

## 시화호 조력발전소건설 Joint Control System 소개

오민환, 김재훈, 신광철  
(주)삼안

### Introduction of Joint control system for the Shiwa Tidal Power Plant Construction

Oh, Mim-Hwan Kim, Jae-Hoon Shin, Kwang-Chul  
Saman Co. Ltd

**Abstract** - JCS(Joint Control System)는 대규모 조력발전소에서 조력발전소에 설치된 10대(25.4MWx10기)이상의 발전기에 대한 전자동 운전, 운영의 최적화, 운전 모드, 발전소 특성변수, 각종 운전상의 또는 법적 규제치 등을 고려하여 전력생산량을 극대화 한다.  
또한 발전소 운영의 단순화(종합설정: Global Setting, 부하특성곡선 등) 안전한 운전을 위한 발전소의 각종 변수 및 제한값을 감시하며 발전소의 발전기를 한 대의 발전기처럼 제어할 수 있도록 한다.

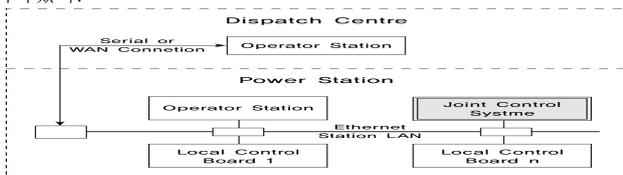
#### 1. 서론

국제유가가 배럴당 100달러를 넘는 신고유가 상황과 지구온난화에 대한 우려가 늘면서 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이런 측면에서 주목받는 신재생에너지중의 하나가 조력발전이다. 조력발전이란 해수면의 상승하강에 의한 해수와 조지의 수위차를 이용하여 에너지를 생산하는 것으로 시화호 조력발전의 경우 해수순환을 통한 시화호의 수질개선, 무공해 해양에너지의 개발 및 국가 부존자원의 개발 목적으로 개발되었다. 일반적으로 조력발전소의 수차터빈 및 발전기운영은 매번 달라지는 조석간의 조위와 조지수위 간의 낙차를 이용하여 수차발전기의 최대출력과 최대발전량을 생산하는 것으로 10대(25.4MWx10기)의 발전기를 발전소의 각종 변수 및 제한값을 감시하며 발전소의 발전기를 한대(254MW)의 발전기처럼 제어할 수 있도록 수행하고 있다. 본 논문에서는 Joint Control System의 기능이 많지만 종합설정운영에 대해서 중점적으로 소개하고자 한다.

#### 2. 본론

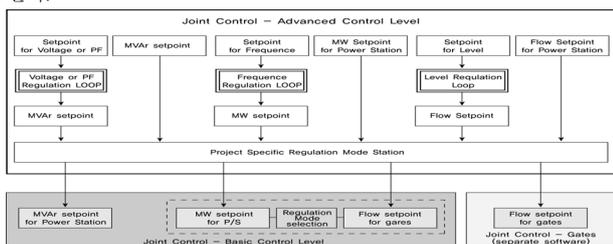
##### 2.1 JCS의 개요

JCS는 계층제어에서 Operation 제어시스템의 한 부분으로서 전용 PC에서 기능을 수행한다. JCS에서 이루어지는 감시와 제어의 데이터 정보는 LAN을 통하여 접속이 이루어진다. LAN은 Ethernet(TCP/IP)이 이용되며 Protocol은 IEC60870-5-104의 표준을 채택하였다.



〈그림 1〉 JCS 계통도

JCS는 조력발전에서 해수의 유통을 통제하고 최적발전을 위한 조력발전소의 발전사용수량에 대한 종합설정값 제어 및 개별 발전기에 요구되는 조절 루프(Regulation Loop) 제어를 종합설정값으로 수행한다.



〈그림 2〉 JCS 종합설정값 구성도

##### 2.2 JCS 종합설정값

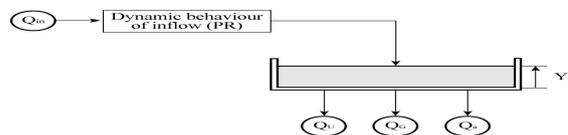
###### 2.2.1 수위 조절

수위는 해수로부터 유입·유출되는 유량의 변동에 의해 조절된다. 수위 설정값과 실제의 수위와의 편차에 따라 PI 조절 루프는 발전소의 유량설정값 Q(발전기를 통한  $Q_U$ 와 수문을 통한  $Q_G$ )를 변화시킨다. 그리고 유량 설정값은 유량조절 회로에 의하여 발전기로 배분된다. 조지로 유입되는 해수는 조지의 수위에 영향을 끼친다. 그러므로 유량 조절기의 출력 역시 영향을 끼친다. 다음공식과 [그림3]블록다이어그램에 나타내는 바와 같이 단순화된 수학적 모델을 이용하여 수위 편차는 유입되는 해수와 유출되는 해수 사이의 차에 대한 시간 적분으로 설명될 수 있다.

$$Y_t - Y_0 = \int_0^t (Q_{in} - Q_U - Q_G - Q_a) dt \quad (1)$$

여기서 :

- $Y_t$  : 실제 수위
- $Y_0$  : 초기 수위
- $Q_{in}$  : 유입 량
- $Q_U$  : 발전기를 통한 유출 량
- $Q_G$  : 수문을 통한 유출 량
- $Q_a$  : 추가 유량(해당 하는 경우)



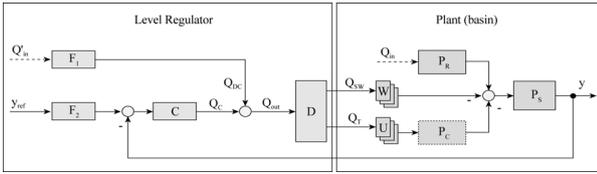
〈그림 3〉 조력발전소 조지 수위조절

조지 유·출입 해수의 적분 프로세스에 있어서 해수의 변화와 수위 조절기의 반응 사이에는 무시할 수 없는 시간지연 현상이 발생한다. 이와같은 시간지연은 한편으로는 제어의 질을 저하시키고 다른 한편으로는 조절기의 동작빈도를 증가시킨다. 그리고 조절기의 간섭이 증가하게 되면 호수의 유출 유량이 불안정해지는 바람직 하지 못한 현상이 일어난다. 그와 같은 현상은 유입되는 유량을 측정하여 Feed Forward Control 함으로써 현저하게 줄일 수 있다.

###### 2.2.1 유량 조절

Feed Forward Controller는 조지의 유입 및 유출 유량의 편차가 거의 제로에 가깝게 제어할 수 있도록 설계된다. 따라서 결과적으로 Feedback Controller의 간섭이 줄어들고 유량 유출이 부드러워진다. 그와 같은 제어기의 구조는 [그림 4]에 나타내었다.

Disturbance 및 Feedback Controller에 추가하여, Tracking control이 가능하다. Tracking Controller는 호수 수위의 설정값이 시간의 함수일 경우, 예를 들면 만조시 설정값이 감소하는 경우, 사용된다. 댐과 Powerhouse 사이에 수로(Channel)가 있는 형식의 특별한 발전소에서는 수위 조절기가 이중으로 설치 되어야 한다. 하나는 댐측의 수문을 위한 조절기 이고 다른 하나는 발전기를 위한 조절기로 동작한다. 그와 같은 구성을 위해서는 가끔 수학적 모델링이 추천된다. 이로써 설계 단계에서 Controller를 최적화 함으로써 제어 루프의 안정도 여유폭을 증가시킨다.



<그림 4> 유량조절

여기서 :

- F<sub>1</sub> : Feed forward disturbance controller
- F<sub>2</sub> : Tracking controller( 단 수위 설정값이 시간의 함수 일때)
- C : Feedback Controller
- D : 유량 설정치 배분을 위한 Dispatch Module
- P<sub>R</sub> : 조지의 유량 측정 관점에서 본 강 상류의 동적 특성
- P<sub>S</sub> : 조지의 동적 특성
- P<sub>C</sub> : 조지에서 발전소에 이르는 수로의 동적 특성(해당하는 경우)
- Q<sub>m</sub> : 조지로 유입되는 실제 유량
- Q<sub>m</sub><sup>\*</sup> : 조지로 유입되는 측정 또는 평가 유량, Feed forward disturbance control-용
- Y : 측정된 조지 내수위
- Y<sub>ref</sub> : 조지 수위 설정 값
- Q<sub>out</sub> : 조지에서 유출되는 유량 설정값
- Q<sub>C</sub> : Feedback Controller의 출력값
- Q<sub>DC</sub> : Disturbance controller의 출력값
- Q<sub>sw</sub> : Gate(discharge수 내수위)를 위한 유량 설정값
- Q<sub>T</sub> : 발전기를 위한 유량 설정값
- U : Unit 1~n
- W : Gate 1~m

### 2.3. 발전기 일정관리

JCS의 발전기 일정관리 기능은, 운전 중인 발전기들이 필요한 종합설정값을 만족 시키지 못할 경우 조인트콘트롤 모드로 운전 중인 발전기의 기동 명령을 발령하는 것이다. 그리고 필요한 설정값을 운전중인 발전기보다 적은 수의 발전기로 운전 가능 할 경우에는 발전정지 명령을 발령한다.

#### 2.3.1 JCS기동정지

발전기의 기동 정지는 다음 사항에 의거 결정 한다 :

- 1) 이용성(Availability)
- 2) 발전기 우선순위(Unit Priority)
- 3) 종합 설정값(Global Setpoints)
- 4) 발전기 효율 곡선(Efficiency curves of the unit)

모든 발전기의 기동 및 정지 명령 시간은 감시된다. 만약 명령실행의 정 궤환이 적시에 유용하지 않으면 발전기는 조인트콘트롤 대상이 되지 않는 것으로 간주한다. 그와 같은 발전기는 개별운전 모드로 운전 하는 것으로 간주한다.

##### ① 유용성(Availability)

발전기의 유용성은 다음 변수들에 의하여 결정된다.

- 1) 수정(리)중에 있지 않은 발전기
- 2) 기동준비가 되어 있는 발전기
- 3) 조인트콘트롤에 할당됨(격리모드 또는 개별운전 모드가 아님)

##### ② 발전기 우선순위

부하변동에 따라 발전기의 기동 혹은 정지가 필요할 경우 어느 발전기를 기동/정지 시켜야할지의 순서(Sequence)를 정해 놓은 것을 “발전기 우선순위(Unity Priority)”라고 한다.

우선순위는 다음과 같은 방법으로 정의 된다 :

- 1) 고정값
- 2) 운전원
- 3) 발전기의 운전시간(가장 오랜시간 운전한 발전기를 정지시키고 가장 늦게 기동시킴)
- 4) Busbar에 연결된 발전기 그룹,

### 2.4 최적화(Optimization)운영

#### 2.4.1 일반사항

활용 가능한 양의 물을 이용하여 발전소의 에너지 생산량을 극대화 하도록 효율 최적화 방법을 사용한다. 효율 최적화는 실시간 데이터와 이에 상응하는 연구적으로 설정해 놓은 설정값에 따라 동작한다.

에너지 생산의 최적화를 위해서는 정미 수두(Net head)와 터빈 발전기에 따라서 최적화 시스템은 다음 조건들이 충족되어야만 완전한 적용이 가능하다 :

- 1) 총 가용 수량이 터빈을 통과하여 흘릴 수 있는 최대수량(Maximum Permanent, 최대 생산 가능한 에너지와 같다)보다 적다
- 2) 에너지를 생산하기 위해 필요한 수량을 초과하는 물은 조석간만으로 이루어진다..
- 3) 발전기 효율곡선을 가지고 있다.
- 4) 터빈 Hill chart를 가지고 있다.
- 5) 발전기 정격 수두(Net head)를 알고 있다.
- 6) 조석간만의 예측

#### 2.4.2 최적화 원칙

한 발전소에서 동일한 발전기는 동일한 부하배분을 하도록 함이 대부분의 운전조건에서 발전소 총 효율의 최적화를 가져온다. 최적화 시스템은 발전기를 개개의 발전기로서가 아니라 모든 발전기를 전체로서 다룬다. 따라서 최적화는 JCS의 중요한 부분으로 최적화의 성과는 다음과 같다 :

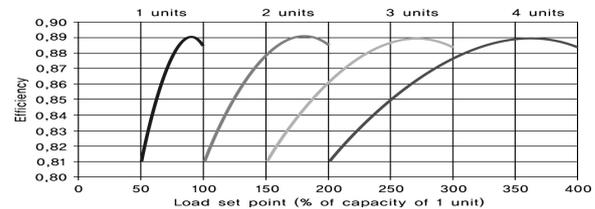
- 1) 최대의 효율로 에너지를 생산 가능하도록 유효전력 조절, 최소의 유량으로 최대출력을 의미함
- 2) 필요한 유효전력을 생산하는데 요구되는 최적의 발전기 수량 결정 JCS 내에 있는 최적화 모듈의 출력은 필요한 발전기의 숫자를 나타내는 특정한 값이다. 이 값은 JCS의 분배모듈을 위한 입력값 역할을 하며 필요시 발전기의 기동과 정지 기능을 수행 한다.

#### 2.4.3 효율 곡선

운전 중인 모든 발전기에 대하여 최소와 최대 유효전력 발전 범위 내에서 적정한 운전 Section이 존재한다. 이들 Section에 따라 최고의 효율을 얻기 위하여 발전기가 기동 또는 정지된다. 발전소의 총 효율 곡선은 다음 값의 함수 이다.

- 1) 필요한 유효전력 또는 유량
- 2) 운전하고 있는 발전기 숫자
- 3) 수두

[그림5]의 예에서 발전기 한 대의 180%의 출력은 발전기 두 대 혹은 세 대로 출력값을 낼 수 있으나, 첫 번째의 경우에는 총 에너지 효율이 89%가 되고 이에 반해 두 번째의 경우는 총 효율이 84.5%가 된다. 따라서 발전효율의 차이가 4.5%나 된다.



<그림 5> 터빈효율곡선

따라서 조인트콘트롤을 위한 유효전력 또는 유량 설정값과 실제 수두 값에 따라 최적화 모듈은 효율 표면을 계산한다. 운전되어야 할 최적의 발전기 숫자가 결정되면 정수로 숫자를 출력하고 이 숫자와 현재 운전 중인 발전기의 숫자를 비교하여 차이나는 만큼 발전기용 정지시키거나 기동시킨다. 모든 발전기에 대하여 개별적인 효율곡선(발전기, 터빈)을 그리는 것이 가능하며이로써 JCS을 동일용량이 아닌 발전기들을 조인트콘트롤 하는 것이 가능하다.

### 3. 결 론

시화호 조력발전소 건설사업에 설치되는 JCS의 종합설정값운영중심으로 소개하였다. 일반적으로 조력발전소는 대규모의 시설용량을 건설하나 저녁차의 단위기 약 2.5MW의 수차발전기를 설치함으로 발전소 용량에 따라 다르지만 수차발전기 숫자가 최소 10대이상의 발전기를 운영해야 함으로 JCS의 종합설정값운영이 매우중요한 필요치임을 알수 있다. 향후 조력발전소가 지속적으로 건설 예정이며 JCS에 대한 설치와 운영에 대하여 관심을 가지고 지속적으로 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 조재희,이기상,최재천,고란 스토미로비치,“ 시화조력발전소 규모결정” 한국해안·해양공학회 학술발표논문집,제15권,PP. .1-4,2004
- [2] 오민환,김종득,임계일,김계훈“조력발전설비 자동기동 및 최대출력운전설계”대한전기학회 하계학술대회(2005.7.18-20),