

발전방식별 여러 가지 터빈의 속도제어 비교

최인규, 정창기
전력연구원

A comparison of speed control of various turbines according to power plant types

I.K.Choi, C.K.Jeong
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - The steam generator which produces thermal energy from coal or gas is a very important device in power plants, including the turbine driving synchronous generator which transforms kinetic energy into electrical energy. The turbine and the generator are driven by many kinds of media according to the types of which power plants are classified into steam turbine generator, gas turbine generator, water turbine generator and so on. This paper introduces the overspeed protection as well as the various speed and load control methods of some types of turbines.

투입된 에너지는 전기적 에너지로 나타나는 것이다. 따라서, 기본적으로는 터빈 속도제어의 결과로 발전기 출력이 발생한다.

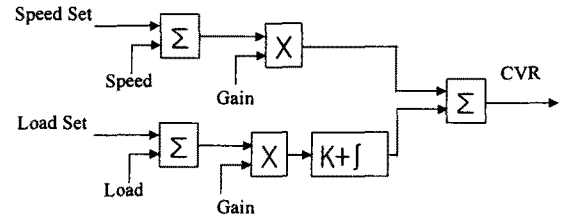
2.2 발전방식별 속도제어 개요

2.2.1 증기터빈

〈그림 1〉과 〈그림 2〉는 실제 운전중인 터빈의 제어 회로를 나타내고 있다. 계통병입 이전에 속도설정치와 실제속도를 비교하여 편차를 계산한 후 제어기 이득을 곱하여 밸브개도 기준값(CVR 또는 SFR)을 산출한다. 계통에 병입되면 속도설정치는 100%로 고정되고, 이후에는 출력설정치를 조정하여 운전기준점을 결정한다. 출력설정치와 실제출력을 비교하여 적분을 채용한 것은 출력제한 회로로서 발전소에 따라 채용여부는 선택적으로 운용되고 있다.

1. 서 론

산업 발전의 원동력인 전력을 생산하는 발전소의 중요한 기기를 열거하면 석탄 또는 가스와 같은 연료에서 열 에너지를 생산하는 에너지 발생기, 증기 또는 가스 등의 에너지를 이용하여 발전기를 구동하는 터빈, 터빈의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기 등이 있다. 터빈과 발전기를 구동하기 위해서는 여러 가지 매체가 사용되고 있는데, 이 매체의 종류에 따라 증기터빈 발전소, 가스터빈 발전소, 수력발전소 등 다양한 형태로 구분하고 있다. 이 논문에서는 국내의 여러 가지 발전소에서 실제로 운전되고 있는 여러 가지 터빈(증기터빈, 가스터빈 및 수력터빈)의 속도제어 제통을 발전방식, 계통병입 전후 및 터빈 바이패스 시스템 채용 여부, 발전기 출력제한 선택여부 등에 따라 비교한 내용 및 증기 터빈의 과속도 제어에 관하여 소개하고자 한다.

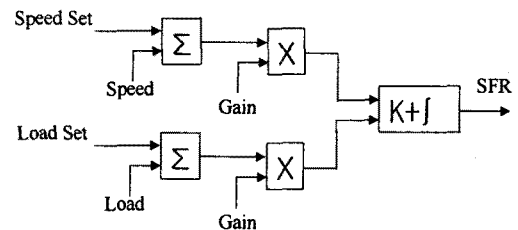


〈그림 1〉 증기터빈 제어회로 예

2. 본 론

발전소의 주기기인 발전기와 이의 원동기인 터빈을 제어하는데 있어서 진동, 윤회유 압력, 밀봉유 압력, 냉각수 온도, 복수기 진공 등 중요한 요소가 많이 있으나 그 중에서 가장 중요한 요소는 속도이다. 종래에 기계식 터빈 조속장치와는 달리 근래의 터빈 조속장치는 디지털 전기식이 개발되어 광범위 하게 운전되고 있으며 컴퓨터를 이용한 제어이기 때문에 여러 가지 기능을 구현할 수 있고, 과속도 보호에 관하여도 여러 가지 알고리즘이 개발되어 있다. 수력터빈은 고온·고압의 작동유체가 필요하지 않으므로 기동정지를 매우 빠르게 수행할 수 있으나 증기터빈에 사용되는 작동유체는 대단히 고온·고압이므로 예열과정을 거쳐야 하며 또 승속을 시작했어도 정격속도까지 도달하기 위해서는 대기시간이 장시간 소요된다. 저속회전 상태에 있는 터빈을 기동하면 작동유체의 유량 증가에 따라 속도가 상승한다. 그러나 터빈축과 직결된 발전기가 전력계통에 병렬로 연결되면 작동유체의 유량 증, 터빈으로 유입되는 기계적 에너지가 증가해도 발전기의 출력, 즉 전기적 발전량이 증가할 뿐 터빈의 속도 증가량은 계측할 수 없을 정도로 미세하다. 이는 터빈의 속도가 증가하려 해도 계통의 큰 부하에 전기적으로 구속되어 있어서 속도의 증가량은 거의 없고

〈그림 2〉에서 출력제한 회로를 채용하지 않으면 고부하와 저부하에서 동일 주파수 변화에 대해 증기량 조절 밸브 개도변화량이 동일하고, 출력제한 회로를 채용하면 발전기 출력 변화량이 동일하게 나타나므로 제어시스템의 불감대, 제어밸브의 비직선성 등을 어느 정도 극복하여 주파수 추종운전시 발전기 출력제어의 선형성을 개선하는 효과가 있다. 그러나 신호선 단선 등, 발전기 출력전송기에 고장이 발생하면 제어가 불안정해질 우려가 있다

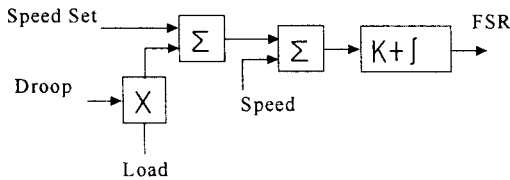


〈그림 2〉 증기터빈 제어회로 예

발전기 출력제한 적용시 <그림 1>에서는 출력편차가 제거되어 비례적분 제어기의 입력이 없으면 제어동작이 중지되나 <그림 2>에서는 출력편차와 속도편차의 합이 영(零)으로 되는 상태에서 비례적분 제어기의 동작이 중지되는 점이 서로 다르다. 따라서, <그림 1>의 경우보다 <그림 2>의 경우와 동일 주파수 변화에 대한 발전기 출력 변화량이 크게 된다. 또, 동일한 속도편차에 대응하는 제어량이 <그림 1>의 경우는 조절밸브 개도로서 수하율을 고려하고 <그림 2>의 경우는 발전기 출력으로서 조정을 고려하고 있다.

2.2.2 가스터빈

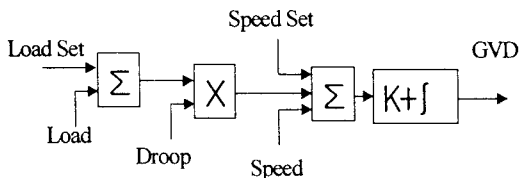
<그림 3>에 가스터빈 제어기의 주신호 흐름도를 나타내었다. 발전기가 계통에 병입된 상태에서 속도설정치는 95%에서 105%까지 운전원에 의하여 연속적으로 조절되며, 속도수하율(Droop)은 보통 4%로 설정된다. 정격 출력 운전시 속도는 104%로 설정되고 속도수하율을 고려한 발전기 출력은 4%이므로 속도기준값은 100%로 된다. 따라서, 속도기준값 100%와 터빈속도의 편차가 제어기로 입력되고 이의 연산 결과가 연료요구량(FSR)으로 되어 연료밸브의 개도를 조절한다. 발전기 출력제한에 대해서는 증기터빈 제어에서와 기능이 동일하다.



<그림 3> 가스터빈 제어회로 예

2.2.3 수력터빈

수력터빈 제어 신호 흐름을 나타내면 <그림 5>와 같다. <그림 4>에서 수차 발전기가 계통에 병입되어 운전되면 속도설정치는 100%로 고정된다.



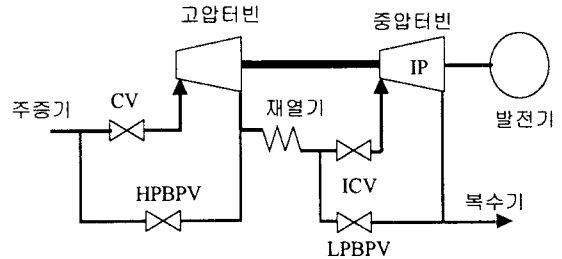
<그림 4> 수력터빈 제어회로 예

출력 편차와 속도 편차가 전혀 없는 상태에서 실제 속도를 비롯하여 모든 변수가 고정되어 있다고 가정하자. 이 때, 부하 증가에 의하여 계통 주파수, 즉 수차 발전기의 회전수가 감소하면 속도 편차신호가 제어기의 입력으로 작용하여 수량 조절밸브의 개도요구량(GVD)으로 되어 발전기의 출력이 증가한다. 따라서, 출력 편차신호에 속도수하율이 곱해져서 제어기의 입력으로 작용하고 속도편차와 출력편차의 합이 영(零)으로 되는 상태에서 제어기는 동작을 중지하고 평형운전 상태로 된다.

2.3 증기터빈 ICV 제어

국내에서 운전중인 보통의 재열 터빈에서 재열증기 조절밸브(ICV:Intercept Valve)는 정상운전중 100% 열려 있고 터빈의 속도상승시 주로 반응하며 담당하는

증기의 에너지가 주증기 조절밸브(CV:Control Valve)가 담당하는 양보다 훨씬 크다. 보통 70% 정도를 ICV가 담당하는 것으로 알려져 있다. 또한, ICV 1개가 100%용량으로서 보통 2개가 설치되어 있으므로 과속도 방지에 있어서 ICV의 제어는 특히 중요하다. 따라서, ICV의 속도조정을 보통 2%정도로 설정하여 속도상승에 대단히 민감하게 반응하도록 하고 있다.



<그림 5> 터빈계통 증기흐름도

<그림 5>는 순환형 보일러와 관류형 보일러에서 운전중인 증기흐름도를 나타내고 있다. 정상 운전시는 증기는 CV→고압터빈→재열기→ICV→중압터빈→복수기의 순으로 흐르나, 관류형 보일러의 기동시 등의 과도상태에서는 증기흐름이 HPBPV→재열기→LPBPV→복수기의 순서로 된다.

2.3.1 순환형 보일러 ICV 제어

재열증기 조절밸브는 터빈 바이패스 시스템의 채용 여부에 따라서 제어 회로가 변경된다. 바이패스 시스템이 채용되지 않은 발전소, 즉 보통의 순환형 드럼 발전소에서는 부하 기준신호에 2.5배를 곱하여 100%의 바이패스를 합한 후 속도조정을 2%가 고려된 속도편차를 합하여 ICV 개도 기준값을 산출한다. 100%의 바이패스는 정상운전시 과도한 속도편차가 없으면 ICV를 항상 열려있게 하여 CV를 통과한 증기가 간섭없이 전량 복수기로 배출되도록 한다. 또, 부하기준신호를 고려하여 계통병입 후에 출력이 증가하면 소량의 속도상승에는 ICV가 반응하지 않고 터빈제어의 주도권을 CV에게 완전히 이양한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$ICV\ Demand = [2.5 \times Load\ Reference + \frac{\Delta F}{2\%} + 100\%]$$

① 정격출력 운전시 부하기준값(Load Reference)을 100%라 가정하면

$$ICV\ Demand = [250\% + \frac{\Delta F}{2\%} + 100\%]$$

으로 되므로 속도가 5% 상승하면 CV 5% 조절율으므로 완전히 닫힌 상태이고 ICV는 2%조정으로 닫히기 시작하므로 107% 속도에서 완전히 닫힌다.

② 50% 출력 운전시 부하기준값(Load Reference)을 50%라 가정하면

$$ICV\ Demand = [125\% + \frac{\Delta F}{2\%} + 100\%]$$

으로 되므로 속도가 2.5% 상승하면 CV는 5% 조절율이므로 완전히 닫힌 상태이고 ICV는 2%조정으로 닫히기 시작하므로 104.5% 속도에서 완전히 닫힌다.

2.3.2 관류형 보일러 ICV 제어

바이패스 시스템이 채용된 발전소, 즉 근래의 관류형 발전소는 부하기준값에 CV 속도조정을 5%가 고려된 속도편차를 합한 후, 주증기 및 재열증기 압력을 고려하고 최종적으로 정방향운전(FF: Forward Flow)과 역방향운전(RF: Reverse Flow, 고압터빈에는 증기흐름이 없는 운전으로 기동시 주로 사용됨)에 따라 변경되는 제어상수 α 를 고려하여 ICV 개도 기준값을 산출한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$ICV Demand = CV Reference \times \frac{MSP}{RSP} \times \alpha$$

$$= [Load Reference + \frac{\Delta F}{5\%}] \times \frac{MSP}{RSP} \times \alpha$$

여기서 α 는 역방향운전시 1.06이 적용되다가 정방향운전시 1.68로 변경되어 전환속도, 즉 ICV 개도 증가속도를 빠르게 한다. 또, 고부하시에는 부하기준값이 큰 값이므로 ICV가 속도상승에 반응할 가능성이 작아진다. 그런데 변압운전의 경우 실제적으로 출력이 30% 이상이면 부하기준값은 100%에 근접해 있고 정방향운전이며 백분율로 표시한 주증기 압력과 재열증기 압력은 동일한 값이므로,

$$ICV Demand \approx [100\% + \frac{\Delta F}{5\%}] \times 1 \times 1.68$$

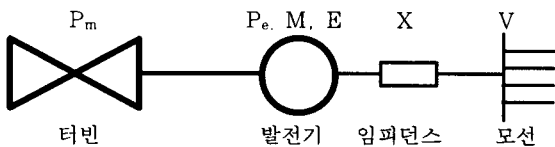
$$= 168\% + 33.6\Delta F$$

로 된다. 따라서, 2% 속도 상승시 약 3%의 조정을로 달하기 시작하여 5% 속도상승 즉, 105% 속도에서 완전히 닫힌다. 그러나, 실제는 터빈 바이패스 계통의 동작에 따른 압력변동을 고려해야 하므로 정확한 것은 아니다.

2.4 발전기부하 탈락시의 터빈제어

2.4.1 회전체의 운동

다음의 <그림 6>은 과도내부전압이 E, 관성정수 M, 리액턴스 X를 통하여 전압 V인 무한대 모선에 접속되어, 일정한 각속도 ω 로 전력계통에 병렬운전 중인 발전기와 이를 구동하는 터빈을 나타낸 것이다.



<그림 6> 터빈-발전기-전력계통 설명도

P_m 을 기계입력, P_e 을 전기출력, $\theta = \omega t$ 를 회전체 각변위, ω 를 회전체 각속도라 하면, 동기 발전기 회전자의 기계적 각속도는 원동기, 즉 터빈의 회전력과 발전기 회전자에 작용하는 전기적 제동력의 차에 비례하고, 회전자의 기계적 관성에 반비례하므로 다음의 식이 성립한다. 즉,

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta T}{I} = \frac{\Delta T \omega \omega}{I \omega^2} = \frac{\omega}{M} \Delta P$$

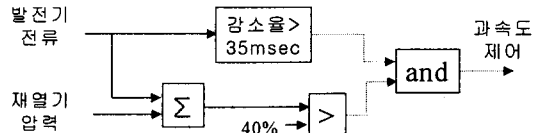
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{M} (P_m - P_e)$$

이것은 전력계통에 병렬운전 중인 발전기가 우변과 같은 입출력의 차가 생겼을 경우, 회전자는 좌변과 같은 속도 변화를 받는다는 것을 나타낸다. 부하가 차단되어

전기출력 P_e 가 0으로 되었을 때, 이상적인 경우에 기계입력 P_m 도 동시에 0으로 되면 속도의 변화는 없다. 그러나, 차단밸브가 동작하여 유입증기를 차단해도 이미 유입된 증기의 팽창에 의하여 속도가 상승하며 차단부하에 따라 다르나 증기터빈의 경우 보통 정격속도의 110%이하로 제어되어야 하며, 수력터빈은 작동유체인 물이 비압축성이어서 수량조절밸브를 신속히 폐쇄할 수 없으므로 150% 내외이다.

2.4.2 과속도 보호

터빈의 보호장치중 가장 중요한 것은 이러한 기계입력과 전기출력의 불평형에서 기인하는 과속도에 대한 보호로서 프로그램도 과속도 회피를 위해 다양한 장치가 마련되어 있다. 현재 국내에서 운용하고 있는 과속도 제어 장치는 여러 가지 이름으로 불리고 있으나 기본 개념은 대동소이하다. 과속도 제어방식을 크게 대별하면 실제속도의 상승을 검출하여 제어하는 방법과 전기부하의 탈락을 감지하여 속도가 실제적으로 상승하기 이전에 증기의 유입을 차단하는 방법의 두 가지가 보편화되어 있다. 후자의 경우 증기에 의해 터빈에 유입되는 기계적 입력을 검출하고 전력계통에 송전되는 발전기 출력을 검출하여 그 편차가 일정치 이상으로 증가하면 과속 상황을 예측하고 증기를 차단한다. <그림 7>은 후자의 간략한 동작회로를 나타내고 있다.



<그림 7> 과속도 제어회로 예

<그림 7>에서 기계적 입력에너지는 70%의 부하를 담당하고 외란에 강한 재열증기의 압력으로 대표되고 발전기의 전기적 부하 변화는 계기용 변류기의 전류 신호로 측정되어 부하 탈락의 여부를 판단한다. 터빈의 기계입력과 발전기의 전기 부하의 불평형이 정격 출력의 40% 이상으로 되고 발전기의 부하가 100%/35msec보다 빠르게 상실될 때 동작하여 유입증기를 신속히 차단하므로 터빈을 과속도로부터 보호한다.

3. 결 론

근래에 우리나라에서 발전제어분야 특히 터빈제어의 기술자립을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이를 위해서는 신뢰성있는 하드웨어는 물론 터빈·발전기의 물리적 운전특성을 기초로 한 정상운전시의 제어 알고리즘은 물론 과속도 상태에서 안전하게 터빈을 제어하기 위한 알고리즘의 정립이 필수적이다. 이 논문에서는 이러한 제어 알고리즘을 위한 기본적인 사항을 소개하였으며 이를 기초로 향후 발전소는 물론 산업용 터빈 제어시스템의 국내 기술자립으로 전력수요 증가에 따른 국내 발전소 증설과 장기사용 발전소의 수명연장 공사시 투자비 절감 뿐만 아니라 외화 절감에도 기여하고 이후, 북한 전력수급 개선을 포함한 해외시장 진출도 모색하고자 한다.

(참고 문헌)

- (1) "발전운전 제어반" 발전교육원, 최인규 외 3명
- (2) "초임계압 변압운전 발전소 기술자료집" 한전 수화력 건설처
- (3) "기초기술 모음집" 전력연구원, 류홍우 외 4명
- (4) 전력계통공학, 강기문 외 2, 동일출판사