

양수발전소 속도조정을 향상 및 수력적 부동시간에 관한 연구

최인규, 우주희
전력연구원

A study on the speed regulation improvement and water starting time of pumped stored power plant

I.K.Choi, J.H.Woo
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - In these days, pumped stored power plants are under operations mainly for load regulation in power system. After we investigated the governor related electrical circuit of a pumped stored power plant, we measured speed regulation and dead time of both the governor and the hydraulic system according to the change of variables of the governor during generation. After that the measured speed regulation improved much.

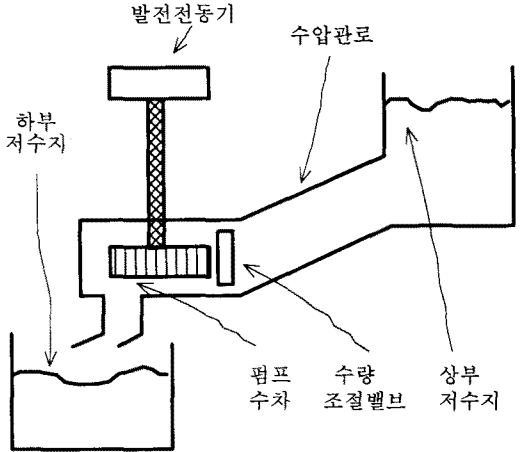
1. 서 론

공업화의 초기에 수력 발전량이 화력 발전량을 상회하는 수주화중 형태이던 우리나라의 전력 계통은 화력 발전량이 수력 발전량을 능가하는 화주수중의 시대를 지나서, 오늘날에는 공해가 없고 연료비 단가가 저렴한 원자력 발전소가 전력 생산의 주역으로 등장하였다. 원자력 발전량의 증가에 따라, 심야전력 수요 조절과 경제성 확보를 위하여 양수 발전소가 건설되어 운용되고 있다. 특히, 심야에는 원자력의 잉여 전력을 이용하여 고낙차 지점에 물을 양수하고, 주간에는 양수된 물의 위치 에너지를 발전에 이용하는 방식으로서, 전력 생산에 있어서 전체 연료비 절감은 물론 전력 계통의 정격 주파수 유지에도 크게 기여하고 있다. 이 논문에서는 국내에서 운전되고 있는 낙차 375m의 한 양수 발전기를 택하여 주파수 조정 운전시 제어기 이득의 미세 조절을 통하여 계통 주파수 기여도의 지표인 속도 조절율을 향상시킨 내용을 기술하였다. 또, 화력 발전과 구별되는 수력 발전의 중요한 특성으로서 제어 응답성의 지연현상을 발생시킴으로서 문제시 되는 수력적 부동시간(Water Starting Time), 즉 수량 조절 밸브 개도가 변화한 후, 발전기의 실제 출력으로 나타날 때까지 소요되는 시간에 대해서도 고찰하였다

2. 본 론

2.1 수차발전기의 조속기

증기터빈 발전기와 마찬가지로 수차 조속기의 기본적 기능은 속도와 부하를 원하는 값으로 제어하는 것이다. 수차 발전기가 전력 계통에 병입되어 병렬 운전하기 이전에는 속도를 정격 속도까지 제어하고 계통 병입 이후에는 발전량, 즉 부하를 제어하게 되며, 병렬 연결된 동기 발전기는 부하 증가시 속도가 감소하는 수하특성이 있어서 부하 분담을 적절히 할 수 있다. 양수 발전소의 기본적 구조는 그림<1>과 같다. 여기에서 다수 발전기가 연결된 전력 계통 주파수 즉, 수차 발전기의 실제 회전수가 변동하면 수차 조속기의 제어 신호가 변하여 제어기의 출력이 변화된 후, 수량 조절 밸브(Wicket Gate)의 개도가 변화한다. 이에 따라 수차의 기계적 관성과 물의 수력적 관성이 고려되어 물의 유량이 변화되고 이는 곧 출력의 변화로 나타나게 된다.



그림<1> 양수 구조물 개요도

2.2 속도 조절율(Speed Regulation:SR)

속도 조절율이란 시시각각으로 변화하는 계통 부하에 따른 주파수 동요량과 이에 응동하는 발전기의 출력변화량을 정량적으로 나타낸 것이며, 계통에 병렬로 운전되는 발전기의 정격 주파수 유지에 대한 기여도의 지표로서 다음의 수식으로 표현된다.

$$SR = \frac{\frac{\Delta F}{F_n}}{\frac{\Delta P}{P_n}} \times 100\% \quad <1>$$

여기서 SR(%) : 속도 조절율

ΔF (Hz) : 어느 순간에서의 주파수 변화 폭

F_n (Hz) : 정격 주파수(60Hz)

ΔP (MW) : 주파수 변화에 따른 출력 변화 폭

P_n (MW) : 발전기 정격 출력

식<1>에서 SR이 작으면 동일 주파수 변화량(ΔF)에 대하여 출력의 응동량(ΔP)이 크다는 뜻이므로 계통 주파수의 유지에 기여도는 그 만큼 높아진다.

2.3 수력적 부동시간(Water Starting Time)

수차발전기의 부하추종 운전시 수량 조절 밸브가 열리거나 닫힐 때, 물의 관성과 수압관로에 존재하는 탄성의 영향으로 인하여 수차에 유입되는 수량은 지연되어 변화한다. 이는 물이 관성이 크고 비압축성이기 때문에 나타나는 현상으로서 수압 관로의 길이에 비례하고 낙차에 반비례하며, 발전소에 따라서 고유한 값을 가진다. 일반적으로 수차 발전기의 경우, 대략 0.5~4초 정도가 소요된다[2].

2.3.1 수력적 부동시간의 수식적 표현

수력적 부동시간을 수식적으로 표현하기 위해서 다음과 같은 가정이 필요하다

- 물의 저항은 무시할 수 있을 정도로 작다
- 물은 비압축성 유체이다
- 수압관로는 탄성이 없다
- 물의 유량은 수량조절밸브의 개도에 비례하고 낙차의 평방근에 비례한다
- 수차의 출력은 낙차와 유량의 곱에 비례한다

위의 다섯 가지 가정을 전제로 하여 그림<1>을 참고하여 수력적 부동시간(WST)을 표현하면 다음과 같다

$$WST = \frac{LQ}{gHA} \text{ (sec)} \quad <2>$$

- 여기서 $L(m)$: 수압관로의 길이
- $Q(m^3/sec)$: 유량
- $g(m/sec^2)$: 중력의 가속도
- $H(m)$: 수량조절밸브에서 수압
- $A(m^2)$: 수압관로의 단면적

2.3.2 수력적 부동시간과 부하추종운전

고낙차, 대용량 수력발전기가 부하추종운전 중일 때는 수력적 부동시간으로 인하여 주파수 변화에 대한 초기 발전기 출력은 예상과는 반대로 응답한다. 즉, 전력 계통 주파수가 감소하면 출력이 즉시 증가해야 하나, 수력적 부동시간 동안은 출력이 감소하는 응답특성을 나타낸다. 따라서, 주파수 변화 후 초기에는 수력적 부동시간으로 인하여 부하 추종 운전의 기본 취지에 오히려 역행하는 운전상태가 나타나고 있다. 즉, 속도조정율의 관점에서 정격 계통 주파수의 유지에 대한 기여도를 평가할 경우, 화력 발전기보다 우수한 것이 사실이나, 초기의 응답 특성은 매우 불량하다. 또, 수력적 부동시간이 클수록 조속기의 불감대가 증가하므로 주파수 정밀 유지에 대한 기여도는 그 만큼 낮아진다

2.3.3 실측 수력적 부동시간의 비교

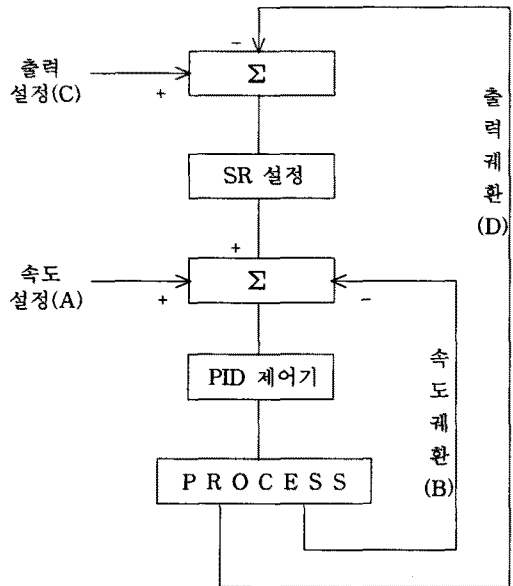
표<1> 수력적 부동시간 실측 예

	A 발전기	B 발전기
수력적 부동시간(sec)	3	2
Q(m ³ /sec)	121	65
H(m)	345	576
정격출력(MW)	300	300

표<1>을 살펴보면 수압관로의 길이가 길고 흐르는 유량이 많으며, 낙차가 낮을수록 수력적 부동시간이 길어지는 양상을 보이고 있다.

2.4 수차발전기의 제어회로

그림<1>과 관련하여 양수 발전소의 발전 운전시 제어 신호 흐름을 나타내면 그림<2>와 같다. 그림<2>에서 수차 발전기가 계통에 병입되어 운전되면 속도 설정(A)은 60Hz로 고정된다. 출력 편차(C-D)와 속도 편차(A-B)가 전혀 없는 정상 상태에서 실제 속도(B)를 비롯하여 모든 변수가 고정되어 있다고 가정하자. 이 때, 부



그림<2> 제어 개요도

하 증가에 의하여 계통 주파수(B), 즉 수차 발전기의 회전수가 감소하면 속도 편차신호(A-B)가 PID 제어기의 입력으로 작용하여 수량 조절밸브의 개도가 증가하므로 발전기의 출력(D)이 증가한다. 따라서, 출력 편차신호(C-D)<0>에 설정된 속도 조절율이 곱해져서 PID 제어기의 입력을 약간 감소시키므로 제어계는 안정적 운전을 계속할 수 있다. SR 설정치는 출력 편차신호(C-D)를 속도 신호로 전환시켜 주는 기능을 하며 설정치를 감소시킬수록 실측 속도조정율이 감소한다.

2.5. 부하추종운전 시험

전력 계통에 병렬 운전하고 있는 수차 발전기에 대하여 그림<2>에서 적분이득은 4로 고정시킨 상태에서 속도조정을 설정치(SR)와, 비례이득(K_p)을 변경시키면서 HIOKI8840 기록계를 이용하여 속도조정율을 실측한 결과는 다음과 같다.

2.5.1 최초 설정치로 시험한 경우

표<2> 최초의 설정치와 실측 속도조정율

운전 출력 (MW)	ΔF (Hz)	ΔP (MW)	실측속도조정율		비고
			계산값	평균값	
230MW	0.050	6.75	3.70	3.34	SR:1.5 K _p :5.0 K _i :4.0 K _d :3.0
	0.0625	9.5	3.29		
	0.0425	7.0	3.04		
250MW	0.0475	7.042	3.37	3.70	
	0.040	4.955	4.04		
	0.0675	9.39	3.69		
280MW	0.0375	4.8	3.90	4.11	
	0.05	4.8	5.21		
	0.0738	11.4	3.24		

표<2>를 살펴보면 실측 속도조정율은 운전 출력이 증가할수록 악화되는 경향을 보이고 있으며, 한국전력공사

3. 결 론

에서는 수력의 속도조정을 기준을 3%로 운영하고 있는 점을 감안하면, 전반적으로는 다른 수력 발전기에 비하여 불량한 상태에 있음을 알 수 있다.

2.5.2 SR을 1.25로 한 경우

다른 변수들은 최초의 상태로 고정하고 속도조정을 설정치만을 1.25로 감소시킨 경우의 실측 자료를 보면 표<3>과 같다. 표<2>와 표<3>을 비교하면 SR을 감소시킨 경우에 속도조정이 약간 개선됨을 알 수 있다. 또, 표<2>의 결과와 마찬가지로 운전 출력이 증가함에 따라 실측 속도조정은 악화되는 경향을 보이고 있다.

표<3> SR만을 1.25로 한 경우

운전 출력 (MW)	ΔF (Hz)	ΔP (MW)	실측속도조정율		비고
			계산값	평균값	
230MW	0.0438	6.75	3.24	3.16	SR:1.25 K _p :5.0 K _i :4.0 K _d :3.0
	0.0625	10.5	2.98		
	0.0688	10.5	3.28		
250MW	0.05	6.75	3.70	3.36	
	0.0563	9.25	3.04		
	0.05	7.5	3.33		
280MW	0.0625	8.25	3.79	3.85	
	0.0563	7.5	3.75		
	0.0688	7.25	4.74		

2.5.3 비레이득을 6.5로 한 경우

다른 변수들은 최초의 상태로 고정하고 비레이득(K_p)을 6.5로 설정하여 시험한 결과를 표<4>에 나타내었다. 이것을 표<2>와 비교하면 모든 운전 출력에서 속도조정이 개선되었음을 알 수 있다.

표<4> K_p만을 6.5로 한 경우

운전 출력 (MW)	ΔF (Hz)	ΔP (MW)	실측속도조정율		비고
			계산값	평균값	
230MW	0.062	13.2	2.34	2.56	SR:1.5 K _p :6.5 K _i :4.0 K _d :3.0
	0.074	13.8	2.68		
	0.093	17.4	2.67		
260MW	0.069	10.6	3.26	3.38	
	0.062	12.4	2.50		
	0.049	5.6	4.38		
280MW	0.051	8.4	3.04	3.10	
	0.1	17.8	2.80		
	0.094	13.6	3.45		

다른 방식의 발전방식과 같이 양수 발전기도 속도조정을 개선하기 위해서는 현장기기의 동작이 정상이라는 전제하에 비례조정기의 이득(K_p)을 가능하면 크게 하거나 속도조정을 설정치를 낮게 할 필요가 있다. 그러나 비레이득이 과도하게 크면 수량 조절 밸브에 Swing 현상이 발생할 수 있으므로 주의해야 한다. 또, 수력적 특성에 기인하는 수력적 부동시간으로 인하여 부하 추종 운전시 초기 출력 응답이 예상과는 반대로 작용하여 계통 주파수 유지에 악영향을 미치며 수력적 부동시간이 길수록 이러한 현상이 커진다는 사실에 주목해야 한다. 따라서, 수력적 부동시간을 줄이기 위해서는 식<1>에서 보듯이 수압관로의 길이를 작게하고 유량을 줄이며 낙차를 크게하고 수압관로의 단면적을 작게하는 방법이 있으나, 건설공사에 소요되는 비용과 부하추종 운전시의 기여도를 종합적으로 평가하여 최적의 방안을 모색하는 것이 바람직하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 수력기초II. 한국전력공사 중앙교육원
- [2] Power System Stability and Control. P. KUNDUR