

증기터빈 과속도 보호장치의 비교분석

최인규*, 정창기*, 김종안*
전력연구원*

An Analysis and Comparison of Steam Turbine Overspeed Protectors

Inkyu Choi*, Changki-Jeong*, Jongan-Kim*
Korea Electric Power Research Institute*

Abstract - After steam turbines in power plant drives generator and maintains it at rated speed using high temperature and high pressure steam energy, they regulate the output of generator when synchronized in parallel with the power system. By the way, as the steam flow into turbine can not be reduced fast even though the electrical load is lost, the turbine gets into dangerous situation due to the increase of its speed. At this time, the duty of the turbine governor is " how to limit the speed within its overspeed trip setpoint and escape from danger." For the purpose of it, there are various ways known. Some overspeed protection methods for steam turbines now being operating in korea are introduced in this paper.

그림 1은 발전전용의 대용량 증기터빈을 나타내고 있으며 소용량의 경우에는 증압터빈이 없는 경우도 있다. 일반적으로 정상운전인 상태에서 증기흐름은 주증기 조절밸브(CV:Control Valve)를 통과하여 고압터빈에 유입되어 일을 하면 압력과 온도가 낮아진다. 이 증기는 재열기에 유입되어 열에너지를 흡수하여 온도가 주증기 수준으로 높아진다. 이 증기를 재열증기라고 불리는 이 증기는 재열증기 조절밸브(ICV:Intercept Valve)를 경유하여 증압터빈에 유입된다.

1. 서 론

발전소의 증기터빈은 증기의 에너지를 입력으로 발전기를 구동하여 정격속도에 도달시킨 후, 발전기가 전력계통에 병입되면 유입 증기량을 가감하여 발전기 출력을 조절한다. 그런데 전력계통 또는 발전기 고장으로 전기 부하가 탈락되어도 터빈에 유입하는 증기의 에너지는 신속히 감소할 수 없으므로 피동체인 발전기의 전기부하보다 구동체인 터빈의 기계입력이 과도하게 큰 상황이 발생되어 터빈·발전기의 속도가 필연적으로 상승하여 위험한 상황에 처하게 된다. 이 때, 터빈 제어기의 주된 임무는 "과속도 상태에 있는 터빈발전기의 속도를 줄여서 위험 상황을 회피할 것인가"이며, 이를 위해서 여러 가지 방법이 있다. 이 논문에서는 과속도 보호에 관한 개념을 정립하고, 국내에서 운전중인 여러 가지 증기터빈 과속도 보호장치를 소개하고자 한다.

2.2 증기조절용 밸브 구성

근래에 많이 건설되는 대용량 화력터빈의 경우에는 주증기 차단밸브 2대, 주증기 조절밸브 4대, 재열증기 차단밸브 2대, 재열증기 조절밸브 2대로 구성되어 있다. 주증기 조절밸브를 제외한 밸브들은 보통 100% 용량을 구비하고 있어서 한 대를 단더라도 발전 출력은 감소되지 않고 연속운전을 수행할 수 있다. 고압터빈 우회밸브(HPBPV:High Pressure Bypass Valve)와 저압터빈 우회밸브(LPBPV:Low Pressure Bypass Valve)는 최근에 건설되는 관류형 보일러에서 기동 시간 단축 등의 목적으로 설치되는 증기 조절밸브이다.

2. 본 론

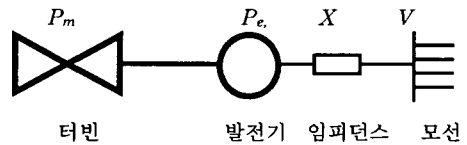
2.1 일반적인 증기터빈

증기발전기에서 생산된 고온·고압의 증기를 이용하여 발전기를 구동하는 일반적인 증기터빈의 기기 배치를 그림 1에 나타내었다

2.3 운동방정식과 터빈 과속도

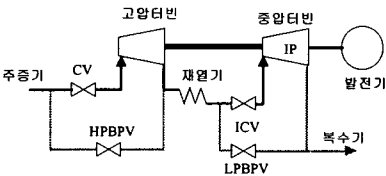
2.3.1 회전체의 운동방정식

다음의 그림 2는 과도내부전압이 E , 관성정수 M , 리액턴스 X 를 통하여 전압 V 인 무한대 모선에 접속되어, 일정한 각속도 ω 로 전력계통에 병렬운전 중인 발전기와 이를 구동하는 터빈을 나타낸 것이다



<그림 2> 터빈·발전기·전력계통도

P_m 을 기계입력, P_e 을 전기출력, P_{loss} 을 손실, $\theta = \omega t$ 를 회전체 각변위, ω 를 회전체 각속도, T 를 회전력, I 를 관성 모멘트, M 을 단위관성정수라 하면, 동기 발전기 회전자의 기계적 각속도는 원동기, 즉 터빈의 회전력과 발전기 회전자에 작용하는 전기적 제동력의 차에 비례하고, 회전자의 기계적 관성에 반비례하므로 회전체의 운동방정식은 다음의 식과 같이 표현할 수 있다. 즉,



<그림 1> 증기흐름도

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

$$\therefore \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{M} (P_m - P_e - P_{loss}) \text{-----①}$$

전기출력은 동기발전기의 출력으로서 δ 를 출력각이라 하면 다음의 식으로 표시된다.

$$P_e = \frac{E \cdot V}{X} \sin \delta$$

이것은 발전기의 유기기전력과 단자전압 사이에 위상차와 임피던스를 고려하면 전기출력을 구할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또, 회전체의 에너지 손실은 다음과 같이 회전수의 함수로 표현할 수 있으며 마찰손, 풍손 등이 발생한다.

$$P_{loss} = K_0 + K_1 N + K_2 N^2$$

2.3.2 구동력과 제동력

정상 운전시 터빈은 증기의 유량에 직접 비례하는 기계적 회전력을 발생하게 되며, 터빈과 발전기에서 발생하는 풍손 및 마찰손 등의 손실을 무시하면 이 구동력과 같은 크기의 제동력이 발전기에서 발생되어 터빈·발전기는 일정속도로 운전된다. 제동력은 회전자 전류(I_f)에 의한 제자자속과 고정자 부하전류(I_a)에 의한 전기자 자속간의 인력으로서 다음과 같이 표시된다.

$$F = K I_a \times I_f$$

계통병입 이전 승속 중에는 터빈 증기유량이 손실보다 크고, 일정속도에서 터빈의 구동력은 손실과 일치하며 관성으로 회전하고 있다. 계통병입, 즉 차단기 투입 이후, 속도가 일정하다면 터빈의 구동력은 발전기 제동력과 무부하 손실의 합과 같다. 그런데 이 때, 부하가 탈락하면 전기자 전류(I_a)가 0으로 되므로 제동력이 사라져서 터빈은 과속도로 되는 것이다.

2.3.3 운동방정식의 해석

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 기계 입력 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.

식①을 다시 쓰면

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{dP}{M} dt$$

$$\therefore \omega = \omega_0 \varepsilon^{\frac{dP}{M} t} \text{-----②}$$

$t=0$ 일 때, 발전기 차단기가 개방된다고 가정하고 식 ②의 방정식이 내포하고 있는 의미를 터빈·발전기의 속도입장에서 설명하면 다음과 같다.

1) $t=0$ 일 때

입력과 출력, 즉 기계계와 전기계가 평형을 이루어 운전되고 있으므로 $P_m - P_e - P_{loss} = 0$ 이다. 따라서,

$$\omega = \omega_0$$

2) $t=0^+$ 일 때

차단기가 개방되어 $P_e=0$ 으로 되면 이미 유입된 증기가 팽창하여 속도가 상승한다. 기계입력과 기계적 손실이 일치할 때까지 팽창하며 P_{loss} 는 매우 작으므로 무시하면

$$\omega = \omega_0 \varepsilon^{P \cdot t}$$

3) $t=t_1$ 일 때

t_1 의 시간이 지난 후, 증기 팽창하여 기계입력과 기계적 손실이 일치하면 구동력이 사라지므로 최대속도에 도달한다. $P_m = P_{loss}$ 이면 가속을 멈추고 속도는 최대값에 도달한다

$$\omega = \omega_p$$

4) $t=t_2$ 일 때

증기가 더욱 팽창하여 에너지가 완전히 소진되면 $P_m = 0$ 으로 되고, P_{loss} 만 있으면

$$\omega = \omega_p \varepsilon^{-P_{loss} t}$$

으로 된다. 위의 여러 가지 식을 설명하면,

- 부하가 차단된 순간 $P_e=0$ 이고, P_m 과 P_{loss} 만 남으므로 터빈속도는 급격히 증가한다. 속도상승에 따라 P_m 은 감소하고 P_{loss} 는 증가하므로 부하탈락 직후에는 가속도가 대단히 빠르고 시간이 흐를수록 완만해진다
- 증기밸브가 닫히고 잔류증기의 팽창이 완료되면, $P_m=P_e=0$ 이고, P_{loss} 만 있으므로 터빈속도는 마찰에 의하여 지수함수적으로 감소한다. 이 때, 소내부하가 있다면 더욱더 빨리 감소한다.
- 이 후, 제어기의 동작으로 정정속도에 도달하며 제어기의 종류, 즉 기계식과 전기식에 따라 정정속도는 차이가 있다.

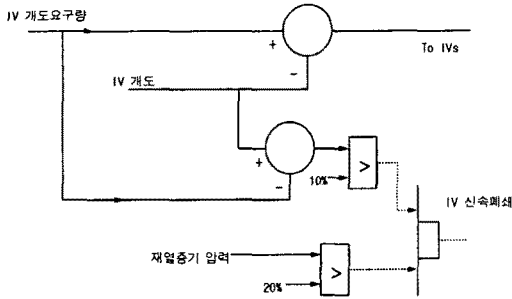
2.4 증기터빈 과속도 보호

터빈의 보호장치중 가장 중요한 것은 이러한 기계입력과 전기출력의 불평형에서 기인하는 과속도에 대한 보호로서 제어기 프로그램도 과속도 회피를 위해 다양한 장치가 마련되어 있다. 현재 국내에서 운용하고 있는 과속도 제어장치는 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.

2.4.1 피드백 제어

피드백 제어의 경우 터빈·발전기의 속도가 실제적으로 정격 속도 이상으로 상승한 경우 이를 검출하여 유입 에너지를 차단하는 방식으로서 재열증기 조절밸브 트리거(IVT : Intercept Valve Trigger), 과속도보호 제

어(OPC : Overspeed Protection Control), 가속도 릴레이(AR : Acceleration Relay) 등이 있으며 공통점은 정상적인 제어루프를 이용하여 과속도 상황을 검출하나 유입증기를 차단하는 동작은 정상적인 서보제어를 배제하고 솔레노이드를 통하여 증기밸브를 신속히 폐쇄하는 방식이다.

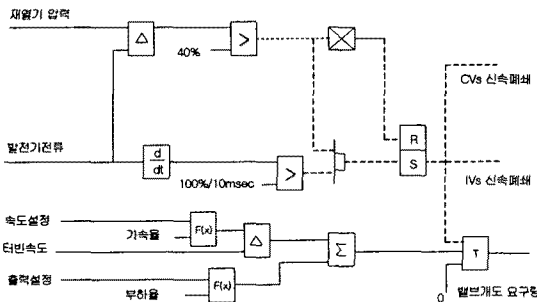


<그림 3> 피드백 제어

그림 3에서 재열기 압력이 20% 이상인 상태에서 운전중 과속도가 발생하면 터빈이 가속될 우려가 있으므로, 이를 방지하기 위하여 IV 개도요구량은 컴퓨터의 계산에 의한 전기신호로서 100%로부터 빠르게 감소하지만 실제 개도의 변화는 이를 추종하지 못한다. 따라서, IV 실제 위치 - IV 개도 요구량 > 10% 인 경우가 발생하면, IV를 신속히 동작시켜서 첨두속도를 감소시키고 IV를 서보 밸브에 의한 정상 제어 가능 상태로 복구시킨다.

2.4.2 선행제어

선행제어의 경우 증기에 의해 터빈에 유입되는 기계적 입력을 검출하고 전력계통에 송전되는 발전기 출력을 검출하여 그 편차가 일정치 이상으로 증가하면 과속 상황을 예측하고 증기를 차단한다. 보통 기계전기 불평형(PLU : Power Load Unbalance), 밸브 조기동작(EVA : Early Valve Actuation), 출력급감발 예측(LDA : Load Drop Anticipator), 신속밸브 동작(FV:Fast Valving) 등이 있다. 증기의 유입에 의한 기계계의 에너지는 재열증기 압력 또는 증압터빈 압력을 이용하여 검출하고 전기계의 부하는 발전기전류 또는 유효출력을 이용하여 검출한다. 발전기 전류를 이용하는 경우는 송전선 지락과 같이 전류는 증가하고 유효출력은 감소하는 경우와 부하탈락으로 발전기 전류와 유효출력이 동시에 감소하는 경우를 구별할 수 있기 때문이다.



<그림 4> 선행 제어

위의 그림에서 재열기 압력과 발전기 전류의 편차가

40% 이상인 조건이 만족되는 만큼 전기부하가 탈락된 경우 발전기 전류가 감소하는 속도는 100%/10msec 보다 더 빠르다. 이런 경우가 만족되면 실제적으로 과속도가 발생하기 이전에 CV와 IV를 신속하게 폐쇄하여 유입증기량을 차단한다. 동시에 속도 제어와 출력제어의 합으로 발생하는 밸브개도 요구량을 무부하 정격속도를 유지하도록 재설정한다.

3. 결 론

회전체의 운동역학에 의한 구동력과 제동력 간의 불균형이 발생하면 가속도의 법칙에 의하여 속도변동이 발생함을 알 수 있다. 과속도 보호장치를 크게 보면 피드백 제어와 선행제어로 대별할 수 있다. 피드백 제어는 어느 설정치 이상으로 터빈 속도가 증가한 경우 유입증기를 차단하는 방식과 가속율이 설정치 이상으로 상승한 경우에 유입증기를 차단하는 방식의 두 가지 형식으로 정리된다. 또, 선행제어는 발전기 전류 또는 유효출력의 감소를 검출하여 속도가 상승할 것을 예측하고 실제적인 속도상승 이전에 유입증기를 차단한다.

[참 고 문 헌]

- [1] "발전운전 제어반" 발전교육원, 최인규 외 3명
- [2] "기초기술 모음집" 전력연구원, 류홍우 외 4명
- [3] 전력계통공학, 강기문 외2, 동일출판사
- [4] "원전터빈 디지털 제어시스템 개발" 전력연구원, 송성일 외5명
- [5] "Power System Stability and Control" P. Kundur