

# 경수로형 원자력 안전등급 비상디젤발전기

## 조속기 성능개선에 관한 연구

김윤식<sup>+</sup>·전일영<sup>++</sup>·송동영<sup>+++</sup>·김창국<sup>++++</sup>·심수일<sup>++++</sup>

### Governor upgrade for PWR NPP safety related Emergency Diesel Generator

Yoon Sik, Kim<sup>+</sup>, Il Young, Jeon<sup>++</sup>, Dong Young, Song<sup>+++</sup>, Chang Kook, Kim<sup>++++</sup> and Su Il, Sim<sup>++++</sup>

**Abstract** : The following is final report for governor upgrade for PWR NPP safety related EDG Kori NPP No.2 Unit. The upgraded system includes more beneficial function like as "Slow start with starting ramp", "Generator load sensing & control capability" and "Emergency ramp during slow start". This paper show functional operation of slow start regime according to NRC regulatory guide which guide regulation to NPP safety related environment.

**Key words** : Governor(조속기), Emergency diesel generator(비상발전기), Safety related(안전등급), Upgrade(성능개선)

#### 기호설명

RPM : Revolution Per Minute  
DRU : Digital Reference Unit  
EGB : Electrical Governor with Ball Head Backup  
MOP : Motor Operated Potentiometer

및 신규원전도입이 현재의 상황이라 보아진다.

본 논문은 2004년 9월, 한수원(주) 고리원자력 가압경수로형 원자력발전소(Pressurized Water Reactor type NPP)의 안전등급 비상디젤발전기의 조속기 성능개선에 관한 보고서이다. 경수로형 원자력발전소의 비상디젤발전기는 보통 7,000kW의 대용량 발전기를 가지고 있으며, 비상시에는 기동신호 주입 후 10초 이내에 정격속도에 도달해야하는 엄격한 요건을 가진다. 다만 이러한 시험 및 성능규격이 오히려 디젤엔진의 기계적인 열화, 마모 및 응력을 증가시켜 엔진의 장기적인 사용에 있어 부정적인 영향이 있다는 원전산업계의 주장에 따라 엔진의 보호측면에서의 저속기동 방식이 도입되게 되었다.

#### 1. 서 론

현재 국내전력 생산량의 약 40%가 원자력발전을 통하여 공급된다. 원자력발전은 연료로 방사능 물질을 사용하므로 1차 측 및 2차 측 설비의 안정성 문제가 운전 중요한 문제이고 국제적인 규격과 규제코드로 설비의 안정성을 확보하고 있다. 다만, 국내 원자력 발전의 경우, 설비의 노후화가 진행되고 있고 설비의 폐기보다는 성능개선 및 설비대체를 통한 지속사용

---

+ 김윤식(한국해양대학교 전기전자공학과), E-mail:benkys@mhanara.ac.kr, Tel: 051)410-4411  
++ 전일영(제원엔지니어링 플랜트사업부), k997058@bada.hhu.ac.kr, Tel: 051)264-1377  
+++ 송동영(포항1대학 자동차과), sdy8095@pohang.ac.kr, Tel: 054)245-1128  
++++ 김창국(한국해양대학교 전기전자공학과), Tel : 051)410-4717  
+++++ 심수일(제원엔지니어링 플랜트사업부), simstar@hanmail.net, Tel: 051)264-1377

## 2. 원전비상디젤발전기 조속기 성능개선 프로그램 및 현황

### 2.1 비상디젤발전기 조속기 성능개선 프로그램

원자력 발전소의 비상디젤발전 기의 조속기는 주 터빈발전기를 통한 소내 전원상실시 주 냉각수 펌프와 같은 안전관련 기기(EFS)에 전력을 공급하는 디젤발전기의 속도와 출력을 조절하는 기기이다. 이러한 비상디젤발전기의 비상시 기능과 더불어 기존의 원전 운영기술지침은 NRC Regulatory Guide 1.108(Rev.1)을 적용하고 있어 기동신호의 주입 후, 10초 이내에 정격주파수에 도달하는 급속기동을 해야 하는 등의 엄격한 규정을 요구하고 있었다. 이러한 규정이 오히려 디젤엔진의 초기 기동 시 응력증가, 열화 및 마모를 증가시킨다는 의견이 반영되어 US-NRC 연구검토 결과 Reg. Guide 1.9(Rev.3)로 개선된 규제지침을 발표하게 되었다.

국내 원전의 경우 NRC Reg. Guide의 규격에 의거한 신뢰도 프로그램을 실시하고 있는데, 이는 미리 설정된 비상디젤발전기의 목표신뢰도를 유지하기 위하여 기동신뢰도 및 부하운전 신뢰도를 감시하고 유효 시험 실패 시 이에 대한 적절한 조치를 이행하도록 하는 신뢰도관리 종합프로그램이다.

### 2.2 기존 제어시스템의 구성 및 문제점

#### 2.2.1 기존시스템의 구성

기존시스템은 전기식 조속기로 Woodward EGA Speed Control이 사용되고 있었다. 이 시스템은 전기식 조속기로 별도의 속도측정용 센서 없이 발전기 P.T 2차 측 주파수성분을 속도신호로 이용하고, 비례기와 적분기만을 적용한 다소 노후된 형태이다.

속도설정을 행하는 속도설정기는 일반적인 속도설정기형태로 직류모터구동으로 가변저항을 구동하는 Woodward MOP(Motor Operated Potentiometer)가 설치되어 있었다.

디젤엔진의 연료조절장치와 직접 연결되는 액츄에이터는 적분형 밸브 및 백업제어기인 Woodward

EGB-35C 모델이 적용되어 있었다.

#### 2.2.2 기존시스템의 문제점

기존 시스템은 속도의 설정을 MOP를 이용한 구동 형태이므로 조속기의 속도설정은 통상 정격속도의 90~110%이다. 모터로 가변저항을 구동하여 속도설정 전압을 변경시키는 구조이므로 즉각적인 속도설정의 변경이 용이하지 않다.

기동 전에는 다른 디젤과 마찬가지로 상시 Preset RPM, 즉 정격속도의 100%에 해당하는 속도설정을 가지도록 구성된다. 또한 속도신호는 발전기 2차 측 단자 전압의 주파수 성분에 의존하므로 계자전원상실 시에는 속도의 측정이 불가능한 단점이 있다.

조속기의 정상제어 시점은 통상 정격속도의 80% 이상에서 제어출력이 행해지므로 디젤엔진의 고속 기동 시 응답특성이 늦어지는 단점도 지니고 있다.

## 3. Governor Upgrade

### 3.1 Upgrade 시스템의 구성요소

#### 3.1.1 Diesel Engine Starting Logic

Governor upgrade와 동시에 변경되는 부분으로 기존의 기동신호 회로에 부가적으로 현재의 기동이 저속기동(Slow start)인지 고속기동(Fast start) 혹은 비상기동(Emergency Start)인지를 확인하는 로직으로 구성된다.

다만, 이 로직들은 기동 시에만 적용되므로 일정한 시간대의 One-Shot 회로와 같은 구조를 가지도록 설계되어 있다.

#### 3.1.2 Digital Reference Unit(DRU)

Governor로 속도 설정신호를 전압의 형태로 공급하는 DRU는 기존의 MOP를 대신하여 그 기능을 수행하게 된다. 다만 그 구성은 8-bit분해능의 Up-Down Counter에 의하여 작동되고 점접입력신호의 상태에 따라, 즉 운전자의 속도설정입력의 증감 신호의 시간에 따라 조속기로 속도설정전압을 변경하도록 구성된다. 또한 임의설정이 가능한 두 개의 기울기 입력(Ramp input)이 가능하며 이러한 기울기 입력의 크기와 설정지점을 통하여 저속기동 및 고속기동을 만

축하도록 구성된다.

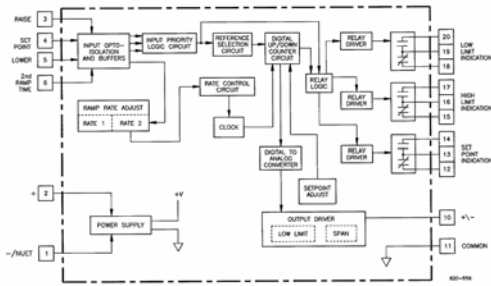


Fig. 1 The internal structure of DRU

### 3.1.2 Governor(2301A LSSC Dual-Dynamics)

기존의 Governor를 대체하는 시스템은 Woodward 2301A LSSC Dual-Dynamics Governor로 기존의 시스템보다 향상된 성능을 가진다.

C.T 및 P.T 인터페이스를 통하여 전력을 측정하여 이를 조절용 피드-백 루프회로 구성에 사용하며, 아날로그 타입의 PID 제어를 가진다.

다른 연료성상의 적용이나 추진기관 중 클러치를 가진 시스템 혹은 발전기에 적용시 등 시스템의 동특성이 달라지는 영역에서 2번째 제어기 계인을 적용할 수 있다.

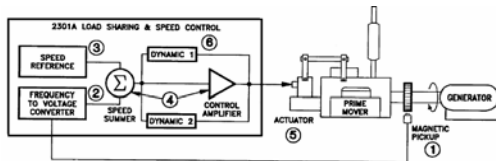


Fig. 2 The block diagram of control & Engine

### 3.1.3 EGB-35P Governor/Actuator

기존의 액츄에이터는 적분형의 EGB-35C 타입이었으나 제어기의 변경을 통하여 선형-비례형의 액츄에이터로 변경되었다. 특히 EGB 모델은 선박이나 비상발전기에서 전기적인 제어시스템의 fail 시, 백업기능을 수행할 수 있는 시스템으로 적용시는 Reverse Acting, 즉 제어 출력신호 증가시 연료감소의 방향으로 작동하는 특성의 모델이 적용된다.

이러한 특성으로 시스템의 기동 및 운전특성 분석시 액츄에이터 출력특성의 분석은 제어전류 감소시 액츄에이터의 연료증가, 즉 측정전압의 감소로 기록을 분석한다.

## 3.2 비상디젤발전기 기동로직의 분석

### 3.2.1 저속기동 로직의 분석

저속기동 로직은 비상디젤발전기의 기동신호가 정상적으로 작동하는 가운데 DRU의 1<sup>ST</sup> Ramp rate를 설정함으로써 이루어진다. Governor로의 속도설정은 정지시 항상 정격속도의 70%지점으로 설정된다.

디젤엔진의 기동신호 인가시, 저속기동 Rate는 정격속도의 70% 지점에서 100% 지점까지 30sec의 기울기를 가지고 상승하게 된다. 이때 디젤엔진의 연료는 최대로 공급되고 엔진의 회전수와 피드백되는 속도값이 편차가 발생하는 지점부터 제어를 수행하기 시작한다.

비상디젤발전기는 서서히 가속되어 30초 동안에 Slow Start로 정격속도에 도달하고, 100% 정격속도 설정 입력은 해제되고 속도조정입력(65)에 따라 계통 병입운전을 준비할 수 있는 단계에 도달한다. 다음의 그림3은 이러한 저속기동의 순차 타이밍도를 정리한 것이다.



Fig. 3 The sequential timing diagram of diesel engine slow start

### 3.2.2 고속기동 로직의 분석

고속기동 로직은 비상디젤발전기의 기동신호가 정상적으로 작동하는 가운데 DRU의 2<sup>ND</sup> Ramp rate를 설정함으로써 이루어진다. 저속기동과 마찬가지로 Governor로의 속도설정은 정지시 항상 정격속도의 70%지점으로 설정된다.

다만, 디젤엔진의 기동신호 인가시, 고속기동 Rate는 정격속도의 70% 지점에서 100% 지점까지 약 2sec의 기울기를 가지고 급격하게 상승하게 된다.

비상디젤발전기는 정격속도로 최대한 빠르게 가속

되어 정격속도에 도달하고 고속기동을 완료하게 된다. 정격속도의 80% 도달 후, 약 10초 뒤에 100% 속도설정입력은 해제되고 속도조정입력(65)에 따라 계통병입운전을 준비할 수 있는 단계에 도달한다. 다음의 그림4는 이러한 고속기동의 순차 타이밍도를 정리한 것이다.

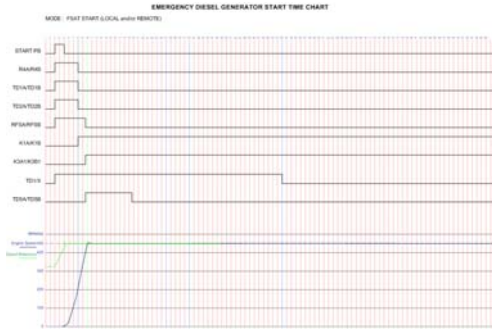


Fig. 4 The sequential timing diagram of diesel engine fast start

### 3.3 현장운전시험 및 성능분석

#### 3.3.1 비상디젤발전기

비상디젤발전기의 디젤엔진은 Enterprise 사 V16 450RPM, General Electric 7,000kW, 16극 발전기로 한국수력원자력(주) 고리원자력 2발전소에 적용되었다.

#### 3.3.2 제어기 조정 전 저속기동(Slow start)

다음의 그림 5는 디젤엔진의 제어기 조정 전 초기 기동을 데이터 계측한 그림이다.

데이터는 500sample/Sec로 측정하였고 Nicolet Vision DAQ 시스템을 사용하였고, 각 채널 절정은 다음의 표 1과 같다.

Table. 1 The channel setup of DAQ system

채널	항 목	입력값	표시볼리량
CH.1	Engine Speed	4~20 mA	0 ~ 1,000 RPM
CH.2	2301A LSSC Dmd Output	0~10 vdc	0 ~ 10 vdc
CH.3	DRU Output	-10~10 vdc	-10 ~ 10 vdc
CH.4	DRU Setpoint Contact	0~250 vcd	0 ~ 250 vcd

다음의 그림 5에서와 같이 제어기의 게인이 조정되어 있지 않은 상태에서는 부적절하게 기동되는 것을

볼 수 있다.

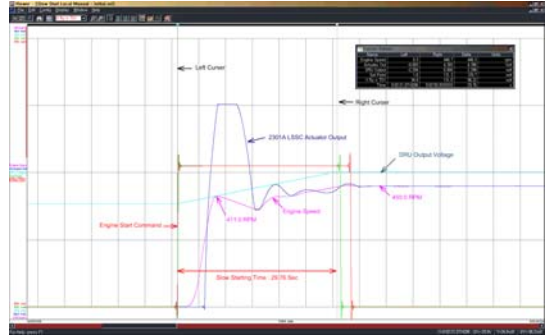


Fig. 5 Initial Startup of EDG without PID Tuning

그림과 같은 경우의 기동은 제어기의 게인이 전반적으로 낮은 경우에 발생하는 경우이다. 디젤엔진의 회전수는 약 411 RPM까지 shooting하였고 29.7sec 후에 정격속도에 도달하였다.

#### 3.3.3 제어기 조정 후 저속기동(Slow start)

다음의 그림 6은 디젤엔진의 제어기 조정 후 기동을 데이터 계측한 그림이다. 디젤엔진은 약 363 RPM에서 즉시 저속기동 속도설정 기울기 곡선과 동일한 행태로 엔진의 속도를 상승시키고 기동신호 주입 후, 약 33초 후에 정상상태 정격속도에 도달하였다.

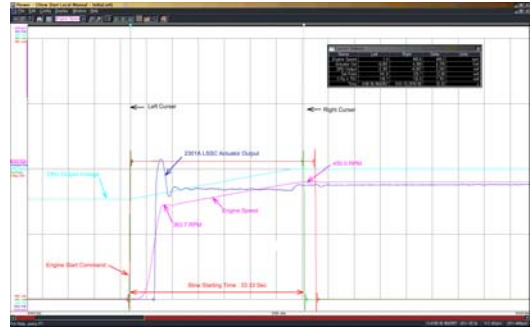


Fig. 6 Diesel engine slow start after PID tuning

#### 3.3.4 고속기동(Fast start)

다음의 그림 7은 디젤엔진의 기동모드를 "Fast start" 모드로 두고 기동하고 이를 데이터 측정한 그림이다. 디젤엔진의 기동신호와 함께 DRU의 2<sup>ND</sup> Ramp rate에 의하여 약 2sec만에 속도설정은 정격속도설정으로 도달하였고 디젤엔진의 속도는 가장 빠른 시간 내에 정격속도로 상승하였다. 기동신호 주입부터 정

격속도 도달시간은 약 6.7sec로 안전등급에서 요구하는 시간을 충분히 만족시킴을 알 수 있다.

이러한 고속기동은 비상기동신호 주입시에도 동일하게 적용된다.

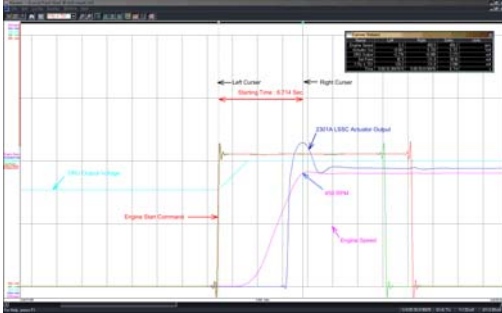


Fig. 7 Diesel engine fast start curve

### 3.3.5 저속기동 중 고속기동 전환시험

비상디젤발전기의 정기운전시험 중에도 비상디젤발전기는 Reg. Guide에서 요구하는 요건을 충족하여야 하므로 비상디젤발전기의 저속기동시험 중이라 하더라도 소내 안전신호주입시 즉각 규격요건을 만족시키는 성능을 가져야 한다.

다음의 그림 8은 저속기동 시험 중 안전신호를 주입하였을 때, 즉시 고속기동모드로 전환하여 규격요건을 만족하는지 시험한 그래프이다.

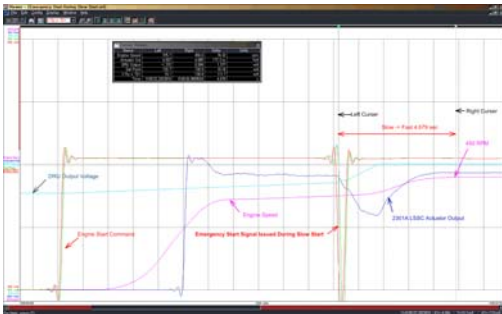


Fig. 8 Diesel engine fast mode changeover during slow start

디젤엔진이 저속기동 중 안전신호를 주입하였을 때 즉시 고기동모드로 전환되고 약 4.67sec 후에 정격속도에 도달하였다.

### 3.3.6 속도조절 및 EGB Back-up Test

비상디젤발전기가 정격속도에 도달한 후, 속도조절 스위치 65를 조정하여 정상적인 속도증가가 행해지는

지 확인하고 전기식 Governor로 입력되는 속도신호를 상실시켰을 때, EGB Governor/Actuator가 정상적으로 백업기능을 수행하여 디젤엔진이 정지되지 않음을 확인하는 시험이다. 그래프에서 속도신호가 사라진 부분이 속도측정용센서의 신호를 분리한 부분이고 신호를 재연결 시키자 전기식 조속기는 즉시 제어동작을 행함을 알 수 있다.

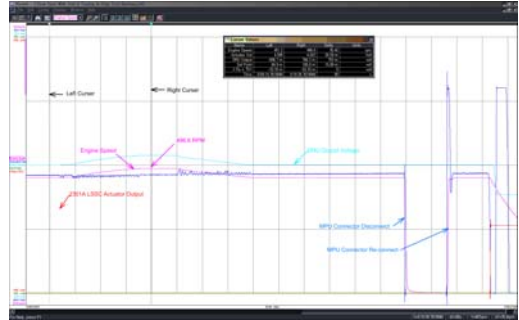


Fig. 9 Governor speed adjust test & EGB governor/actuator backup test

### 3.3.7 계통병입운전 및 부하차단시험

비상디젤발전기가 정격속도에 도달한 후, 계통과 동기운전을 실시하였다. 발전기 출력을 약 3,500kW 까지 상승시켜 Watt 피드백 계인을 조정하고 발전차단기를 수동 개방하여 속도상승을 확인한 후, 속도조정을 설정하는 시험을 수행하였다. 속도조정은 통상 기력발전소 조정율인 5%로 설정하였고, 발전기 출력을 100% 부하인 7,000kW까지 상승, 15분간 운전한 후 마찬가지로 발전차단기를 수동 개방하여 속도상승이 과속도로 되지 않음을 확인하였다.

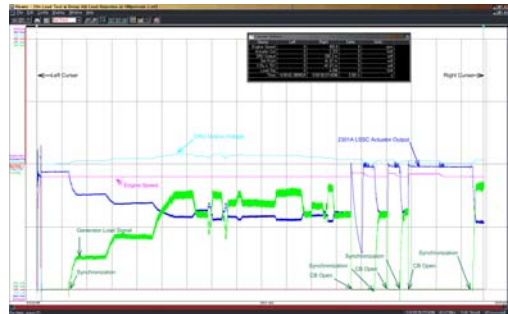


Fig. 10 Governor parallel operation with grid, speed droop adjust, load rejection test @ 100% load

## 4. 결 론

본 논문은 US-NRC Reg. Guide 권고규격의 디젤엔진 보호차원의 완화에 따른 원자력 안전등급 비상디젤발전기의 저속기동의 실적용사례를 소개하였다.

다만, NRC-Reg. Guide 규격의 세칙에는 저속기동의 구체적인 기법에 대해서는 규정된 바가 없다.

따라서 현재 국내 원전의 비상발전시스템에는 여러 가지 방식의 적용이 이루어졌고, 각기 다른 장단점을 지니고 있으나, 본 논문에서 소개하는 기동기법 및 제어기의 구성이 상대적은 많은 디젤엔진에 적용되어졌고 가장 안정적인 기동기법으로 인정되어 소개하였다. 추후의 논의에서는 국내 원전 비상디젤발전기의 기동기법에 대한 표준화방안과 같은 심화논의가 필요하며, 각 사업소 별로 엔진 제작사가 상이하므로 앞으로 계측된 데이터를 통한 디젤엔진의 모델링 및 시뮬레이션을 통한 제어기의 안정성 검토와 같은 연구가 지속적으로 이루어져 안전등급 내 설비의 안정성 증대에 기여할 수 있도록 연구가 진행되어야 한다고 본다.

## 후 기

본 연구결과에 도움을 주신 한국수력원자력(주) 고리 원자력 관계자분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 전일영, 김윤식, “대용량 양수발전소의 디지털 조속기 적용에 관한 연구”, 한국박용기관학회 추계학술논문집, pp. 213-216, 2003. 10
- [2] Y.S Kim, S.G Lee and I.Y Jeon, “Development of Speed Regulation Monitoring System for Turbine Generator”, Proc. of ICEP '04, pp. III-315~318, Oct.2004
- [3] 전일영, “고리원자력 2발전소 4호기 A & B 계열 EDG 조속기 성능시험 결과보고서” 제