

## 단류식 창조발전의 조력발전소 최적화 운영 Model 개발에 관한 연구

김현한\*, 김만기\*, 김준규\*, 옥연호\*, 김광호\*\*, 정종찬\*\*  
 한국수자원공사\*, 강원대학교 전기공학과\*\*

### A Study on Development of Optimization Model for Single Action Tidal Power Station

Kim, Hyun-Han\*. Kim, Man-Kie\*. Kim, June-Kyou\*. Ok, Yeon-Ho\*. Kim, Kwang-Ho\*\*. Jeong, Jong-Chan\*\*.  
 Korea Water Resource Corporation\*, Kangwon National University Engineering\*\*

**Abstract** - Tidal power station is using the difference of the ebb and flow and the single action tidal power is dependent on tide amplitude and basin volume. Therefore the inflow of basin in rainy season has also effect on the daily power. Also if operating units are changed then starting head too changed. Therefore the number of units are very important for the optimization model. According to our study the primary point when we make a determination of optimization is starting head and governor control mode. On this study optimization model for tidal power station is considered all of this conditions

연안의 연간 조위(潮位) Data와 창조시 조위에너지를 이용할 수 있는 방조제 규모가 결정되어야 한다. 또한 발전량은 호수의 용적(m³)과 비례하므로 호수(Basin)의 전체용량 및 발전사용 수량별 호수의 수위(Level) 변화를 계산하여야 한다. 시화호조력발전소의 경우 연간 발전량을 계산하기 위하여 다음 공식을 이용하여 Simulation하였다.

$$y = k6 \times x^6 + k5 \times x^5 + k4 \times x^4 + k3 \times x^3 + k2 \times x^2 + k1 \times x^1 + k0 \quad (2-1)$$

$y$  :  $TWL = \text{Basin Level (m)}$   
 $x$  :  $VB = \text{Basin Volume (m}^3\text{)}$

<b>K6</b>	<b>K5</b>	<b>K4</b>	<b>K3</b>	<b>K2</b>	<b>K1</b>	<b>K0</b>
<b>511.25</b>	<b>-26,380</b>	<b>52,576</b>	<b>-5E 06</b>	<b>2E 07</b>	<b>-6E 07</b>	<b>4E 08</b>

### 1. 서 론

지구 온난화의 영향 및 화석 연료의 고갈로 신재생 에너지에 대한 개발이 세계적인 추세이며 특히 우리나라의 경우 기후변화협약과 교토의 정서에 따라 2013년부터 온실가스 감축 의무 대상 국가로의 지정이 유력시되고 있어 청정에너지에 대한 개발이 더욱 필요한 시점이다. 이에 대하여 개발 잠재력 및 시설용량 등을 고려 해 볼 때 우리나라의 경우 조력발전이 좋은 대안으로 대두되고 있다. 그러나 조력발전은 해수의 조수간만의 차를 이용하는 발전설비로써 조위의 형태가 시간의 흐름에 따라 정형과 형식으로 변하며 이러한 낙차 변화에 따라 발전 출력도 연동해서 변하게 되는데 조위(潮位)는 그 크기와 지속시간은 매 주기마다 다르고 발전기 운전대수도 설비 점검보수 상태에 따라 모두를 가동할 수 없는 경우가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 내수위 관리수위도 주변 환경에 따라 변경될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 발전량에 영향을 미치는 이러한 운전요소를 검토 분석하여 조위(潮位)별 최대 에너지를 생산하기 위한 조력발전소 최적운영 모델을 개발하고자 한다.

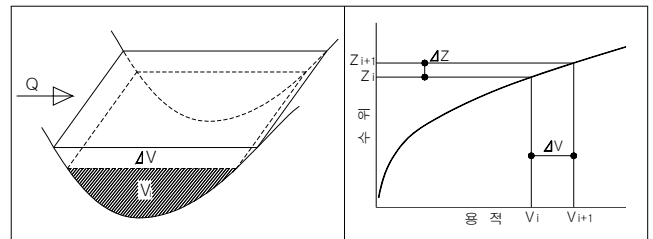
#### 2.2.1 조력발전의 유효낙차계산

댐의 수력발전은 방수로 수위가 거의 일정하여 저수위(貯水位) 낙차만 고려하여 유효낙차를 계산할 수 있다. 그러나 조력발전은 조위도 변하지만 <그림 2>과 같이 발전기 운전에 따라 발생하는 사용수량(Qplant) 만큼 호소수위가 상승하므로 조위(潮位)의 낙차 Curve와 호소수위의 변화를 함께 고려하여 시간 함수적으로 유효낙차를 계산하여야 한다. 시화호 조력발전소를 모델로 이에 대한 유효낙차를 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta VB = \Delta T \times Q_{plant} \quad (2-2)$$

- $\Delta VB$  : Basin Volume Change (m³/s)
- $\Delta T$  : Calculation Step (0.1h)
- $Q_{plant}$  : Plant Discharge (m³/s)

$$H_{gross} = SWL(\text{Sea Water Level}) - BWL(\text{Basin Water Level}) \quad (2-3)$$



<그림 2> 호수용적과 수위관계

따라서 2-1식과 같이 시간함수별 호수의 용적 변화는  $VB_{i+1} = VB_i + \Delta VB$ 로 변하게 되며 이 용적변화에 따른 수위 변화와 그 시간대의 조위의 차이가 발전낙차( $H_{gross}$ )가 된다. 시화호조력발전소의 발전기가 운영될 경우 30분간의 조위에 따른 낙차변화를 Sampling한 것을 계산해 보면 <표 1>과 같다.

<표 1> 시화호조력발전소 낙차변화

Time	Sea Water Level(m) (HWL)	Basin Water level(m) (TWL)	$H_{gross}$ (m)	Plant Discharge (m³/s)	$\Delta$ Reservoir Volume (m³)	Reservoir Volume (천m³)
0.1	-1.13	-4.17	3.04	0	0	159,275
0.2	-0.89	-4.17	3.28	5,134	1,848,246	159,275
0.3	-0.65	-4.12	3.46	5,170	1,861,026	161,124
0.4	-0.41	-4.06	3.65	5,201	1,872,333	162,985
0.5	-0.18	-4.01	3.83	5,235	1,884,673	164,857

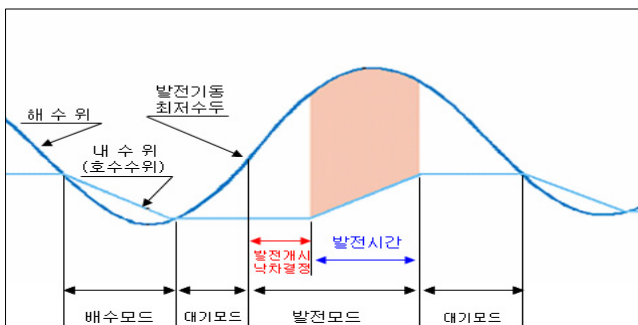
#### 2.2.2 최적발전개시 수위( $H_{gross}$ )결정

시화호 작은가리섬 주변의 연간 조위 Data를 살펴보면 최대 9.67m에서 최소 1.39m사이의 분포를 나타내며 대부분의 조위는 4.5~7.5m사이에 분

### 2. 본 론

#### 2.1 조력발전소 발전방식

해수의 조수간만의 차는 하루에 두번 발생하며 조력발전 방식은 단방향의 단류식과 양방향의 복류식으로 구분되며 단류식에는 밀물때의 창조식과 썰물때의 낙조식으로 구분된다. 또한 창조식 단방향 조력발전설비의 조위에 따른 기동/정지 순서를 살펴보면 <그림 1>과 같으며, 대기 모드에서 외조위가 상승하여 발전개시 수두차가 되면 발전모드로 변경되며 일정시간 후 조위 낙차가 줄어들어 최소발전 수두차 이하로 줄어들면 발전기가 정지하고 다시 대기모드를 유지하다가 외조위가 내수위 보다 낮아지면 다음 조위의 발전을 대비하여 수문과 수차 쪽으로 배수하는 순서로 계속 반복하여 동작한다.

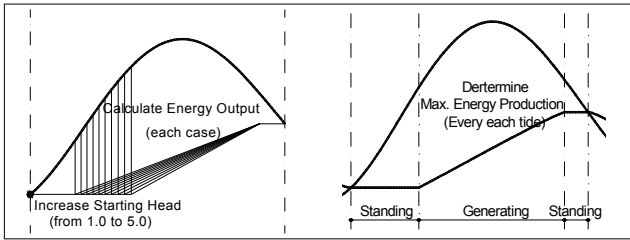


<그림 1> 조위에 따른 조력발전 운전Mode

#### 2.2 창조식 발전량 계산

단방향 창조식 조력발전소의 연간 발전량을 계산하기 위해서는 해당

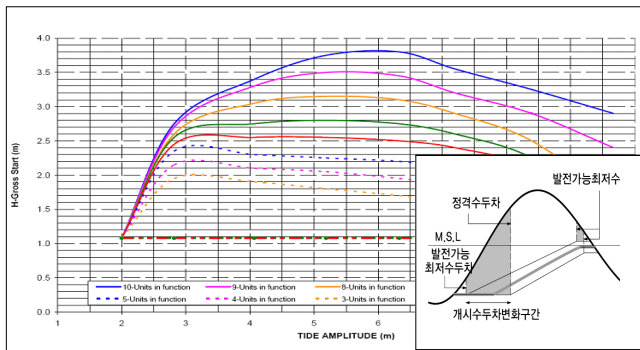
포하므로 대부분의 기동낙차는 3.0m~3.8m사이에 결정되지만 한 조석 동안의 발전량은 발전개시낙차에 따라 민감하게 변한다. 따라서 시화호 조력발전소의 최적발전개시수두차 결정 과정을 살펴보면 <그림 3>와 같다. 배수모드 완료후 외조위와 내수위가 같아지는 시점에서 계산을 시작하고 발전가능 최소 수두차부터 정격 수두차까지 수두차를 0.1m씩 증가시키면서 조위별 발전량을 산정한 결과 최대발전량이 산정되는 수두차를 최적발전개시수두차로 결정하였다.



<그림 3> 최적발전개시낙차 결정

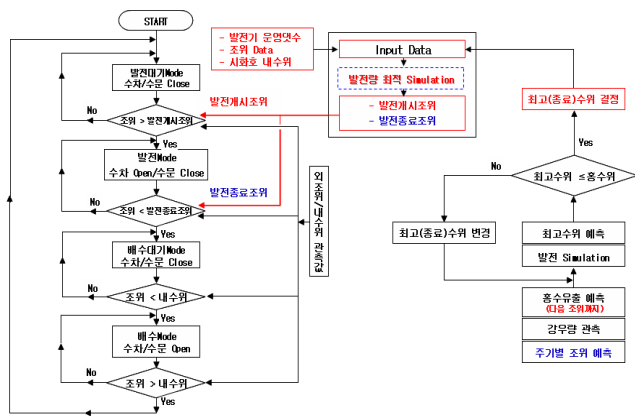
**2.3 조건변화에 따른 최적운영 Model**

창조식 조력발전은 매 조위마다 방조제를 이용하여 발생한 위치에너지를 호수(Basin)로 방류하면서 그 낙차를 이용하여 발전하는 방식인데 호수(Basin)의 용량(m<sup>3</sup>)만큼 에너지를 생산 할 수 있다. 이 경우 기동낙차 결정에 따라 전력 생산량이 달라지기 때문에 발전량을 극대화하기 위해서는 최적 기동낙차를 결정하여야 하는데 발전설비 분해점검 및 Trouble 발생에 따라 일부 발전기를 운영할 수 없는 경우 <그림 4>와 같이 발전기 운영댓수에 따라라도 최적기동낙차가 달라지며 특히 홍수기에는 유입량이 호수 수위에 영향을 미치므로 유입량에 따라라도 최적발전 기동낙차가 달라진다. 따라서 이를 고려하여 최적 운영모델을 구축하여야 한다.



<그림 4> 발전기 기동댓수에 따른 최적 기동낙차

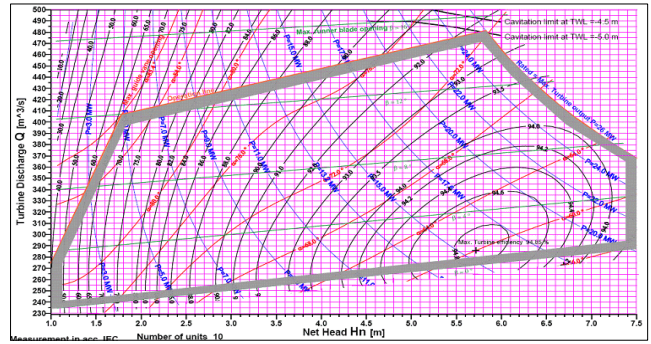
이러한 변수를 고려하여 창조식 조력발전소 최적운영 모델을 구축하면 <그림 5>과 같다



<그림 5> 조력발전소 최적화 운영 Model

**2.4 Governor Control 최적운영 Mode**

조력발전은 댐식의 수력발전과는 다르게 주기적으로 발생하는 조위에서 낙차가 시간 함수적으로 변하며 이러한 낙차 변화에 따라서 Governor는 <그림 6>과 같이 설계당시 모형실험에서 제시된 Hill Chart에 따라 유효낙차별 최대 출력으로 운전 될 수 있도록 각각의 Control Mode에서 제어하여야 하는데 조력발전설비의 Governor Control Mode 종류로는 Speed/ Opening/Flow/Level 및 출력제어가 있다.

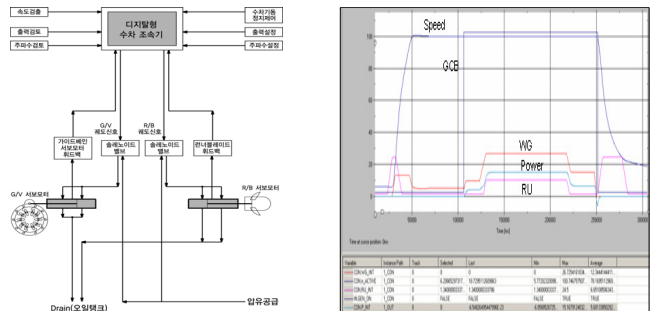


<그림 6> 수차발전기 Hill Chart

따라서 조력발전소의 경우 Governor System 고려사항으로는 조석 수위 및 호수 수위에 추종하여 출력제어, 수위연동제어, 유량제어를 할 수 있도록 하고 계통요구에 신속히 대응하는 속도, 주파수 제어시스템이 적용되어야 하며 고효율 운전을 위한 가이드 베인과 런너 블레이드의 CAM Control System이 되어야 한다. 또한 다수의 발전기를 동시에 운전하는 경우에는 발전기간 전압 및 주파수 등이 일정 범위 내에서 운전될 수 있도록 Joint Control System을 구축하여야 한다.

**2.4.1 정격낙차 이하에서 최적운영 Mode**

수차발전기가 계통에 병입된 후 Governor는 조석수위에 추종하여 Level Controller로부터 유효낙차를 계산하고 계산된 낙차에 따라 <그림 7>과 같이 유량과 수차출력을 제어하는 Flow Controller와 가이드 베인 개도를 조정하는 Opening Controller 등과 함께 최대 출력 운전이 될 수 있도록 가이드 베인과 런너 블레이드 각도를 제한한다. 이 때 Speed Controller는 계통주파수와 수하특성에 따라 수차의 속도를 비교하면서 전력계통 주파수에 맞게 제한한다. (Speed Sensing 감도 : ±0.02%)



<그림 7> Governor Control 구성도

**2.4.2 정격낙차 이상에서 최적운영 Mode**

주기적으로 발생하는 조위의 크기는 경우에 따라서 발전기 정격 낙차 이상으로 높아질 수 있는데 이 경우에는 조위에 따라서 유량을 계산하되 정격출력 이상으로 운전되지 않도록 자동 수위 유량제어가 가능하도록 시스템을 구축하여야 한다.

**3. 결 론**

조력발전은 해수의 조석간만의 차를 이용하는 발전설비로서 단류식 창조발전의 경우 전체 전력량의 크기는 호수(Basin)의 용적에 따라 결정되지만 일일 발전량은 조위(潮位)의 크기로 결정된다. 그러나 동일한 용적 및 조위조건에서도 기동낙차가 변할 경우 발전량의 차이가 생기게 되는데 이에 대한 결정을 최적기동낙차 결정이라 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 결정하기 위한 여러 가지 변수를 고려해본 결과 발전기 기동댓수 변화가 기동낙차 결정에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 홍수기 호수 유입량을 고려한 호수위 관리도 최적기동낙차에 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 조위 특성상 유효낙차가 정현파와 형상으로 변하게 되는데 낙차별 최대 출력 운전을 위해서는 정격낙차를 기준으로 Governor System을 HQ Control Mode로 운전하는 것이 가장 적절한 것으로 검토되었다. 따라서 본 논문에서는 이러한 모든 조건들을 고려하여 단류식 창조발전의 조력발전소 최적화 운영 Model을 구현하였다.

**[참 고 문 헌]**

[1] Tidal Power Plants(Edited by L.B Bernshtein)  
 [2] Published in the WATER POWER Conference on UPRATUNG & PRFURBISHING HYDRO POWER PLANTS(9-11 Oct 1995) France  
 [3] 시화호조력발전소건설공사 기본설계 보고서(한국수자원공사 2004.6)  
 [4] Principles of Electric Machines and Power Electronics