

가스터빈 발전소의 기동제어루프 모의실험

우주희, 최인규
전력연구원 발전연구실

Startup Control Simulation of a Gas Turbine Power Plant

Joo-Hee Woo and In-Kyu Choi
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - We acquired operating data to develop a digital control system adaptable to gas turbine power plant with about 50 to 100 MW. We analyzed an existing analog control logic using these data. We developed control application programs for turbine automatic start up. We showed a similar result compared with an existing analog control system by computer simulation.

1. 서론

국내에서 아날로그 제어시스템을 사용하고 있던 가스터빈 발전소의 제어시스템을 디지털 제어시스템으로 변환하기 위해 운전데이터를 취득하였다. 기존의 제어시스템은 GE사의 MARK I SPEEDTRONIC으로 연산증폭기, 저항, 커패시터 등을 사용하여 제어루프가 구성되었고 릴레이를 사용하여 시퀀스제어가 구성되어 있었다. 제어루프의 여러로직은 각각의 아날로그 제어카드에서 이루어지며, 시퀀스제어와 유기적으로 연결되어 가스터빈의 제어가 이루어지고 있다[1,2].

본 논문에서는 이들 자료를 이용하여 터빈 기동에서부터 발전기의 계통병입이전까지의 취득한 운전데이터를 이용하여, 디지털 터빈 제어시스템을 구현하기 위해 기능별로 각 제어루프를 디지털 제어시스템으로 재구성하고 모의실험을 실시하였다. 구현된 제어루프는 기동제어, 가속제어, 속도제어, 온도제어이고 운전상황에 따라 각 제어루프의 최소값이 가스터빈에 필요한 연료요구량이 된다. 2장에서 구현할 각 제어시스템의 로직 및 취득한 운전데이터의 특성을 설명하고, 3장에서 변환된 디지털제어시스템을 사용한 모의실험결과를 설명하고 4장에서 결론을 맺는 순으로 구성되어 있다.

2. 적용된 가스터빈발전소의 루프제어시스템 구성

2.1 구성

기존의 아날로그제어시스템은 아래 그림 1과 같이 구성되어 있으며, 구성된 주요 제어루프는 다음과 같다. 기동제어루프는 가스터빈이 기동하는 동안 각 진행단계에 필요한 공급연료를 결정하는 것으로, 점화, 예열, 가속 및 터빈의 정격속도까지의 제어기능과 터빈정지에 따른 보호회로 기능을 가지고 있다.

속도제어루프는 가스터빈의 속도/부하제어를 위해 터빈을 정격속도로 유지하면서 요구하는 전기적출력을 생산하는데 필요한 기능을 수행한다.

온도제어루프는 터빈의 배기가스온도를 미리 설정된 온도제한치에 의해 연료량을 조절하는 기능을 가지고, 공기압축기의 입구변을 조절하여 유입되는 공기량을 조절하는 공기량제어와 밀접한 관계가 있다.

연료제어루프는 위의 세 가지 제어루프에서 결정된 연료요구량신호 가운데 최소값을 선택하여 연소기에 실제로 공급되는 연료량을 제어하는 기능을 가진다.

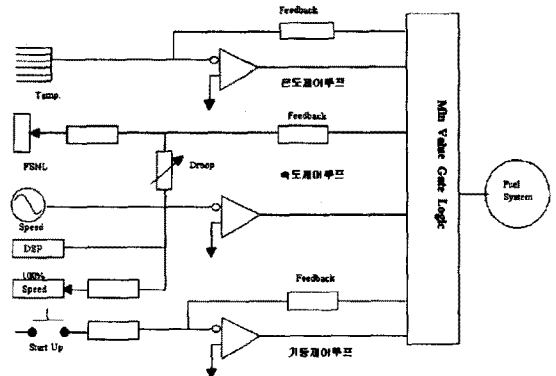


그림 1. 기존의 아날로그 제어시스템의 구성

그림 1에서 Temp는 터빈의 배기가스온도, Speed는 터빈의 속도, DSP(Droop Set Point)는 속도/부하설정치, Droop는 속도조정을 설정치를 나타내는 가변저항, Feedback은 최종 연료요구량 신호의 저항을 통한 제한을 각각 나타낸다. 그리고 FSNL은 2.2절의 기동제어에서 설명이 된다. 취득한 운전데이터는 NHP(터빈 속도), 최종 연료요구량(FSR), 기동제어의 FSR, 속도제어의 FSR, 온도제어의 FSR, 배기가스온도(TX), 연료량(FFN), DSP, 바이패스밸브 개도, IGV개도신호, 압축기의 차압신호(CDP) 등이다.

2.2 기동제어

기동제어는 정해진 스케줄에 의해 점화, 예열, 가속을 위해 필요한 연료요구량 신호(FSR : Fuel Stroke Reference)를 결정한다. MARK I의 정해진 값은 그림 2와 같다.

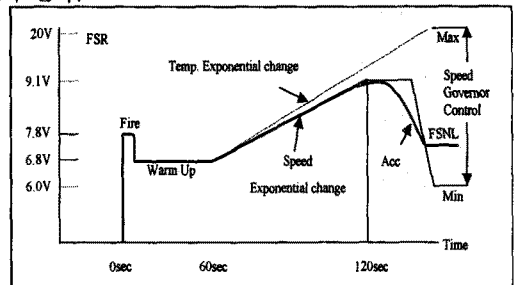


그림 2. 기동제어에서의 기준 연료요구량 곡선

Fire(7.8V)는 연소기에서 점화에 필요한 충분한 연료를 공급하는 신호로서 보통 터빈 정격속도의 20%대에서 이루어지고, Warmup(6.8V)은 점화후 화염을 안정시킬수 있는 최소한의 연료공급을 위해 1분간 지속되고, Acceleration(최대 9.1V)은 터빈속도를 증가시키기위한 필요한 연료량을 이미 설정된 가속율로 지속적으로

증가시킨다. 최대 공급가능 연료량은 20V이고, 연소기에서 화염이 유지될수 있는 최소 연료량은 6.2V이다. FSNL(Full Speed No Load, 7V)은 터빈이 계통병입되기 전의 연료량으로 정격속도로 회전할때의 연료량을 나타낸다. 이러한 스케줄을 디지털로 구현하여 모의 실험을 실행한다.

2.3 기동제어에서의 가속제어

가스터빈은 예열이 끝나면 터빈을 승속시키기 위한 가속제어가 이루어지는데, 이때 요구되는 연료량은 가속제어와 온도제어에 의해 결정된다. 그림 9의 취득한 운전 데이터를 살펴보면, 점화가 끝나고 예열이 시작될 시점에 만약 배기가스온도가 설정치보다 크다면, 기동제어부의 가속제어가 투입되지 않고 온도제어가 투입되어 이에 의한 연료요구량이 결정된 상황을 보여주고 있다. 따라서 구현할 디지털 제어시스템에서 이러한 변화가 적절히 일어나는지를 확인해 보아야 한다. 아날로그 제어시스템에서 구현된 가속제어 알고리즘은 아래와 같다. 실제 가속율은 속도차이를 이용하여 구현하고, 설정된 가속율은 0.5%/sec(Fast:1.0%/sec)로 두었다.

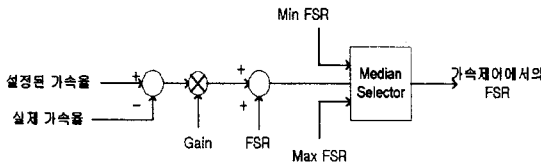


그림 3. 가속제어루프

2.4 온도제어루프

온도제어는 터빈의 운전온도(배기가스온도)를 설정된 온도설정값과 비교하여 계산된 신호에 따라 공급되는 연료량을 가감하여 규정된 온도한계를 초과하지 않도록 제한하는 것이다. 온도설정값은 CDP에 따라 그림 4와 같이 설정되며, 12개의 배기온도신호에 정렬 및 평균값의 알고리즘을 사용하여 제어에 사용한 온도신호를 만든다.

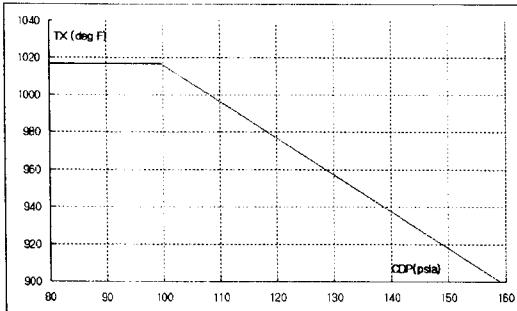


그림 4. CDP에 따른 온도설정값

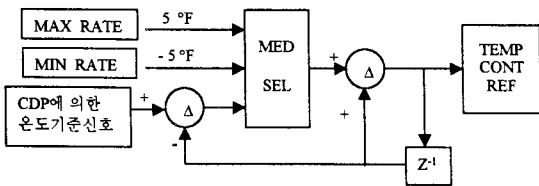


그림 5. 온도기준신호 생성로직

온도제어루프의 로직은 그림 5에서 온도설정값 계산하는 부와 그림 6에서 배기가스온도의 오차에 의해 제어가 이루어지는 부를 보여주고 있다. 온도설정값의 증가율은 $\pm 5^\circ\text{F}$ 로 설정하였고, 온도차 신호에 이득(%/°F)을 곱한값과 최종 FSR에 1차 시간지연함수를 통과한 값을

합한 값에 최대 및 최소값중 중간값이 선택되도록 되어 있다.

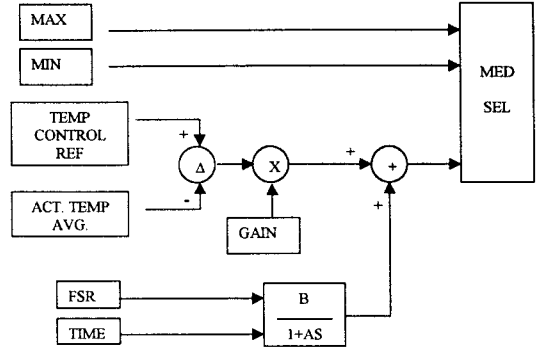


그림 6. 온도제어로직

2.5 속도제어루프

속도제어는 운전되고 있는 터빈의 실제 속도를 검출하여 검출된 속도를 속도/부하설정치인 DSP와 비교하여 원하는 터빈의 속도를 유지시키면서 부하제어에 적용된다. 계통병입이전에는 DSP가 일정한 값(100.3%)으로 유지되고 있다. 계통병입이후 전기적출력을 증가시키기 위해 일정한 율(1, 2, 8%/min)로 증가된다. 이 증가된 오차가 터빈속도증가에 기여하지는 않고, 전기적출력 증가에 기여하게 된다.

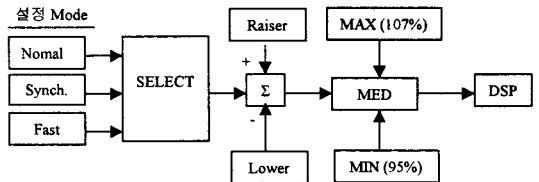


그림 7. DSP 설정 로직

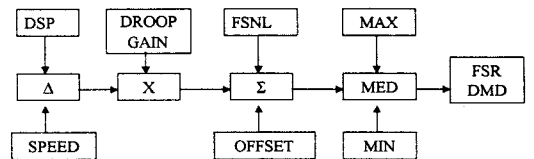


그림 8. 속도제어루프 로직

2.6 최소값 선택회로 및 취득한 운전데이터 분석

그림 1에서 보았듯이 최종 연료요구량신호(FSR)은 기동제어, 가속제어, 온도제어, 속도제어루프의 각각에서 결정된 FSR가운데 최소값이 선택되고 이 값이 연료량제어시스템에 전달되어 연소실에 공급되는 연료를 제어하게 된다. 그림 9에서 "Startup"은 기동제어, "Temp"는 온도제어, "Acc"는 가속제어, "Speed"는 속도제어 구간을 각각 나타내고, "FSR Final"은 각 제어루프의 최소값을 나타내고 아날로그 회로의 다이오드의 Turn-On 전압만큼 각 제어루프에서 계산된 값보다 약간 작은 값을 보여주고 있다. 그림 9를 보면 계통병입까지의 운전데이터 파형을 보여주고 있다. 점화까지는 기동제어가 선택되고, 예열구간동안에는 배기가스온도가 설정값보다 커서 즉시 온도제어부가 투입되고(만약 설정값보다 작다면 기동제어가 계속 동작함), CDP가 증가함에 따라 온도설정값도 증가하게 되고, 터빈속도가 약 45% 근처에서 가속율에 의한 FSR이 온도제어에 의한 FSR보다 작아지게 되어 가속제어가 투입되어 터빈이 승속하게 되어 정격속도에까지 도달하게 된다.

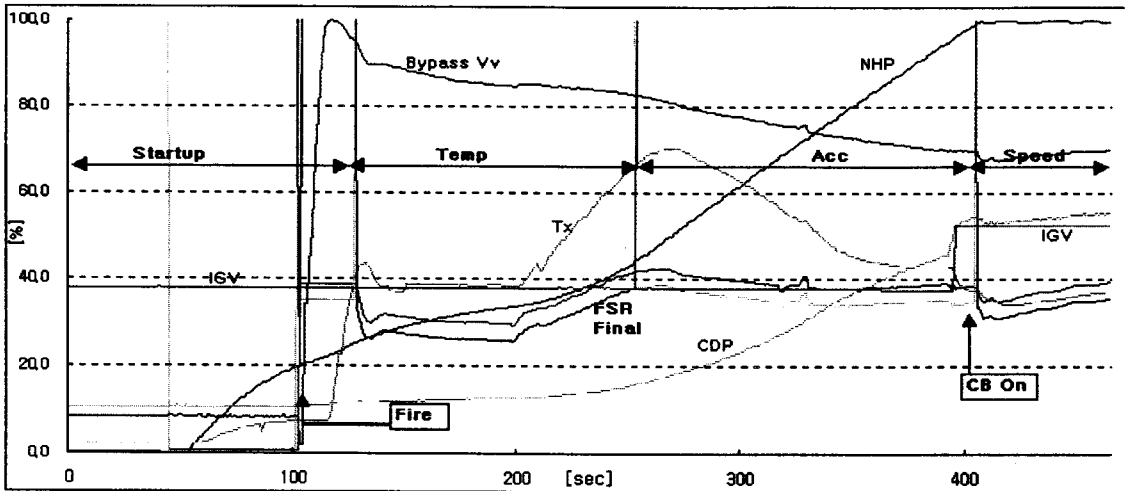


그림 9. 취득한 운전데이터 파형

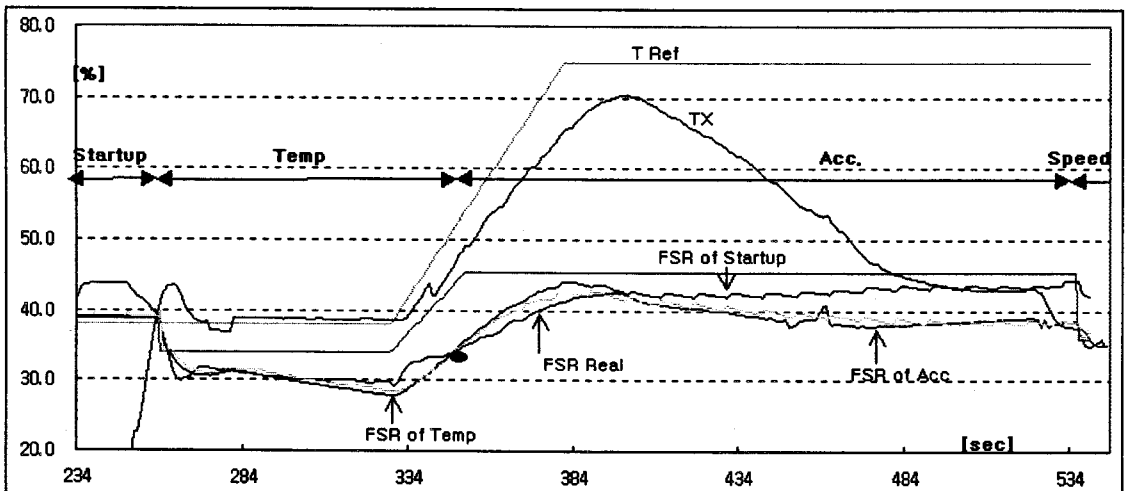


그림 10. 모의실험 결과

속도제어는 계통병입이전까지는 FSNL값이 속도오차신호(DSP-NHP)에 더해지므로 항상 다른 제어에 의한 FSR보다 크게 되어 절대로 투입되지 않는다. 계통병입 이후에서는 기동제어부가 투입되지 않고, 요구부하량에 따라 DSP가 증가하여 속도제어가 이루어지고 정격부하에 도달되면 다시 온도제어가 투입된다. 온도제어루프는 전 운전구간에서 온도설정치가 실제 배기가스온도보다 낮으면 언제나 투입된다.

3. 모의실험 결과

취득한 운전데이터를 사용하고 2절에서 보여준 디지털 제어로직을 사용하여 모의실험한 결과를 그림 10에서 보여준다. 그림 10에서 "T Ref"는 그림 5의 제어로직을 사용하여 계산한 값이고, "FSR Real"은 그림 9의 "FSR Final"과 같은 파형을 모의실험 결과와 비교하기 위해 표시하였고, "FSR of Startup", "FSR of Acc", "FSR of Temp"는 각 제어루프에서 모의실험한 결과를 나타낸다. 실제 취득한 FSR값과 모의실험에서 구한 각 제어로직의 출력값의 최소값과 비슷한 값을 가지며, 제어루프의 변환시점도 실제와 비슷한 결과를 보여주었다.

4. 결론

국내 가스터빈발전소에서 기존의 아날로그 제어시스템에서 취득한 운전데이터를 분석하여 디지털 제어시스템으로 구현하기 위한 로직을 구성하고 모의실험을 하였다. 실제 취득한 운전데이터와 모의실험한 결과를 비교해보면, 각 제어루프의 변화시점이 서로 유사하고, 최종 연료요구량의 절대값도 유사한 결과를 보여주고 있어 모의실험 결과를 기준으로 디지털 제어시스템으로 변경하여 활용할 경우 기존의 성능을 충분히 만족할 수 있음을 보였다.

(참고 문헌)

- [1] General Electric, "Speedtronic Control", 1977
- [2] 한국전력공사, "영월 및 군산 복합가스터빈 기본운전지침서", 1992
- [3] 한국전력공사, "기력터빈 디지털 제어시스템 개발(1차 중간보고서)", 1998
- [4] 정창기, 우주희, "발전소 운전데이터에 의한 가스터빈 시스템인식", 대한전기학회 하계학술대회, 1998. 7.