22
Excitor Insulation	F
maker	NEWTON DERBY LTD., DERBY, FINLAND. 1994.
엔진 (Engine)	
Type	18V32E
Engine NO.	17396/17397
output(BPS)	6061 kW
계m	720 rpm
maker	WÄRTSILÄ DIESEL
Governing Device	
Controller	2301ALSSC(Woodward)
Actuator	EGB 50P
Load controller	AGLC(Woodward)
Synchronizer	SPM-A
Speed reference	MICRONOR Motor Potentiometer
Load reference	MICRONOR Motor Potentiometer

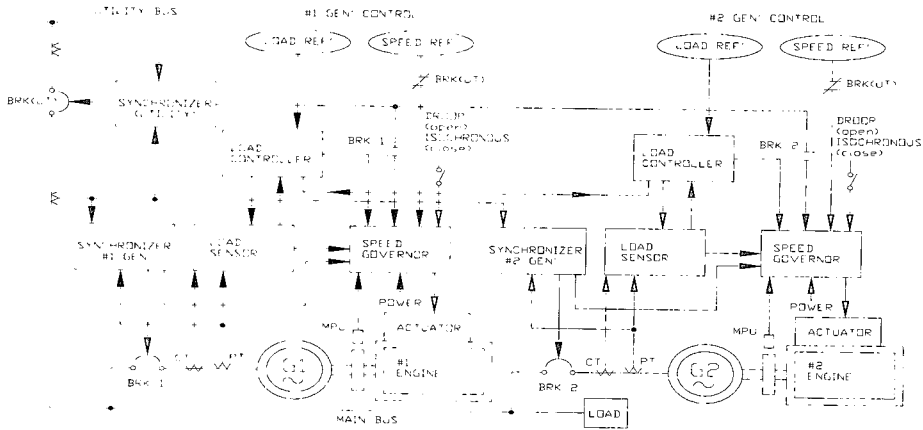


Fig. 6 Block diagram of control system

이와 같은 사양을 만족하는 제어 시스템의 블럭 다이어그램은 Fig. 6과 같다. 이 시스템은 드롭모드인 경우는 부하감지기와 부하제어기는 작동하지 않고 조속기의 속도 드롭으로 발전기간이나 발전기와 유틸리티간에 병렬운전이 가능하게 되어있다. 그리고 부하감지기와 부하제어기를 사용할 경우에는 운전중 병렬분리가 발생하여도 정상상태에

서 주파수가 일정하게 유지되도록 설계가 되었다. 이 시스템을 운전하기 위한 소프트웨어 플로우차트는 Fig. 7~Fig. 9와 같다.

소프트웨어 구성은 발전기 운전모드가 드롭이나 일정속도모드 그리고 단독운전이나 발전기간 병렬운전 또 발전기와 유틸리티간 병렬운전 모드를 모두 수용한다.

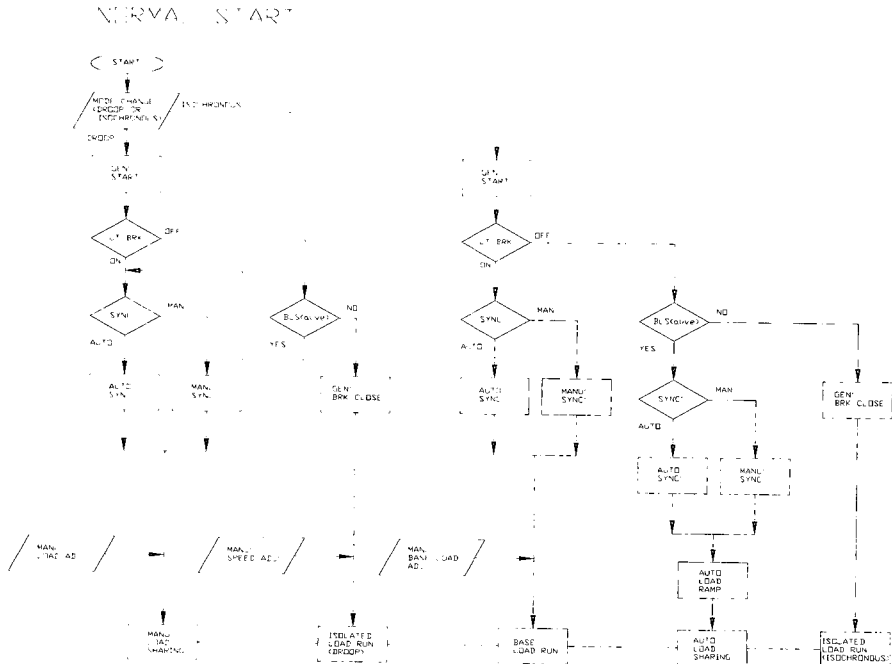


Fig. 7 Start and normal operation

일정속도 운전으로 유틸리티와 병렬운전 중에 병렬분리가 일어나더라도 자동으로 일정주파수가 유지된다. 기동 후에 정상적인 운전과 비상정지 후에 시스템이 복구되면 초기화가 가능하도록 설계하였다.

구성된 시스템의 실제 도면은 Fig. 10과 같다. Fig. 10은 발전기 2대로써 각각 단독운전 및 발전기사이의 병렬운전 그리고 유틸리티와 1대 병렬 운전 및 2대 병렬운전이 자유로이 이루어질 수 있는 시스템으로 구성하였다. 주로 운전하는 모드는 일정 주파수 운전이며 무한대 모선과 일정부하운전이 이루어지도록 되어 있다.

4. 시운전 및 결과고찰

설계된 제어시스템을 실제의 발전 플랜트에 적용하여 시운전을 행하였다. 수동 동기 및 자동 동

기가 어려움 없이 이루어지는 것을 확인하였다. 동기 후 부하조정 실험은 다음과 같이 행하였다. 먼저 발전기간에 자동 부하배분 실험을 행하였다. 4[MW]의 부하를 1번 발전기에 분담하게 한 후에 2번 발전기를 동기 투입하였다. 동기 투입 후 약 1분30초가 경과하여 양쪽 발전기의 부하가 같아 지도록 부하조정시간을 조정하여 행하였으며 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 사용된 부하제어기의 부하조정시간은 5초에서 5분까지 조정 가능하다.

다음으로 무한대 모선과의 동기 투입후 부하조정실험을 행하였다. 동기투입 후 초기 부하를 1000[kw]로 하였으며 이후 PLC로부터의 부하조정 신호에 의하여 5.8[Mw]까지 원활하게 부하조정이 이루어지는 것을 확인하였다. PLC로부터 오는 부하조정 참조값의 램프타임을 다르게하여 추종상태를 확인하였다. Fig. 12에 부하 조정 상태를 나타내었다.

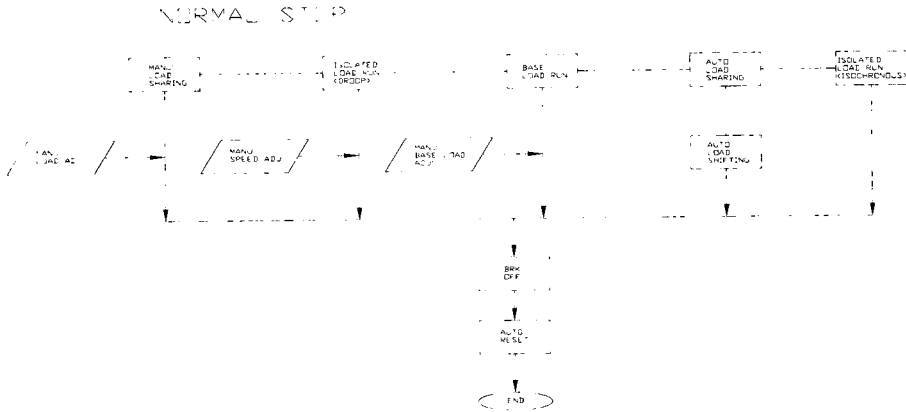


Fig. 8 Normal stop

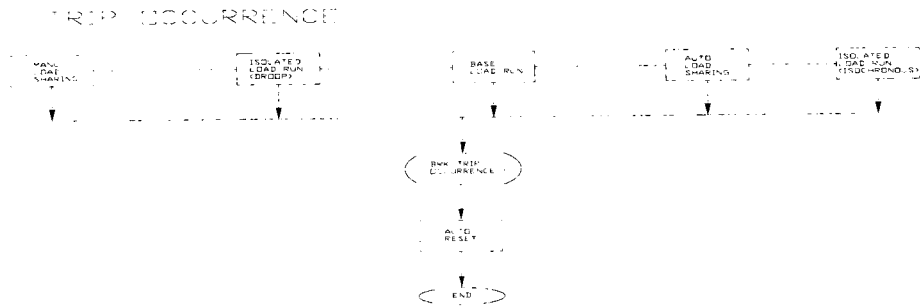


Fig. 9 Emergency stop

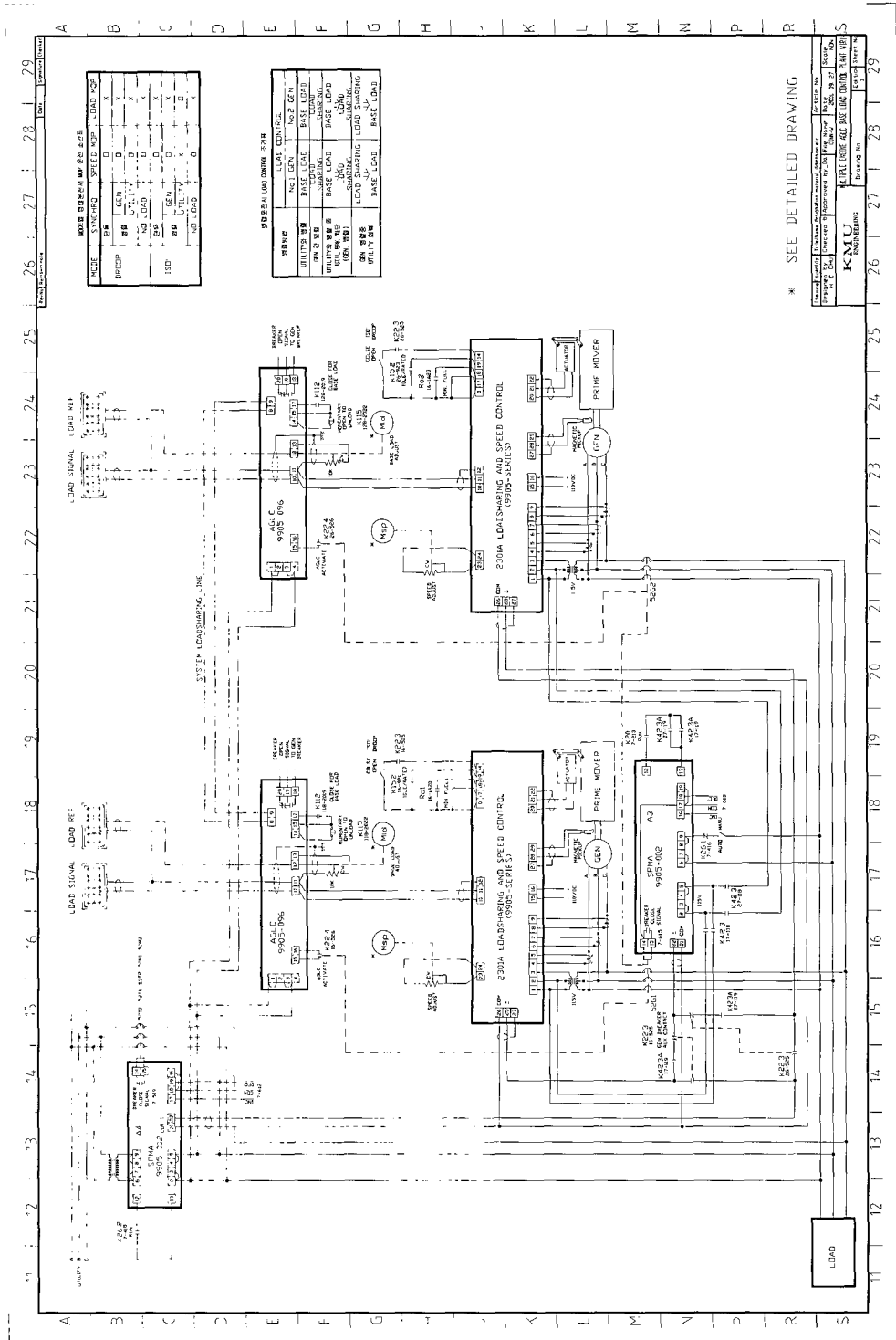


Fig. 10 Schematic drawing of control system

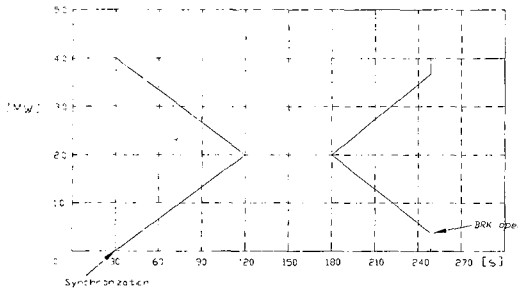


Fig. 11 Load sharing test between No.1 & No.2 generator

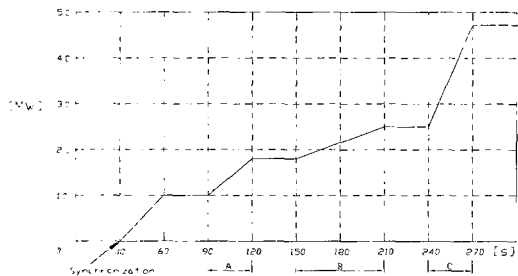


Fig. 12 Load control test of generator with paralleling to infinite bus

또 무한대 모선과 병렬운전 중 무한대 모선의 정전 실험을 행하였다. 전체의 부하는 발전기가 감당할 수 있는 양으로 조정 후에 무한대 모선에서 전체부하 6.2[Mw]의 약20[%]인 1.2[Mw], 발전기가 각각 40[%]인 2.5[Mw]씩 분담하도록 하고나서 무한대 모선의 차단기를 열었다.

Fig. 13과 같이 무한대 모선이 감당했던 부하가 과도상태가 끝나자 각각의 발전기로 분배되며 발전기는 전체부하의 50[%]씩 분담하면서 발전기간의 병렬운전 모드로 전환되어 부하분배 운전이 이루어지는 것을 확인하였다. 이때의 주파수 복귀상태는 Fig. 14에 나타나고 있다. 모선이 감당했던 부하가 발전기쪽으로 이동한 후에도 주파수가 떨어지지 않음을 확인하였다.

무한대 모선과 병렬운전중인 발전기가 갑자기 비상정지 하는 것을 실험하였다.

발전기의 차단기가 열린 후에 모든 제어 시스템이 리셋 되는 것을 확인하였으며 재기동 시에 초기화가 잘 이루어짐을 확인하였다.

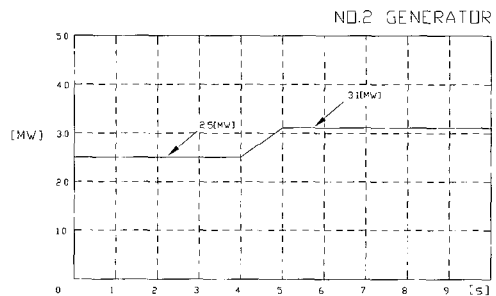
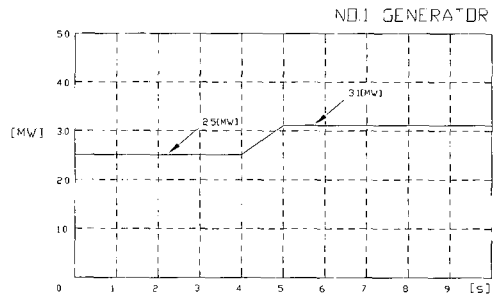
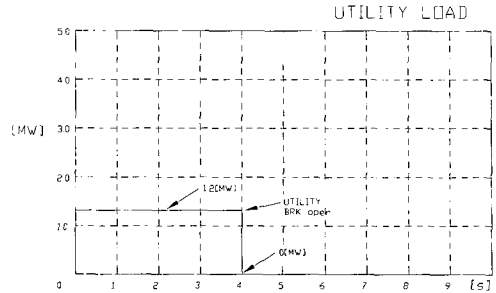


Fig. 13 Load cut off test of infinite bus

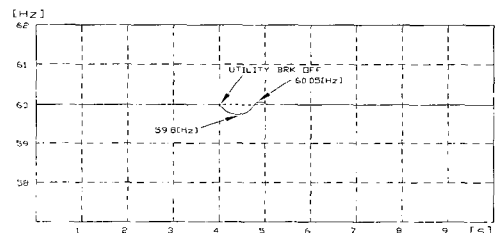


Fig. 14 Frequency recovery test after cut off the infinite bus

무한대 모선과 병렬분리 되었던 시스템의 부하 설정값을 현재 부하의 위치로 조정후 무한대모선에 동기투입을 시도한 결과 동기 전후에 부하의 변동이 거의 없으므로 아주 안정되게 병렬운전에

돌입되는 것을 확인하였다. 병렬 후에 부하 설정 값이 하강하도록 하여 무부하 발전기 때와 반대의 동작이 이루어지도록 하여 유틸리티로 역송전이 되는 것을 방지할 수 있었다.

5. 결 론

설계 적용된 병렬운전 시스템은 발전기의 부하가 걸린 상태로 유틸리티에 병렬운전이 원활히 이루어질 수 있는 제어 시스템이다. 그리고 병렬운전 중에 무한대 모선의 정전이 발생하더라도 모선의 부하를 추가로 분담한 상태에서 주파수 드롭이 되지 않고 일정한 주파수 운전 특성을 보여주는 제어시스템이다. 이 시스템을 운전해본 결과는 현장 운전요구에 부합한 여러 가지 모드를 전반적으로 만족하는 운전이 이루어지는 것을 확인 하였다.

또한 적용된 제어시스템은 발전기간의 부하분배가 잘 이루어지며 일정주파수 병렬운전이 가능함을 확인하였다. 그리고 발전기의 정비나 고장 시에 임의적으로 정지나 기동 및 동기를 할 수 있도록 구성된 기능을 만족하였다.

발전기가 비상정지될 때는 유틸리티로부터 전력을 공급받을 수가 있고 유틸리티가 차단되었을 때는 발전기로부터 안정된 주파수로 계속 전력을 공급받을 수 있으므로 무정전 전원공급이 필요로 하는 사업장에 적용이 늘어날 것으로 전망된다.

모든 운전 요구조건을 만족시키기 위해서 아날로그 제품을 사용함으로써 해서 복잡한 시스템이 구성되었으나 디지털 방식으로 구성하면 좀 더 간단히 구현이 가능하리라고 보며, 적용된 시스템이 실제 시스템이므로 부하의 스텝 시프팅이 얼마 정도에서 불안정하게 되는지와 시스템의 상승시간, 최대오버슈트, 지연시간, 정정시간 등 여러 가지 실험을 직접 해보고 시스템을 모델링해볼 수가 없는 아쉬움이 남는다.

본 논문의 내용을 실제 시스템에 적용할 수 있도록 배려해주신 삼성코닝(주) 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 문영현, 김홍래, 남해곤, 박준호, 백영식, 공역, 전력 시스템 공학, (주)사이텍미디어, pp. 217-282, 1998.
- [2] W. J. O'Halloran and K. W. Ramsay, Power Management, Woodward Governor Company, 1992.
- [3] 권세혁, 송길영, "발전기-무한모선계통의 동태안정도 해석시 A 행렬의 구조", 전기학회 논문지 제 39권 1호, pp. 1-9, 1990.
- [4] 권세혁, "발전기-무한모선 계통의 계통행렬 구조에 관한 연구", 고려 대학교 공과대학 공학논집(28집), pp. 63-70, 1987.
- [5] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, Iowa State University Press, Ames, 1977.
- [6] N. S. Dhaliwal, H. E. Wichert, "Analysis of P.I.D. Governors in multimachine system", IEEE Transactions on power Apparatus and systems, vol. PAS-97, No.2, March/April, 1978.
- [7] M. A. Pai, K. R. Padiyar and P. S. Shetty, "Sensitivity based Selection of Control Parameters for Multimachine Power Systems", IEEE PES Winter Meeting, New York, February 3-8, 1980.
- [8] 김수중, 김홍수, 양혜원, 천희영 공역, 자동제어, 청문각, 1992.

저 자 소 개



천행춘 (千幸春)

1958년 12월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1997년 한국해양대학교(원) 제어계측공학과(석사), 2003년 한국해양대학교(원) 제어계측공학과(박사).