

수도관로 소수력발전 운영효율 향상을 위한 최적제어 방안

홍정조*, 임동희, 김수상

The Optimum Control Study for Improving Efficiency of the Small Hydropower Generation in Water Pipe

Jeong-jo Hong*, Dong-heui Rim and Soo-sang Kim

Abstract

Using a surplus head in presented water supply pipes, we have studied to improve the operating efficiency of small hydro generator, which was chosen for a test model with 00 hydro power plant. With regard to power control and countermeasure of water hammer impact, Finally we have represented the optimal control method through the synthetical analysis of existing system symptoms, operation efficiency, the effect of water hammer impact and system configuration.

Key words

Small Hydropower Plant(소수력발전소), Optimum Control(최적제어)

(접수일 2008. 6. 5, 수정일 2008. 6. 10, 게재확정일 2008. 6. 19)

* 한국수자원공사 에너지사업처

■ E-mail : jjhong62@kwater.or.kr ■ Tel : (042)629-2952 ■ Fax : (042)629-2999

Subscrip

G.V : guide vane

PLC : programmable logic controller

1. 서론

인류는 산업혁명 이후 경제적 성장을 목표로 발전해 왔다. 경제성장의 견인차 역할을 위해 개발된 화석연료로 하여금 인간은 과거보다 풍요한 물질문명을 누리게 되었지만, 그 부작용으로 인해 지구온난화라는 재난에 직면해 있다. 지구온

난화에 대한 일차적인 해결책은 화석연료의 생산, 수송 및 소비에 있어서 효율을 높이고, 에너지를 절약함으로써 지구온난화의 주범인 온실가스를 감축하는 것이지만, 근본적으로는 온실가스를 배출하지 않는 신·재생에너지를 개발·이용함으로써 지속가능한 친환경 에너지를 확보하는 것이다.⁽¹⁾

신·재생에너지원중 소수력은 제1차 석유파동 이후 에너지 개발의 필요성이 대두되었던 1978년 안흥소수력 준공으로 최초 시작되었으며, 제2차 석유파동 이후 일반하천에 대한 소수력개발이 활발하게 진행되어 총 소수력 보급량 대비 50% 정도를 차지하고 있으나 2000년 이후 수리권, 홍수소통, 기상 및 기후변화 등의 이·치수 측면과 환경적측면에서의 갈등으로 인해 개발이 확대되지 않고 있다. 현재는 다목적댐, 농

업용저수지, 농업용 보, 수도관, 하수처리장 등 기존 시설물을 이용한 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이 중에서 수도관을 이용한 소수력 개발이 활성화 되고 있다. 수도관로에 설치한 소수력은 운영방법에 따라 효율 변화가 많은 특징을 고려할 때 수도관의 고유기능인 안정적인 용수공급과 동시에 최대효율점에서의 운영이 쉽지 않은 현실이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 기존 발전설비 출력제어 문제점을 도출하고, 시스템 개선후 용수공급 관로에서의 제어요소별 효율과 출력값을 비교하기 위해 현재 가동운영 중인 수도관로 이용 소수력설비를 시험모델로 선정하여 기존 시스템에 대한 제현상 조사와 운영효율 향상을 위한 시스템 구성 등을 종합적으로 분석하여 최적 제어방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수도관로 소수력 운영방법

소수력발전은 24시간 상시운전이 가능한 설비로서 생산된 전력은 배전계통을 통해 수요자에 공급되며, 국내에 설치되어 운영되고 있는 소수력은 설비용량이 5MW 이하로 전력계통에 미치는 영향이 매우 낮아 발전출력을 계통주파수 변화에 따라 수시로 제어하지 않고 발전소별 사용수량과 낙차조건에 적합한 출력범위에서 최대발전량이 생산되도록 운전하고 있다.

소수력은 댐, 정수장, 일반하천 등 다양한 형태로 개발되고 있으며, 발전에 필요한 사용수량의 활용목적에 따른 출력 제어 방법을 결정하여 제어시스템을 구축하여야 한다. 본 연구는 수도관로 잉여수두를 이용하여 가동운영 중인 00정수장 수도관 이용 소수력발전소를 시험모델로 하였다.

2.2 설비구성

00정수장 소수력은 취수장에서 취수한 원수를 정수장 도수관로를 통해 착수정에 공급시 발생하는 원수의 잔류수두를 이용하여(Fig. 1 참조) 소수력발전소(340kW*1대)를 설치한 사례이다. 발전소는 수도관로 용수 수요에 따라 24시간 운영

하고 있으며, 유입되는 다른 관로를 이용하여 추가 소수력(360kW*1대) 건설을 진행하고 있다. 본 시스템에 적용한 수차는 입축프란시스 수차로 유입유량 조건에 따라 잉여수두는 최소11.7m ~ 최대 22.5m의 범위 내에서 운전되도록 설계하였다.

2.3 수도관로 유량제어 방법

정수장 착수정 전단 도수관로에 소수력을 설치하는 경우 운영적 측면에서 고려할 사항은 정수장 고유의 목적인 안정적인 용수공급에 지장을 주지 않아야 하며, 소수력발전 설치 전·후 유입유량 제어방법은 다음과 같이 이루어 진다.

1) 소수력설비 설치 이전 유량제어

정수장 내로 유입하는 유량은 유입밸브(Fig. 2 참조)개도조정을 통해 원하는 유량값을 제어한다. 제어방법은 CCS(Control Center Station)에서 원하는 유량값을 설정하여 제어명령을

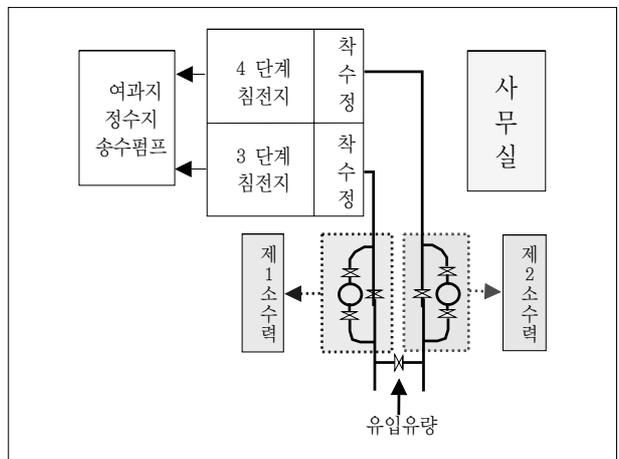


Fig. 1 기본 구성도

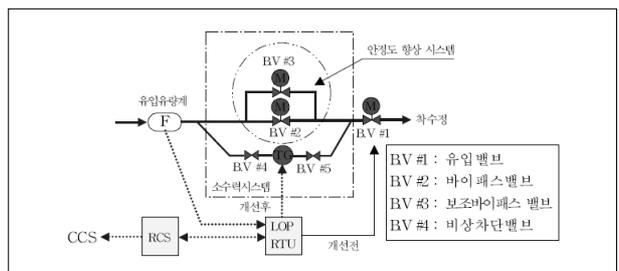


Fig. 2 소수력 유량제어시스템 구성도

실행하면 측정된 유입유량값을 비교하여 유량제어 신호를 유입밸브 액츄에이터에 전달하여 개도조정을 실시하고 목표값에 도달할 경우 동작을 종료하여 유량제어는 완료된다.^(2,3)

2) 소수력설비 설치 이후 유량제어

수도관로에 설치되는 소수력의 수차선정은 수차의 특성상 사용수량 범위는 40~110%이나 용수공급량의 변화는 수차의 사용수량 범위를 벗어남에 따라 수차의 정격을 선정할 때는 용수공급량을 최대한 활용함과 동시에 연간전력생산량이 최대가 되는 경제적인 지점을 선정한다.⁽⁵⁾

최적지점에 수차를 선정하여 소수력을 운영하여도 유량범위를 충족시키지 못하는 경우가 발생하며, 각각의 상태에 따른 유량제어는 다르게 이루어 진다.

① 수차발전기 정지시는 소수력발전기 설치 이전 유량제어 방법과 동일하게 이루어 진다.

② 수차발전기 정상가동 중에는 수차의 운전범위 이내 또는 범위를 벗어날 경우 유량제어 방법이 각각 다르게 운영된다. Fig. 2의 소수력시스템 유량제어 구성도에서와 같이 운전범위 이내일 경우 수차발전기 Guide Vane 개도 68%에 고정하고 유입밸브의 개도 조정을 통해 적절한 유량을 제어하고, 유량값이 수차 정격 범위 40% 이하일 경우 수차발전기를 정지하고 ①과 동일한 방법으로 유량을 제어한다. 유량값이 수차 정격범위 110%를 벗어날 경우 보조바이패스 밸브의 개도를 조정하여 유량값을 제어한다.

③ 수차발전기 운영중 고장에 의해 비상정지 될 경우 비상정지 신호와 동시에 보조바이패스 밸브 및 바이패스 밸브(B.P.V)를 Open하여 수차발전기 정상운전시의 유량값을 목표값으로 하여 유량제어를 실시하고 목표값에 도달할 경우 제어는 종료된다. 수차발전기의 고장요인이 제거되면 수차발전기를 기동하여 정상적인 운영상태에서 정수장의 필요 유량에 따라 유량제어를 실시한다.

2.4 운영효율에 미치는 영향

소수력발전 출력제어는 용수유량에 따라 Guide Vane의 각도를 조절하여 원하는 목표값에 도달하도록 하는 것이 아니라 착수정 전단에 설치되어 있는 유량조절 밸브 개도를 조정하여 원하는 유량값을 확보하고, 유량값에 의해 변화되는

잔류수두에 따라 소수력의 출력이 발생되도록 운영되고 있다. 이와같은 출력제어 방법은 유량조절 밸브의 개도값에 따른 손실값이 반영되어 결국 출력값이 감소하고 운영효율을 저하시키는 결과로 나타난다.

현재 운영되고 있는 00소수력의 출력제어 방법이 운영효율에 미치는 영향을 파악하기 위해 2007년 9월 11일 10:00부터 15:00까지 다음과 같은 3가지 방법으로 시험을 실시하고 측정값을 취득하였다.

1) 착수정 전단 유입밸브 Full Open

착수정 전단 유입밸브를 Full Open한 상태에서 수차 Guide Vane의 개도를 34~96%까지 조정하면서 유입유량과 수차발전기의 출력을 측정하여 효율을 계산한 결과 Table 1과 같이 나타났다.

시험결과 Guide Vane개도 75%에서 최대출력을 나타내며, 이 범위를 상회할 경우 출력값은 서서히 낮아졌다(Fig. 3 참조).

Table 1. 출력제어방법 개선후 시험결과

구 분	입구압(kgf/cm ²)		수차 출구압(kgf/cm ²)	유입 유량(m ³ /h)	출력(kW)	수차 효율(%)	
	원수 유입측	수차 입구측					
수차 G.V 개도 (%)	34	2.7	2.1	0.58	6,502	260	86.8
	44	2.7	2.1	0.57	7,430	294	84.5
	57	2.6	2.0	0.57	8,055	296	82.1
	63	2.6	2.0	0.56	8,740	330	83.7
	75	2.6	2.0	0.56	9,363	331	77.9
	85	2.6	1.9	0.55	9,775	322	76.2
	95	2.5	1.9	0.55	10,151	317	72.0
	96	2.5	1.9	0.55	10,374	310	68.7
	평균				7,821	308	79.0

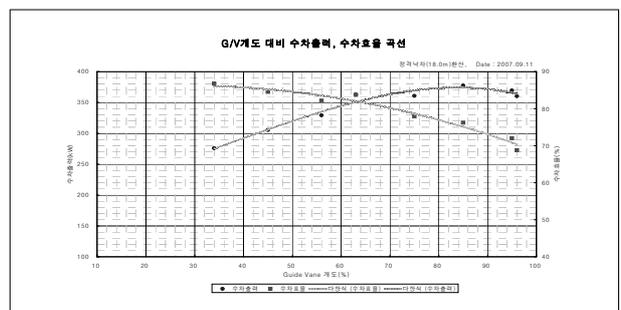


Fig. 3 Guide Vane개도 대비 수차출력 및 효율곡선

2) 착수정 전단 유입밸브 개도 조정

착수정 전단 유입밸브 개도 조정에 따른 유량조절을 할 경우 수도관로 소수력 수차출력 및 효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 2 같이 Guide Vane 55%, 65%, 75%, 85%, 95%일 때 정수장에 필요한 유량을 유입밸브 개도조정을 통해 목표유량을 확보하고, 이때 수차출력과 효율변화를 측정 한 결과이다. 유입밸브의 개도 20% 이하에서는 출력과 효율이 매우낮고 유입밸브 개도 20% 이상에서는 출력과 효율은 급격히 증가하였다. 이와 같은 현상은 버터플라이 밸브 개도에 따른 손실계수 특성에 기인한 것으로 판단된다.

수도관로 수차발전기 설치후 유량제어 방법을 유입밸브 개도조정 방법을 채택할 경우 출력은 45%정도, 효율은 26%정도 낮으므로 운영효율 향상을 위해서는 제어방법을 변경하여야 한다.

3) 유입밸브 Full Open, Guide Vane 개도별 보조바이패스밸브 개도 조정

수차발전기 정상운전중 수차 최대유량범위를 벗어날 경우 보조바이패스 밸브의 개도조정을 통해 유량이 증가할 경우 수차출력과 효율변화에 나타나는 현상을 조사한 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

수차 최대사용수량 범위를 벗어날 경우 보조바이패스 밸브의 개도조정을 통해 필요한 정수처리 유량이 유입될 경우 유

Table 2. 출력제어방법 개선전 시험결과

G.V 개도	유입 밸브 개도(%)	입구압(kgf/cm ²)		수차 출구압 (kgf/cm ²)	유입 유량 (m ³ /h)	출력 (kW)	수차 효율 (%)
		원수 유입측	수차 입구측				
55	15	3.0	2.5	1.0	5,089	39	18.0
	17	3.0	2.4	1.0	6,300	124	47.2
	21	3.0	2.4	1.0	7,200	210	68.0
	32	2.9	2.3	0.8	7,943	302	82.2
75	16	2.9	2.4	1.0	6,154	54	21.6
	19	2.9	2.4	1.0	6,871	99	34.7
	23	2.8	2.2	1.0	8,079	189	61.7
	35	2.7	2.1	0.78	8,971	296	78.5
95	18	2.8	2.1	1.0	7,046	51	21.6
	21	2.7	2.1	1.0	8,043	122	43.6
	28	2.6	1.9	1.0	8,982	206	74.4
	46	2.5	1.9	0.65	9,917	293	73.2
평균					6,969	165	52.1

량이 증가 될 수록 효율저하에 비해 수차출력 저하는 높지 않는 것으로 나타났다.

결론적으로 수차의 최대유량값을 상회할 경우 보조바이패스 밸브 개도제어를 통한 목표 유량값을 정수장 착수정에 유입될 수 있도록 밸브시스템을 구성하여 PLC 프로그램에 의한 밸브 개도제어가 될 수 있도록 제어시스템을 구축하여야 한다.

2.5 최적제어방안

1) 출력제어 Flow Chart

Fig. 2의 00소수력 출력제어방법 개선에 대한 소수력 운영 방법은 5가지 유형에 대하여 조건을 만족하도록 하여야 하며, 각 조건에 대한 Flow Chart와 PLC Logic을 설계하였다.

- ① 정상기동
- ② 수차 유량범위인 $1.0 \leq$ 유입유량값 ≤ 2.6 에서 출력제어
- ③ 유입유량값 ≤ 1.0 이하일 경우 출력제어
- ④ 유입유량값 > 2.6 이상일 경우 출력제어

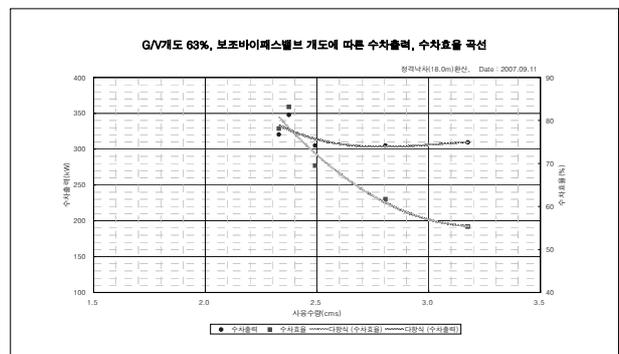


Fig. 4 보조바이패스밸브 개도에 따른 출력 및 효율곡선(Guide Vane 63%)

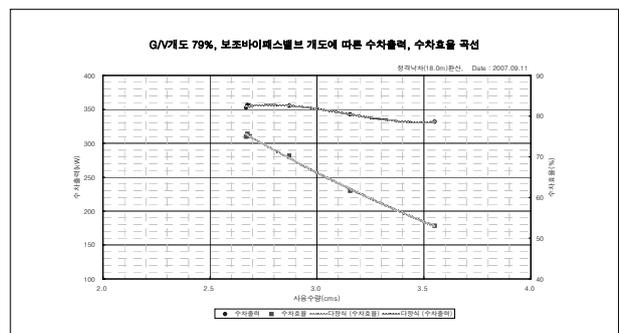


Fig. 5 보조바이패스밸브 개도에 따른 출력 및 효율곡선(Guide Vane 79%)

⑤ 수차발전기 정지

수도관로 수차발전기 출력제어를 위한 Flow Chart는 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9와 같으며, Fig. 6은 수차발전기를 기동하면 초기조건을 비교하여 조건을 만족할 경우 정상기동

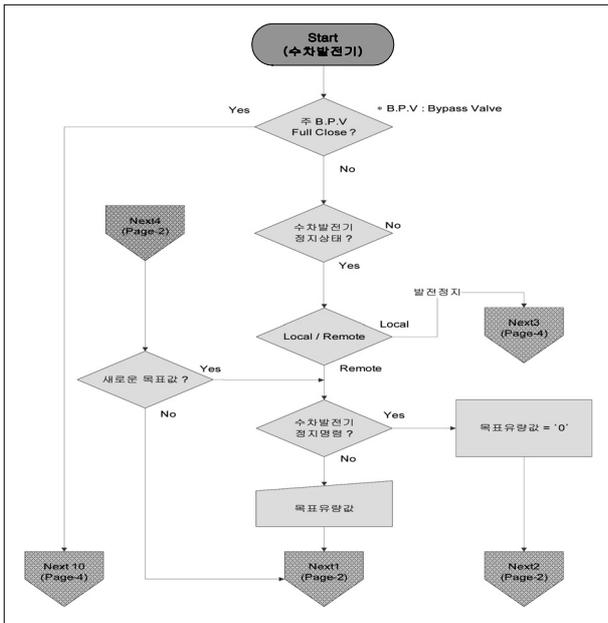


Fig. 6 초기조건 및 유량값입력

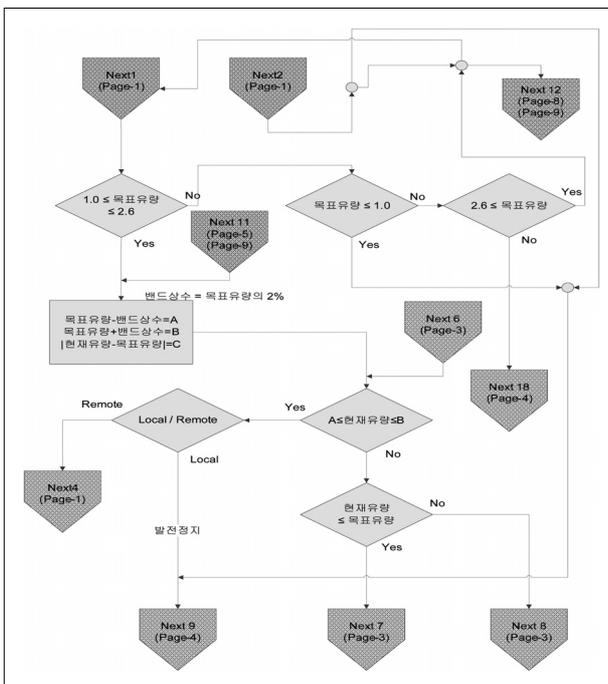


Fig. 7 유량조건별 Guide Vane 조정

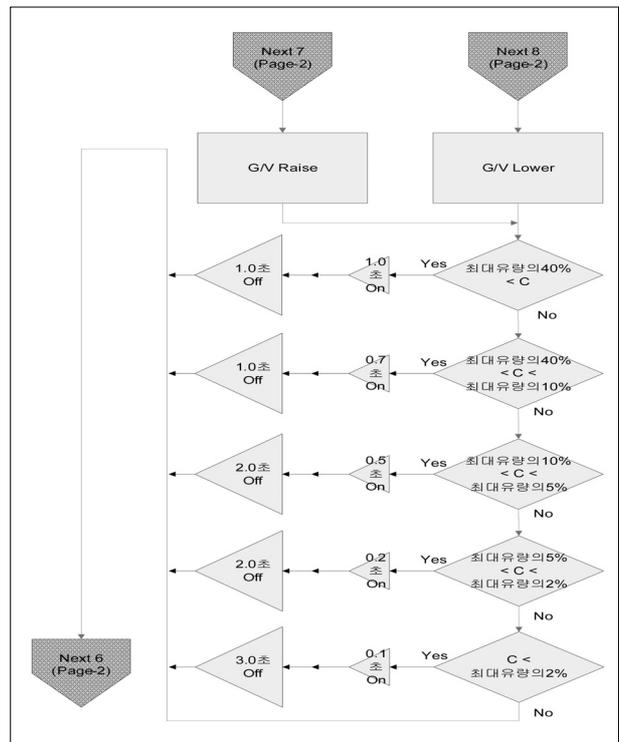


Fig. 8 유량목표값 제어

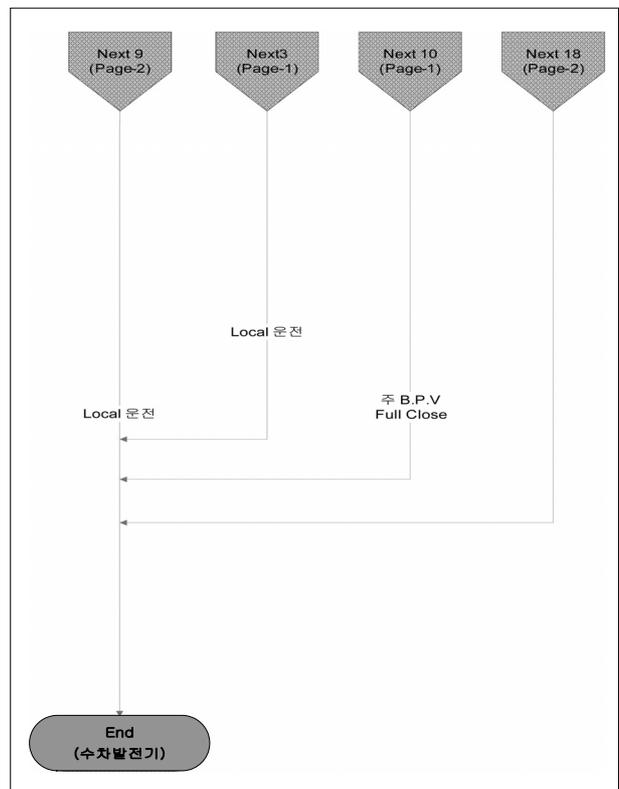


Fig. 9 수차발전기 제어명령 정지

단계를 수행하여 전력을 생산하는 단계로 진행되며, 정상운전 중일 경우 운영자가 목표유량값을 설정하고 현재 유량값을 비교하여 제어여부를 결정하는 단계이다.

Fig. 7은 목표유량값을 현재의 유입유량값과 비교하여 수차발전기 정지 또는 보조바이패스 밸브의 Open 여부를 결정하여 필요한 유량값에 따라 수차발전기의 출력을 증가 또는 감소하게 하는 단계이다.

Fig. 8은 목표유량값과의 오차범위에 따라 원하는 유량값을 제어하기 위해 Guide Vane 개도 조정 명령이 진행되는 단계이다.

Fig. 9는 제어명령을 할 경우 각각의 조건이 만족 또는 불만족을 비교하여 최종적으로 수차발전기 정지 또는 제어명령을 종료하는 단계이다.

2) 운전조건별 동작해석

① 정상기동

정수장의 수도관로는 24시간 용수공급이 이루어져야 하며, 수차발전기를 정상기동 명령을 실행하면 초기조건으로 버터플라이 밸브(B.V #1, #2) Normal Open되어 용수공급 상태이어야 한다. 이때 수차발전기를 기동하면 비상차단밸브(B.V#4)가 서서히 열리고, 수차발전기 Guide Vane 개도가 서서히 Open되면서 수차가 회전을 시작한다.

이때 바이패스밸브(B.V#2)는 서서히 닫힘 동작을 시작한다. 수차의 회전속도가 정격속도에 도달시 주차단기를 On시켜 생산된 전력은 배전계통을 통해 전기를 공급하고 목표유량값에 도달할 경우 수차출력제어는 정지되어 정상기동 단계는 종료하게 된다.

② $1.0 \leq$ 유입유량값 ≤ 2.6 에서 출력제어

수차발전기가 정상적으로 운전되고 있는 상태에서 유량값의 변화가 필요할 경우 정수장 중앙제어실 감시제어화면에서 목표유량값을 설정하면 현재의 유입유량을 비교하여 오차값만큼 Guide Vane 개도 조정을 통해 원하는 유량을 확보한다. 이때 유량값이 목표값에 도달하면 수차발전기 출력제어는 종료된다.

③ 유입유량값 ≤ 1.0 이하일 경우 출력제어

수차발전기 유량값이 수차 최소설계유량 이하인 경우 수차발전기 정지와 동시에 바이패스밸브(B.V#2) 개도 조정이 필

요하며, 수차발전기 정지하기 직전 유량설정값을 비교하여 목표유량값에 도달할 때까지 밸브를 Open하고 제어를 종료한다.

이후 유량값이 > 1.0 이상되면 ①의 정상기동 방법에 따라 제어명령이 실행되도록 PLC Logic을 설계하였다.

④ 유입유량값 > 2.6 이상일 경우 출력제어

수차발전기 정상운전중 정수장 유입유량이 수차 최대사용수량 기준을 상회할 경우 보조바이패스밸브(B.V#3)를 Open(이때 B.V#2 Close)하여 목표유량값에 도달할 때까지 Open 제어를 실시하고, 목표값에 도달할 경우 제어동작을 종료한다. 또한 수차운전중 유량값이 수차 기준최대유량값 이하가 될 경우 B.V#3를 Close하여 수차발전기 유량운전범위내에서 정상운전 상태로 발전출력 제어를 수행한다.

⑤ 수차발전기 정지

수차발전기 정지 명령은 내·외부 고장 또는 정지계획에 의해 이루어지며 정수장 중앙제어실에서 운영자가 제어명령을 실행하면 수차Guide Vane은 서서히 닫힘 동작이 되면서 동시에 보조바이패스밸브(B.V#3)와 바이패스밸브(B.V#2)가 열린다. 이때 수차발전기가 완전히 정지되면 수차정지전의 유량설정값을 비교하여 목표값에 도달할 때까지 바이패스밸브(B.V#2)와 보조바이패스밸브(B.V)는 열림동작을 실시한다. 수차정지후 유입유량값이 안정되면 보조바이패스밸브(B.V#3)는 Close하면서 바이패스밸브(B.V#2) 개도를 목표값과 비교하여 제어후 목표값에 도달하면 제어는 종료된다. 이후 수차발전기 정상기동 조건이 되면 ①정상기동 조건에 따라 수차발전기 기동후 정수장 수도관로에 적용된 수차발전기는 정상적으로 운영한다.

3. 결론

본 논문에서는 기존 시설물에 설치하여 운영하고 있는 소수력 중 수도관로 잉여수두를 이용한 소수력의 운영효율 향상과 수차 고장 등의 요인으로 비상정지 할 경우 나타나는 수충격에 대한 영향을 조사하였으며, 수도관로 소수력의 운영효율에 미치는 영향을 00소수력을 대상으로 조사하였다. 조사방법은 00소수력을 운영하고 있는 현재의 조건을 비교하기

Table 3. 출력제어방법 개선전·후 시험결과

G.V 개도 (%)	기존방식		개선방식		개선 전·후 효율차 (%)
	출력 (kW)	효율 (%)	출력 (kW)	효율 (%)	
55	169	53.9	297	82.1	28.2
75	160	49.1	331	77.9	28.8
95	168	53.2	317	72.0	18.8
평균	169	52.8	308	79.0	26.2

위해 정수장 착수정 전단 유입밸브를 Full Open한 상태에서 수차발전기 Guide Vane 개도를 34~96%까지 조정하면서 유입유량과 출력을 측정하였다. 운영효율을 측정한 결과 평균 출력은 308kW에 수차효율은 79%로 나타났다. 출력제어 방법에 따른 운영효율 비교를 위해 수차의 Guide Vane 개도를 55%, 65%, 75%, 85%, 95%에 대하여 유입유량과 출력값을 측정하여 운영효율을 분석한 결과 평균출력은 169kW에 수차효율은 52.8%로 나타났다.

수도관로 수차발전기 출력제어를 정수장 착수정 유입밸브 개도 조정에 따른 유량조절 방법을 수차 Guide Vane 개도 조정을 통한 유량제어로 개선할 경우 출력과 효율은 개선되어 운영효율이 향상됨을 알 수 있다(Table 3 참조).

이와 같이 정수장 운영자가 필요한 유량값을 설정하면 수차 Guide Vane의 개도조정을 통해 유량값을 변화시켜 유량과 낙차요소에 의해 출력이 발생되도록 PLC 프로그램을 설계하여 적용함으로써 비상정지시 나타나는 문제점을 해결함과 동시에 수차발전기 운영효율을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 수도관로를 이용한 소수력 발전설비의 운영효율 향상을 위하여 수행되었습니다.

References

- [1] 한국수자원공사, “소수력 최적개발 활성화 방안 연구”, 2007.
- [2] 한국수자원공사, “수력발전 운영매뉴얼”, 2007.
- [3] 한국수자원공사, “발전통합운영시스템”, 2005.
- [4] Graphic Science Magazine, “Newton”, 2007.8월호.
- [5] 이형목, 김기원, 변일환, 이은웅, “수도관로를 이용하는 소수력의 최적설계 방안”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집B 권, pp. 1728-1730, 2005.

홍 정 조



1989년 영남대학교 전기공학과 공학사
2008년 충남대학교 전기공학과 공학석사
1989년 한국수자원공사 입사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 차장
(E-mail : jjhong@kwater.or.kr)

임 동 희



1984년 원광대학교 전기공학과 공학사
1984년 한국수자원공사 입사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 팀장
(E-mail : rimdh@kwater.or.kr)

김 수 상



1996년 삼척산업대학교 전기공학과 공학사
1996년 한국수자원공사 입사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 과장
(E-mail : soosang@kwater.or.kr)