

중소형 증기터빈의 기동특성 및 제어로직 고찰

육심균, 서종석, 조창호, 최준혁, 우주희*
 한국중공업 기술연구원, 전력연구원 발전연구실*

**Analysis of Startup Characteristic & Control Logics
 of a Steam Turbine**

Sim-Kyun Yook, Jung-Surk Sur, Chang-Ho Cho, June-Hyug Choi, Joo-Hee Woo
 Hanjung R&D Center, KEPRI

Abstract : Nowadays, the trend has been changed from MHC through EHC to D-EHC in turbine control system. But many plants aren't being operated by D-EHC System. We are trying to retrofit one of the EHC to D-EHC system. In this paper, we are going to introduce an overview of the control logics from turbine prewarming to synchronization of small and medium size power plants, respectively.

1. 서론

발전소의 핵심 제어 설비인 터빈 제어시스템에 대한 기술이 진보적으로 발달하여 90년대 초반에는 터빈운전의 신뢰성 향상을 위해 터빈 제어시스템은 3중화된 구조(TMR : Triple Modular Redundant)로 향상되었을 뿐만 아니라 고장포용, 자기진단 및 다양한 Voting 방법을 이용하여 터빈이 보다 안정적이고 신뢰성 있는 운전이 될 수 있도록 터빈 제어기술이 발달해 가고 있는 현실이다.

현재 국내 발전소에서 운전되고 있는 터빈 제어시스템은 기계 유압 제어식(MHC : Mechanical Hydraulic Control) 및 전기 유압 제어식(EHC : Electro Hydraulic Control) 시스템이 있으며, 최신의 디지털 제어식(D-EHC, Digital Electro Hydraulic Control) 시스템으로 개조 혹은 설치 운용되고 있는 곳도 많이 있다.

본 고에서는 현재 전기식 아날로그 제어시스템으로 운전되고 있는 200MW급 중용량 증기터빈 발전소의 터빈 제어시스템을 전기식 디지털 제어 시스템으로 개조하기 위해 현재 전기식 디지털 제어 시스템으로 운전되고 있는 발전소의 터빈 제어 회로에 대한 분석 결과를 소개하고자 한다. 본 고에서 소개할 내용은 터빈 예열에서부터 계통 병입 이전단계까지의 터빈 운전상태 및 속도편차와 밸브 개도와와의 관계, 속도증가율, 속도조정을 그리고 비례 혹은 비례적분 제어에 의한 속도제어 등에 관해 D-EHC 제어시스템인 Mark-V(GE사의 제품으로 현재 디지털 터빈제어시스템으로 가장 많이 사용하고 있음)로 운전되고 있는 중/소용량 발전소의 제어회로에 대해 분석한 결과를 소개하고자 한다. 아울러 이들 제어시스템의 제어회로 분석에 따른 알고리즘 파악과 개조 대상발전소의 운전특성 파악, 도면분석, 운전 데이터 분석 등을 통하여 제어회로를 설계하였으며 이에 대해서도 소개하고자 한다.

개조 대상 발전소의 사양을 살펴보면 GE사의 200MW급 재열재생 증기 터빈으로 주증기 정지밸브(MSV : Main Stop Valve) 2개, 주증기 제어밸브(HP Control Valve) 6개, 재열증기 정지밸브 및 재열증기 제어밸브(Reheat Stop & Intercept Valve) 2개로 구성되어 있으며, 예열에서 초기부하까지 주증기 정지밸브의 내부밸브(MSV Bypass Valve)에 의해 운전되고 있다.

2. 본론

2.1 예열

로터 예열은 터빈의 주요 부분에 대한 온도가 제작사에서 요구/추천하는 것보다 낮을 때 시행하며, 예열방법은 터빈에 따라 다소 차이가 있다. 이는 보조증기를 사용하는 방법과 고압터빈 바이패스 계통을 통해 냉간 재열증기 배관을 거쳐 증기를 공급하는 방법 및 주증기 정지밸브의 내부 바이패스 밸브를 통하여 증기를 공급하는 방법 등이며, 터빈 자동 기동장치(ATS : Automatic Turbine Startup)를 갖춘 터빈은 예열시 급속운도 상승률이 자동으로 선택된다.

1) 소용량 발전소의 예열 로직 분석

본 고에서 소개하는 소용량 발전소의 운전 형태는 앞서 언급한 개조 대상발전소의 운전방식과 거의 유사하다. 즉, 예열에서 초기부하 및 전주분사(Full Arc Mode)까지 주증기 정지밸브의 내부변이 부하를 조절하는 형태를 취하고 있다. 즉, 내부변(Bypass Valve)이 정격의 약 10%까지 부하를 조절하도록 설계되어 있다. 여기서 로터의 예열 제어회로를 살펴보면

가) 예열하기 위한 초기조건

로터를 예열하기 위한 조건으로, 로터 예열 요구 신호, 로터 예열 취소 신호, 로터 예열 허용 속도, 터빈 리셋(Reset)신호, 속도 설정 값, 모든 재열증기 정지밸브 및 재열증기 제어밸브의 폐쇄(Close)접점신호 등과 같은 여러 가지 신호점점들의 조합에 의해 이루어져 있으며 이들 점점신호들의 동작상태에 따라 예열을 위한 준비작업이 이루어졌음을 알려준다. 본 고에서 소개하는 터빈의 경우 예열하기 위한 조건으로 예열시 속도 설정값은 0%로 설정되어 있고 재열증기 정지밸브 및 재열증기 제어밸브가 닫혀있어야 가능하도록 설계되어 있다.

나) 주증기 정지 밸브의 최대/최소 개도 결정

터빈의 예열조건이 만족되면 주증기 정지 밸브의 개도를 결정하여야 한다. 즉, 예열에 필요한 증기량을 결정하여야 하는데 이는 터빈 및 용량에 따라 큰 차이가 있다. 본 소용량 발전소의 경우, 최대 2.0%로 설정되어 있으나 예열시 터빈이 어느 일정속도 이상으로 승속하게 되면 주증기 정지 밸브의 최대개도를 0.0%로 설정하여 과속을 방지하도록 구성되어 있다. 그리고 최소 개도는 0.0%로 설정되어 있다.

다) 예열용 주증기 정지 밸브 설정(Setpoint)신호

주증기 정지 밸브 개도에 대한 상하한 값이 결정되면 주증기 정지 밸브는 일정한 율로 운전자의 요구에 따라 증감하게 되는데 이는 운전원이 조작반(CRT/Control Panel)의 Pushbutton을 조작함으로써 가능하다. 그러므로 운전자가 신호점점을 조작함에 따라 최대/최소 한계내에서 밸브 개도의 설정값이 결정되게 된다.

라) 예열용 주증기 정지 밸브 기준(Reference)신호
 주증기 정지 밸브에 대한 설정값이 구해지면 이에 대한 주증기 정지 밸브의 위치 기준신호가 결정되어 제어하는데 이는 일정한 기울기를 가지고 움직이게 된다. 즉 일정한 율을 가지고 설정값을 추종해 간다. 이 기준값이 밸브를 동작시키는 신호값이 되며 증기유입량을 결정하는 값이 된다.

다음 그림 2-1은 앞서 설명한 예열시 밸브개도 설정을 위한 주증기 정지 밸브개도 설정 로직의 한 예를 보여주고 있다.

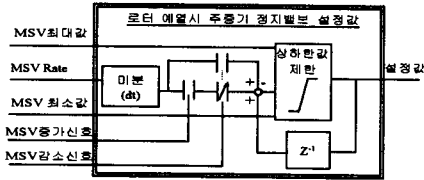


그림 2-1 예열시 주증기 정지 밸브 설정값 회로 예

2) 중용량 발전소의 예열 알고리즘 분석

본 고에서 소개할 중용량 발전소의 터빈 예열 방식 또한 앞서 언급한 소용량 발전소의 예열 방식과 거의 유사하다. 그리고 주증기 정지 밸브가 로터 예열기능을 담당하나 부하조절 기능은 없는 것으로 파악되었다.

가) 예열하기 위한 초기조건

로터가 예열 가능한 상태로 있는지는 다음과 같은 신호들의 조합에 의해 결정되어 진다. 즉 예열 허용 속도, 예열 요구신호, 제어밸브의 개도상태, 허용속도 등의 신호접점 상태에 따라 예열조건이 결정된다.

나) 주증기 정지 밸브의 설정값 결정

로터 예열을 위한 밸브의 최대/최소 개도가 결정되고 주어진 범위내에서 운전자가 조작반을 조작함으로써 주증기 정지 밸브개도의 설정값이 결정되어 진다. 이 설정값은 일정한 설정율을 가지고 증감하게 된다. 이 회로는 그림 2-1과 같은 회로로 표현할 수 있다.

다) 주증기 정지 밸브 개도 기준 신호결정

주증기 정지 밸브의 설정값이 결정되면 이에 준한 밸브 개도 기준값(MSV Position Ref.)을 결정하여야 한다. 본 로직은 로터의 예열시 밸브의 위치 기준값과 예열시 발생하는 속도편차 등을 고려하여 설정하게 되며, 정해진 율을 가지고 증감하게 된다. 즉, 일정한 기울기를 가지고 설정값을 추종하게 된다. 그리고 예열시 발생하는 속도편차의 크기를 고려하여 필터기능(1차 지연요소)이 액티브(Active)되어 밸브 위치 요구값을 결정하도록 설계되어 있다.

라) 서보 밸브(SV : Servo Valve) 구동신호

주증기 정지 밸브의 개도 기준신호가 결정되면 이 기준신호에 의해 실제 서보 밸브의 입력신호가 산출되고 증기유입량을 결정하게 된다.

상기에서 언급한 터빈 예열 회로를 간략하게 정리하여 나타내면 그림 2-2와 같이 나타낼 수 있다.

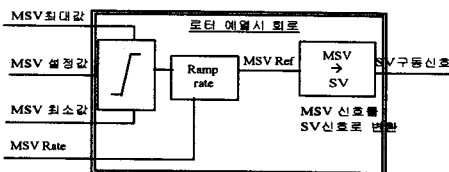


그림 2-2 터빈 예열 회로 다이어그램 예

2.2 터빈의 승속 및 속도제어

터빈의 수명은 기동, 정지, 급격한 부하운전 등에 따라 큰 영향을 받는다. 특히 열응력에 의한 영향 즉, 고온 고압의 증기와 금속체 사이의 온도차에 의해 발생하는 현상으로 금속온도와 증기온도 사이의 온도차, 열팽창 및 수축량 등에 의해 내부응력이 발생하게 되어 터빈 수명에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 터빈 운전시 금속의 온도에 대한 변화를 감시하면서 운전을 한다.

예열이 끝나고 나면 터빈은 승속을 하게 되는데 승속은 터빈의 상태량에 따라 승속률이 정해진다. 일정한 승속률로 터빈은 승속을 하며 어느 일정 속도에 이르면 정속운전을 행하게 되고 임계속도 부근에 이르면 터빈이 공진되는 것을 방지하기 위해 일정한 크기와 주기를 가지고 터빈의 속도를 증감시킨다. 그리고 정격속도에 이르면 계통병입을 위한 준비작업이 이루어진다.

1) 소용량 터빈의 속도 제어

가) 터빈 속도 설정값(Setpoint) 결정

- * 최대 속도 설정값
- * 최소 속도 설정값
- * 설정율
- * 증감 신호접점

터빈 속도 설정값을 결정하기 위해서는 상기와 같은 값들이 우선적으로 정의되어야 하며 수동운전의 경우, 운전자의 조작에 의해 최종적으로 목표속도가 결정되어 진다. 만약 터빈 속도 설정값을 1000RPM으로 설정하고자 할 경우, 조작반의 푸시버튼을 눌러 1000RPM이 되도록 설정하면 된다.

나) 가속율 설정

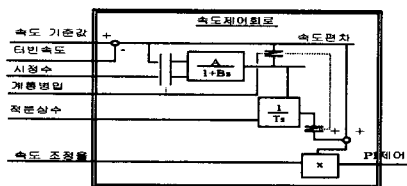
터빈의 운전 방식에 따라 자동 혹은 수동 설정이 가능하고 터빈의 운전상태에 따라 열간기동(고속 : Hot), 고온기동(중속 : Warm), 냉간기동(저속 : Cold)방식으로 나눌 수 있으며 이에 따른 가속율이 결정되어 진다. 그리고 운전자의 조작에 의해 가속율을 임의로 설정할 수 있으며, 터빈자동 기동장치 혹은 로터 열응력 감시시스템(RSI : Rotor Stress Indicator)이 구비된 경우는 터빈의 상태에 따라 터빈 자동 기동 장치 혹은 로터 열응력 감시시스템에 의해 모든 조건(가속율, 정속유지시간 등)을 결정하게 된다.

다) 속도 기준신호 결정

속도 기준신호는 예열시는 0%로 설정되고 트립 후 감속 중 재 운전이 필요할 경우 현재 터빈 속도를 기준값으로 설정하게 되며 정상 운전시는 앞서 결정한 속도 설정값과 가속율에 의해 속도 기준신호값이 결정된다.

라) 주증기 정지 밸브 및 서보 밸브의 기준신호

속도 기준신호와 터빈 속도와의 차가 터빈속도 편차가 되며, 이 속도편차는 계통병입 전/후에 따라 필터기능 및 적분제어 기능이 온/오프 된다. 즉, 계통병해 구간에서는 필터 기능이 오프되고, 적분기능은 활성화 되도록 설계되어 있다. 이렇게 구한 속도 편차값에 대해 속도 조절율(Regulation)을 고려하게 되면 결국 속도 제어를 위해 비례적분 제어를 활용한 결과가 된다.



그림

2-3 소용량 터빈의 속도 제어 예

이렇게 구한 속도 편차는 결국 주증기 정지 밸브 기준신호로 작용하게 된다. 그리고 주증기 정지 밸브 기준신호는 밸브 특성을 고려하여 최종적으로 서보밸브의 최종 입력값으로 작용하여 밸브를 구동하게 된다. 즉 속도 편차에 비례하는 증기유량을 증감할 수 있게 밸브를 제어하게 된다.

그림 2-3은 앞서 설명한 소용량 터빈의 속도 제어 회로의 간략화한 예를 보여주고 있는데 이는 속도제어를 위해 계통병입 구간에서 비례적분 제어를 활용한 속도 제어 회로의 한 예이다.

2) 증용량 터빈의 속도 제어

증용량 터빈의 속도 제어도 소용량의 속도제어와 매우 유사하다. 단지 각 설정값과 운전 특성 즉, 계통병입 후 주파수 불감대(Deadband) 운전여부, 주증기 정지 밸브에 의한 승속 혹은 주증기 제어밸브/재열증기 제어밸브에 의한 승속 등에 따라 다소 차이는 발생할 수 있으나 본 고에서 검토한 증용량의 경우 소용량과 매우 유사함을 알 수 있었다.

전체적으로 회로를 살펴보면 목표 속도(Target Speed)와 가속율(Acc. Rate)이 결정되면 이에 준한 속도 기준신호가 구해지고, 이 기준 신호와 터빈속도와 차에 의한 속도 편차가 발생하게 된다. 이 속도편차에 대해 불감대 회로를 거친 후 비례제어의 이득에 해당되는 속도 조정율을 고려한 새로운 속도 편차가 구해지는데 이 속도편차는 비례제어기에 해당되며 본 로직에서는 계통병입 구간에서 속도 제어를 위해 비례제어기만을 활용하였다는 것을 알 수 있다. 여기서 구한 속도 편차를 다시 필터링한 후 최종의 속도편차값을 산출하게 된다. 이 값이 결국 주증기 정지 밸브의 기준값이 되고 최종적으로 서보밸브의 신호로 입력되게 된다.

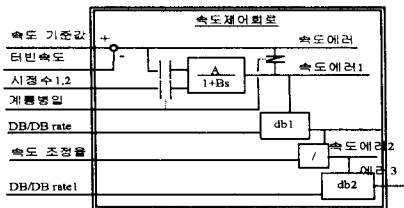


그림 2-4 증용량 터빈의 속도 제어 예

2.3 대상발전소의 제어회로 설계 (예열-병입이전구간)

개보수 대상발전소에 대한 운전특성 파악, 취득한 운전 데이터 분석, 도면 검토, 및 본 고에서 검토한 중/소용량 발전소의 제어회로에 대한 분석 결과 등을 종합하여 설계한 제어회로(로직)의 간략화한 회로를 소개 하고자 한다.

1) 내부 바이패스 밸브(MSV)

내부 바이패스 밸브는 터빈의 예열 및 전주분사 운전 시 부하를 제어하는 제어용 밸브이다. 그림 2-5는 바이패스 밸브의 동작 시퀀스 및 부하분담 특성 곡선을 보여주고 있다.

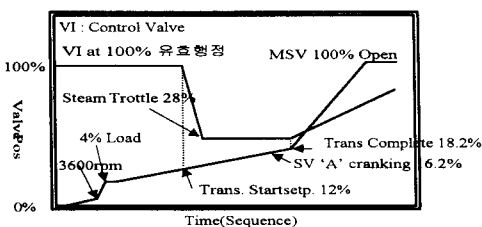


그림 2-5 내부 바이패스 밸브의 특성 곡선

2) 예열 회로 설계안

본 고에서 설계한 예열회로는 그림 2-6과 같다. 즉, 예열을 위한 예열 초기 조건 회로 설계 및 취득한 운전 데이터에 의한 밸브의 상하한치와 증감설정치를 설정, 예열시 속도설정 및 과속시 보상로직과 운전자에 의한 증감회로로 구성/설계하였다.

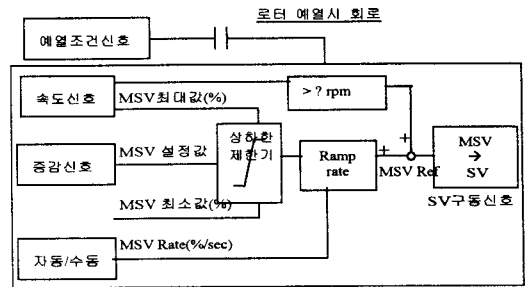


그림 2-6 예열시 제어회로 설계안

3) 계통병입 이전단계까지의 속도 회로 설계안

계통병입 이전까지의 속도 회로에 대한 설계안은 그림 2-7과 같다. 즉, 속도 목표치와 가속율은 수/자동 모두 설정가능하며 이들 값들이 결정되면 속도기준값이 산출되어진다. 그러면 이 값과 속도의 차에 의해 속도 편차가 계산되고 이 편차를 비례적분제어기에 의해 속도 제어가 이루어지도록 회로를 설계하였다. 그림에서 점선 부분은 비례적분제어 회로를 나타내고 있다.

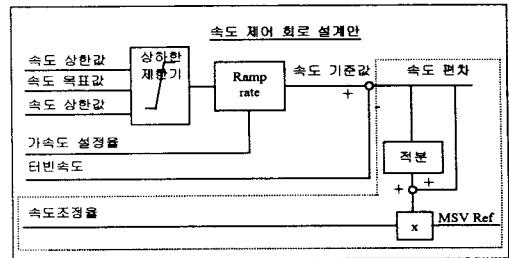


그림 2-7 속도 제어회로 설계안

3. 결론

본 고에서 터빈 예열에서부터 계통 병입 이전 단계까지에 대한 터빈 제어회로에 대해 검토해 보았다. 즉, 터빈 예열을 위한 제어회로와 속도편차에 따른 최종 밸브 개도 신호 및 속도증가율, 속도조정을 그리고 비례 혹은 비례적분 제어에 의한 속도제어 등에 관해 전기식 디지털 제어 시스템인 GE의 Mark-V로 운전되고 있는 소용량, 증용량 발전소의 제어회로에 대한 각각의 분석 결과에 대해 소개하였다.

그리고 현재 전기식 아날로그 제어시스템(EHC)으로 운전되고 있는 증기터빈 발전소의 제어시스템을 디지털 제어식 시스템(D-EHC)으로 개조할 때 대상발전소에 적용한 제어회로에 대한 개략적인 설계안에 대해서도 알아 보았다. 그리고 적용할 제어로직은 계속해서 시뮬레이션과 보안을 거쳐 적용할 계획이다. 끝으로 본 논문은 향후 개보수공사 혹은 제어회로 파악 및 수정/설계코자 할 때 도움이 되었으면 한다.

(참고문헌)

1. 한전동해/북제주 화력 발전처 Mark-V Speedtronic
2. 한전 서천화력발전소 기본 운전 지침서, 1990.
3. 한국전력공사 발전처 교육용 터빈 운전 실무, 1998