

'98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 탠덤형 비상디젤발전기의 제어성능 분석

### Control Performance Analysis of Tandem EDG.

배상민, 정환성, 김태운, 김길정

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

정현중, 최광희

한국전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요약

탠덤형 비상디젤발전기는 발전기가 가운데 있고 엔진이 양쪽에 있는 구조로 두 대 엔진사이의 부하불균형이라는 문제를 근본적으로 내재하고 있다. 탠덤형 비상디젤발전기는 비례, 적분, 미분 제어기에 의하여 제어되며 제어성능은 부하불균형, 헌팅, 기동시간, 부하급변 안정성과 밀접한 관계가 있다. 탠덤형 비상디젤발전기에서 부하불균형, 헌팅, 기동시간, 부하급변 안정성에 대한 문제가 발생하였을 때 제어성능을 분석함에 의하여 해소할 수 있다.

#### Abstract

Because tandem EDG(Emergency Diesel Generator) is composed of one generator in center and two engines in sides, the problem of load unbalance between two engine remains systematically. The tandem EDG is controlled by proportional integral differential controller, and control performance is closely related with load unbalance, hunting, starting time, and fast load change stability. When the problems about load unbalance, hunting, starting time, and fast load change stability occur in tandem EDG, these can be solved by the analysis of control performance.

# 1. 서론

원자력발전소의 비상디젤발전기는 소외전원 상실 사고시 또는 냉각재 상실 사고시 등의 비상신호에 의하여 기동되어 안전계통의 전원을 공급하여 원자로를 안전하게 정지시키는 역할을 수행하고 있다. 영광 제2발전소 비상디젤발전기는 발전기가 중앙에 한 개 있고 양측에 엔진 두 대가 있는 탠덤형 디젤발전기로 다음그림과 같은 제어구조를 지니고 있다.

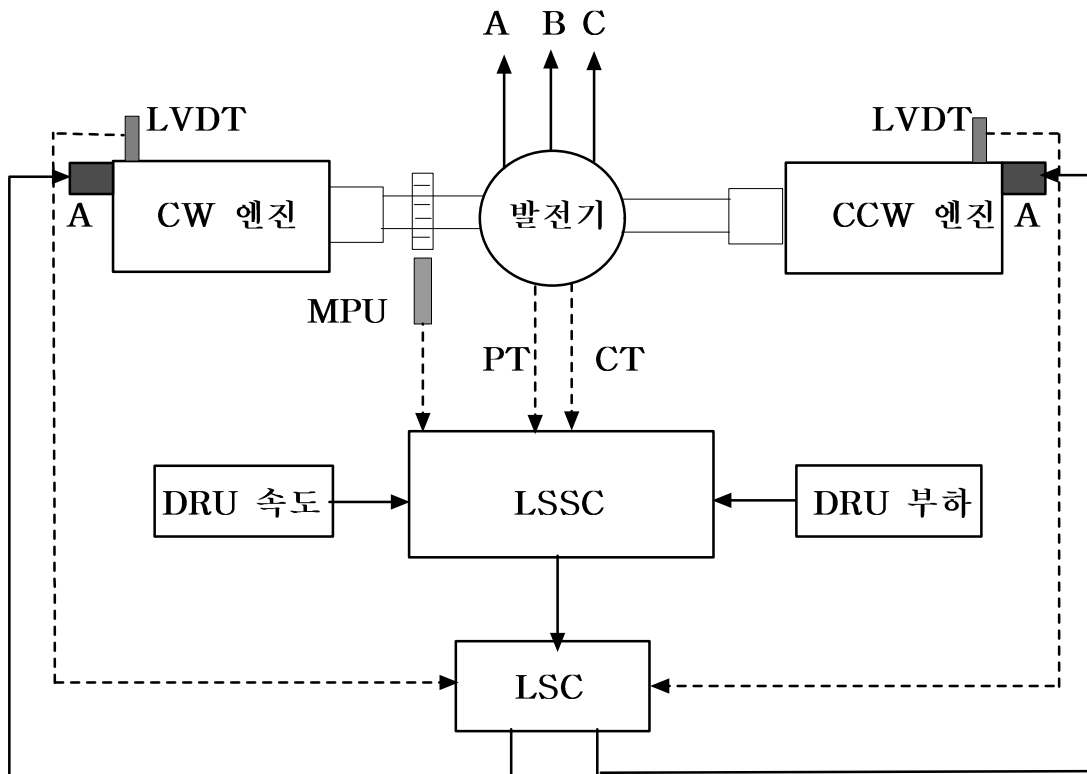


그림 1 탠덤형 디젤발전기 제어도

여기서 사용하는 약어는 다음과 같다.

- LVDT(Low Voltage Differential Transformer) : 출력을 감지하는 센서
- PT(Power Transformer) : 전압을 검출하는 변성기
- CT(Current Transformer) : 전류를 검출하는 변성기
- LSSC(Load Sharing and Speed Controller) : 엔진 동특성 PID 제어기
- LSC(Load Sharing Controller) : 출력 편차 제어기
- MPU(Magnetic Pick Up) : 속도를 검출하는 센서
- DRU(Digital Reference Unit) : 원하는 속도와 부하를 입력하는 장치

비상디젤발전기는 정상시의 전기식 조속기와 제어전원 고장시의 유압식 조속기에 의하여 연료량을 제어한다. 전기식조속기는 MPU에서 속도를 검출하여 DRU 속도와 비교하고, PT와 CT에서 전력을 검출하여 DRU 부하와 비교하여 그 오차를 영으로 진행하도록 LSSC에서 연료량의 동특성을 제어한다. 엔진이 두 대이므로 엔진 출력의 편차를 LVDT에서 검출하여 LSC에서 편차를 줄이도록 제어한다.

## 2. 본론

### 2.1 부하불균형

두 대 엔진의 출력편차인 부하불균형은 엔진과 발전기를 연결시키는 커플링의 손상의 직접적인 원인이 된다. 두 대 엔진의 출력편차는 출력운전 중에 LSC에 의하여 보상되도록 설계되었지만 기준점의 편차가 발생하면 제어기는 오류신호에 의하여 제어하게 된다. 기준점의 편차가 발생하는 원인은 유압식 조속기의 속도 기울기의 편차, 전기식 구동기의 궤도 편차, 연료랙의 초기위치 편차가 된다. 부하불균형의 실질적인 결과는 배기가스 평균온도의 편차로 나타나게 된다.

#### 2.1.1 유압식 조속기의 편차

비상디젤발전기는 공기에 의하여 기동되어 4-5초 후인 속도 제어신호가 형성될 때까지 유압식 조속기에 의하여 지배된다. 유압식 조속기의 속도기울기의 편차가 발생하면 속도가 적은 즉 출력이 적은 엔진 쪽의 커플링이 손상되게 된다. 그림2는 기존의 유압식 조속기의 편차가 발생한 것과 검교정으로 해소한 것을 나타낸다.

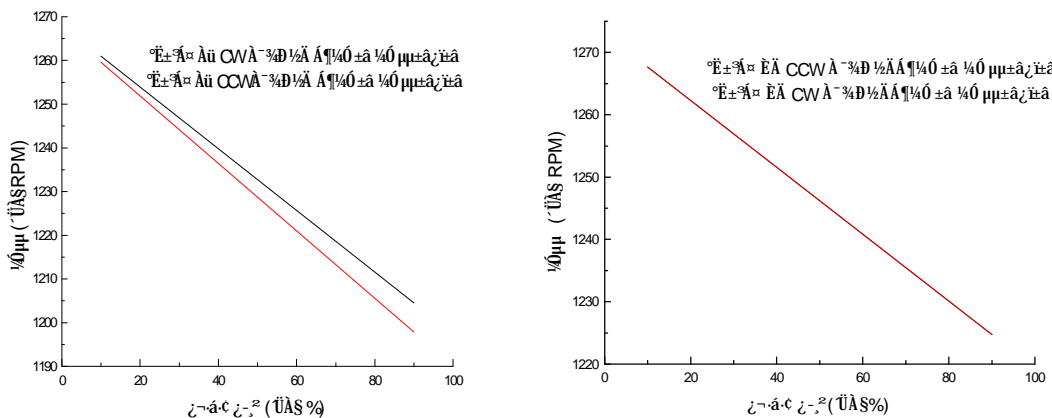


그림 2. 검교정 전후의 유압식 조속기의 편차

#### 2.1.2 전기식 구동기의 궤도 편차.

엔진이 기동되어 4-5초후 동특성 PID 제어기에서 160mA에서 20mA의 신호를 공급하면 전기식 구동기는 연료랙을 0%에서 100%까지 선형으로 구동시켜야 한다.

동특성 PID 제어기는 하나이고 전기식 구동기는 엔진별로 두 대이므로 똑같은 신호를 공급할 경우 전기식 구동기의 궤도의 편차가 발생하면 부하불균형이 발생하게 되는 것이다. 그림3은 기존의 전기식 구동기의 궤도의 편차가 발생한 것과 검교정으로 해소한 것을 나타낸다.

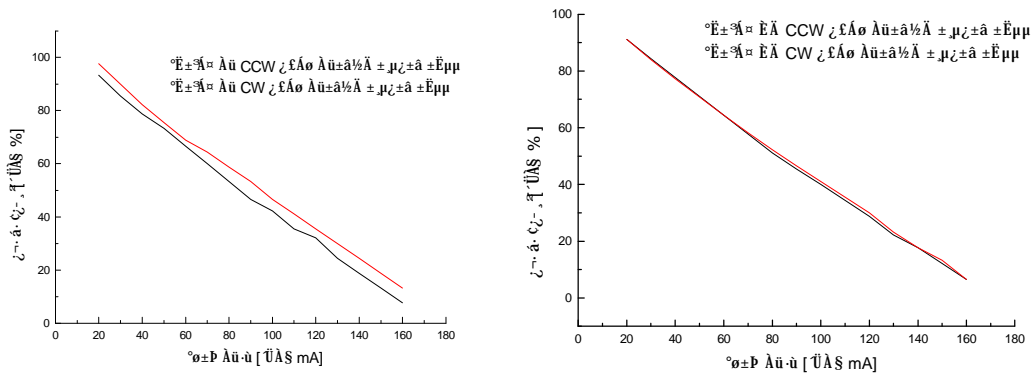


그림 3. 검교정 전후의 전기식 구동기 궤도의 편차

### 2.1.3 연료랙의 초기 위치 편차

연료랙은 전기식 구동기와 1차로 연결되고 2차로 우측 실린더의 연료 분사펌프와 좌측 실린더의 연료 분사 펌프와 연결되어 있다. 1차로 연결된 부분의 편차가 발생하면 엔진의 부하불균형 즉 배기가스 평균온도의 편차가 발생하고 2차로 연결된 부분의 편차가 발생하면 우측 실린더의 배기가스 평균온도와 좌측 실린더의 배기가스 평균온도의 편차가 발생한다. 표 1은 연료랙의 초기위치의 편차를 10분의 1로 조정 한 후 LVDT 전압으로 측정한 것이다.

표준 말굽형 게이지	CCW LVDT 전압	CW LVDT 전압
1 mm	7.84 VDC	7.87 VDC
6 mm	6.90 VDC	6.92 VDC
11 mm	5.92 VDC	5.94 VDC
16 mm	4.92 VDC	4.93 VDC
21 mm	3.94 VDC	3.95 VDC

표 1. 조정 후 연료랙의 초기위치 편차

## 2.2 제어기의 제어 성능

전기식 PID 제어기의 제어성능은 Gain, Reset Time, Compensation으로 결정된다. Gain을 어느정도 증가 시키면 응답폭인 Overshoot와 Undershoot가 커져 현팅이 발생하고 더욱 증가시키면 진동이 발생한다. 반면 Gain이 적으면 제어속도가 느려져 안정화되는 시간 즉 기동시간이 늘어나게 된다. Reset Time을 증가시키면 적분시간이 길어져 Overshoot와 Undershoot가 작아지므로 기계적으로 안정하게 된다. Reset Time을 더욱 증가시키면 부하의 변화에 따른 응답특성이 느려지는 단점이 있다. Reset Time을 감소시키면 Overshoot와 Undershoot가 커져 기계적으로 불안정하게 된다. Compensation을 증가시키면 변화에 민감하게 되어 적은 부하의 변화나 외란에 의하여도 비상디젤발전기가 불안정하게 된다. 그러나 Compensation을 너무 적게하면 부하의 변화에 따른 응답특성이 저하되게 된다. 그러므로 비상디젤발전기의 특성에 적합한 Gain, Reset Time, Compensation을 설정하여야 한다.

### 2.2.1 현팅

현팅은 그림 4와 같이 속도의 반복적인 리드믹한 변화로 정의할 수 있다.

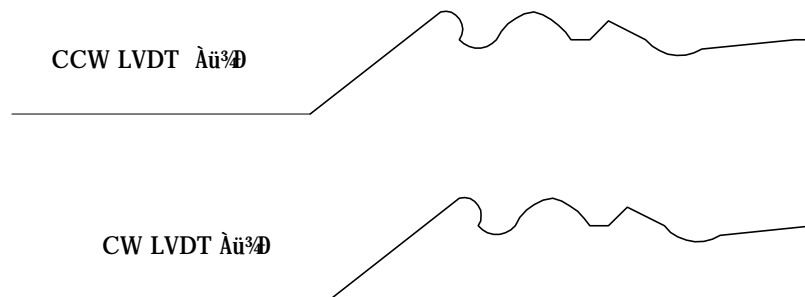


그림 4. 현팅 곡선

산과 산 또는 골과 골 사이의 적분시간인 Reset Time을 증가시키면 곡선이 완만하게 된다. 또한 Compensation을 약간 감소시키면 변화에 따른 응답속도가 느려져 곡선이 완만하게 된다. 현팅을 해소하려면 Reset Time을 증가시키고 Compensation을 약간 감소시키면 된다.

### 2.2.2 기동시간 초과

기동시간은 기동신호 후 전압과 주파수가 정격으로 안정될 때까지 걸리는 시간으

로 정의할 수 있다. 대부분 기동 후 7초 이내에서 전압이 정격으로 안정되고 기동 후 10초 근처에서 주파수가 정격으로 안정된다. 주파수가 규정된 급속 기동시간인 10초 이내로 만족하기 위하여는 시동공기에 의하여 완전히 열린 연료가 재빨리 감소되어야 한다. 연료를 재빨리 감소시키는 것은 제어속도 즉 Gain과 관련이 있다. Gain은 세밀히 주의하여 극히 약간만 증가시켜야 한다. 그 이유는 약간 더 증가시키면 Overshoot와 Undershoot가 커져 오히려 기동시간이 증가하기 때문이다.

### 2.2.3 부하급변 안정성

부하가 급변하는 경우, 특히 전체 부하의 탈락시 비상디젤발전기가 과속도로 정지하게 되는 경우가 있다. 부하 급변시 과속도의 원인이 되는 Overshoot를 감소시키기 위하여 Reset Time을 증가시키고, 부하 급변에 따른 제어속도를 약간 증가시키기 위하여 Gain의 극히 약간만 증가시킴으로써 부하 급변시의 안정성을 확보할 수 있다.

### 2.2.4 배기가스 평균온도

배기가스 평균온도는 엔진의 유효출력과 관계하므로 두 대 엔진의 배기가스 평균온도의 편차는 부대 엔진의 부하불균형과 거의 같은 의미이다. 두 대 엔진의 배기가스 평균온도의 편차는 부하불균형의 원인인 유압식 조속기의 편차, 전기식 구동기 궤도의 편차, 연료랙의 초기 위치 편차와 더불어 분사시기의 편차에서 주로 발생한다. 또한 연료랙의 2차 연결지점인 좌측 실린더 군과 우측 실린더 군사이의 연결 편차에서 좌측 실린더의 배기가스 평균온도와 우측 실린더의 배기가스 평균온도와의 편차가 발생할 수 있다. LVDT에서 지시하는 연료랙의 위치는 편차가 없으나 배기가스 평균온도의 편차가 존재한다면 실제로 두 대의 엔진의 유효출력의 편차는 존재하는 것이다. 반대로 LVDT에서 지시하는 연료랙의 위치는 편차가 있으나 배기가스 평균온도의 편차가 존재하지 않는다면 실제로 두 대의 엔진의 유효출력의 편차는 존재하지 않는 것이다. 그러므로 두 대 엔진의 부하불균형은 배기가스 평균온도와 동시에 고려하여야 한다. 두 대 엔진의 배기가스의 평균온도의 편차라는 관점을 벗어나 배기가스의 평균온도가 고온이 되는 원인을 기계적인 면에서 검토하면 흡입공기량의 감소로 인하여 상대적으로 연료의 주입량이 증가한 경우와 흡입공기량은 일정한데 연료의 주입량이 증가한 경우와 엔진의 냉각성능이 저하된 경우이다. 흡입공기량의 감소로 인하여 상대적으로 연료의 주입량이 증가한 경우는 흡입공기필터의 성능 저하, 터보차저의 손상으로 인한 공기 압축 효율의 감소, 인터쿨러

의 이물질 축적, 연소용 공기 필터의 성능 저하가 하나의 원인이 될 수 있다. 흡입 공기량은 일정한데 연료의 주입량이 증가한 경우는 연료의 분사시기의 부적합하여 흡입공기보다 연료의 양이 많을 경우이다. 엔진의 냉각성능이 저하된 경우는 윤활유와 냉각수의 누출로 인하여 엔진이 과열되었을 때이다.

### 3. 결론

탠덤형 비상디젤발전기는 단독형 비상디젤발전기의 문제에 더하여 부하불균형이 추가되므로 부하불균형을 예방하는 방안을 강구하여야 한다. 부하불균형은 엔진의 유효출력인 배기가스 평균온도의 편차와 연관하여 검토하여야 한다. 부하불균형이 발생하면 배기가스 평균온도를 기준으로 하여 유압식 조속기의 편차, 전기식 구동기 궤도의 편차, 연료랙의 1차 연결부위 및 2차 연결부위의 편차를 감소시켜야 한다. 전기식 PID 제어기의 제어성능은 Gain, Reset Time, Compensation으로 결정되며 엔진의 동적특성에 적합하게 설정하여야 한다. 헛팅은 Reset Time과 Compensation의 조정으로 해소가능하고, 기동시간은 Gain으로 조정가능하며, 부하급변시의 안정성은 Gain과 Reset Time으로 조정 가능하다. 탠덤형 비상디젤발전기는 엔진과 발전기를 연결하는 커플링의 손상을 방지하기 위하여 부하불균형 즉 배기가스 평균온도의 편차의 문제가 가장 중요하므로 전기식 제어기의 제어성능과 아울러 배기가스 평균온도를 실시간으로 감시하여 부하불균형을 예방하여야 한다.

### 참고문헌

1. SACM, Diesel Engine Instruction Manual, 1993.
2. Erich J. Schulz, Diesel Mechanics, 1983.
3. Clive T. Jones, Diesel Plant Operations handbook, 1991.
4. Karl W. Stinson, Diesel Engineering Handbook, 1963
5. EPRI NP-5924, Suveillance, Monitoring, and Diagnostic Techniques to Improve Diesel Generator Reliability, 1988.
6. KINS/HR -143, 비상디젤발전기 신화도 안전성 평가, 1996.
7. 김종철 외, 현대내연기관, 1996.