2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

조력발전설비 자동기동 및 최대출력 운전 설계

강동형 *, 김종득 *, 임재일 *, 신광철, ** 오민환, ** 김재훈 **
* 한국수자원공사 *(주) 삼안 **

The design for automatic operation of Tidal power generation equipment

Kang.D.H *,Kim.J.D *, Him.J.L *,Shin.K.C, ** Oh.M.H **,Kim,J.H **
Korea Water Resources Cooperation, *Saman Co. Ltd **

Abstract - The Tidal Power Plant Management is defined to devise the optimum operating plan and control generating output automatically to obtain maximum production by using adaptive control method.
The method to use tidal level observation results is suggested as two(2) kinds of manner, that is the two(2) layer design method by power model simulation and power automatic control.

1. 서 론

조력발전이란 해수면의 상승 하강에 의한 해수와 조지의 수위차를 이용하여 에너지를 생산하는 발전방식이다. 조력발전은 수력과 달리 해수의 발전사용 유통량에는 제한이 없는 것으로 가정하고 있으나 인공으로 조성된 조지의 저수량은 시설제한을 받게 된다. 일반적으로 하루 두 번 발생하는 조석을 이용하여 발전낙차를 얻게 되고 조지의 저수량을 효율적으로 운영하여 발전량 생산을 극대화 한다. 조력발전 운영이란 매 조석 Cycle에서 변화하는 조석의 크기, 조위와 수위, 유입량 및 파랑변화 상태를 고려하여 발전량을 최대로 확보 할 수 있는 조력발전 모형을 시뮬레이션하고 최적 결과를 이용 발전개시시점 및 정지시점을 결정한다[1][2].
본 설계방법은 조력발전통합운영시스템을 SCADA에서 적용할 수 있도록 발전모형계산과 발전설비 자동제어를 상, 하위계층으로 구분 2계층구조 방안을 제시하였다. 상위계층에서는 일정시간에 대한 최적화를 계산한다. 해수면의 조위관측데이터를 처리하고 조위예측모형에 의해 조위를 예측한다. 예측된 조위는 매 10분 간격으로 조력발전모형의 유효낙차를 계산하는데 이용하며 최대발전량이 계산되는 시점의 유효낙차를 결정한다. 하위계층에서는 상위계층에서 결정된 일정시간의 전체부하에 대하여 매 순간 마다 최대출력이 되도록 제어 한다. 본 방법이 SCADA 시스템에서 적용될 수 있도록 입출력, 운전흐름, 계층구조를 분석하여 제시하였다. 본 설계방법의 유용성 검증을 위해서는 특정 대상에 적용 결과를 검토 분석하여야 한다.

2. 개 요

2.1 조력발전 운전방식

기본적인 창조발전 싸이클을 그림 (1)과 같이 나타내었다. 창조식 발전방식은 낙조시 수문과 수차를 개방하여 조지수위를 간조위까지 낮추어 창조시에 발전하는 방식이며 대기 →발전→대기→배수의 싸이클을 반복하여 발전한다. 발전모드는 창조시에 최적발전수두차 발생시부터 수차를 개방하며, 발전가능 최저수두차 발생시점까지 발전하게 된다. 배수모드는 낙조시에 내수위와 외조위가 같아지는 시점부터 다음 창조시 내수위와 외조위가 같아지는 시점까지 수차 수문을 개방하여 조지내에서 외해로 배수하여 내수위를 낮춘다.

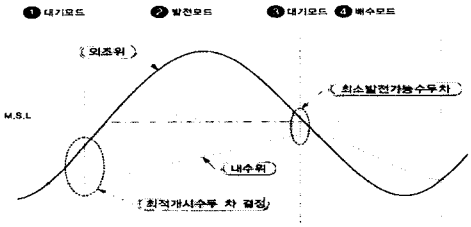


그림 1. 조력발전 운전방식 Cycle 도

그림(1)에서 최적개시 수두차와 최소발전가능 수두차의 결정은 조력발전 생산량의 증감에 영향을 미치는 중요한 변수이다.

2.2 수차의 병렬운전

발전설비 전체를 최적의 조건하에서 자동으로 운전함으로 발전용량을 극대화하고 최대출력 운전을 위해 병렬운전방식(Joint Control)을 도입하고 있다. 병렬운전의 Set point는 파랑이나 유속 및 낙차에 따른 변수에 능동적으로 대응 전체부하에 대하여 전체발전기가 1대를 운영하는 것과 같이 발전출력 또는 발전사용수량이 자동제어 된다.

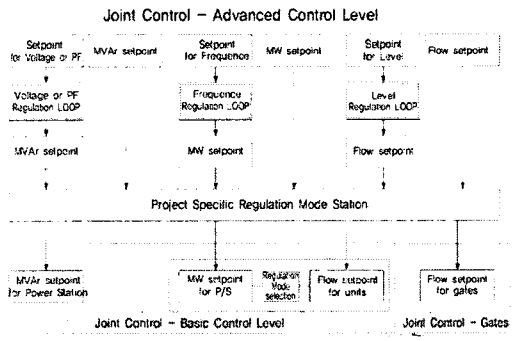


그림 2. 수차/발전기 Joint Control 계통도

그림(2)에서 발전출력, 유효낙차, 발전사용수량 조절은 수차 조속기의 Guide Vane 서보모터 및 Runner Blade 서보모터를 조절하여 얻어진다. 조속기의 병렬운전은 발전출력이 일정하게 Balance되도록 제어되며 설정값이 전자 캠을 추적하도록 적응(Adaptive)제어되고 있다.

3. 시스템 분석

3.1 입·출력 분석

3.1.1 최적 기동시점 결정방법

. 최적 수두차의 결정방법은 반복계산법과 최적화이론 방법이 있다. 그림(3)의 방법은 반복계산법으로 매 조석마다 발전가능 최저수두에서 정격 수두차 까지 0.1m씩 변화시키면서 발전량을 산정하여 최대발전량이 발생하는 수두차를 결정한다.

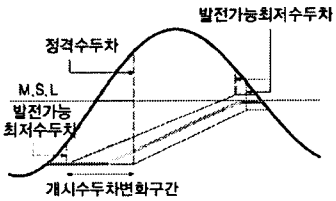


그림 3. 최적 기동시점 결정모식도

발전시 수차를 통과하는 유량특성은 외조위와 내수위의 수두차에 대한 함수로 일반식은 다음 식(1)와 같다..

$$P_{max} = \sum_{i=1}^{N} P_i(Q_i, H_i)\eta_i \qquad (1)$$

3.1..2 공정별 연계분석

기본적인 조력발전설비 운영 및 제어의 단계별 공정과 연계도를 그림 (5)와 같이 나타내었다.

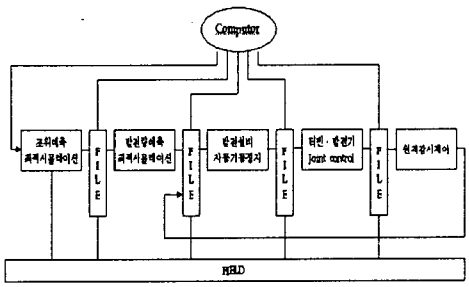


그림 4. 공정별 연계 분석도

그림(4)에서조위예측 및 발전량예측은 모형은 일정지연시간(Off-line) 계산으로 순서적(Sequence)방법이지만, 발전설비기동정지 ,Joint Control 및 원격감시제어는 되먹임(Feedback)방법이다. 모형의 계산방법인 조위예측, 발전량예측의 결과는 File에 저장 다음 공정의 입력 값으로 사용된다.

3.2 운영흐름도 분석

그림(5)에서 창조식 조력발전 Cycle을 4개 공정으로 구분하고 운영 흐름도를 도식하였다. 창조식 발전방식에서 발전낙차는 조위와 조지의 수위와의 차를 나타내고 있다. 조석과 조위는 지역적으로 차이는 있으나 규칙적으로 일어나는 해양현상중의 하나로 예측이 가능하다. 조석의 예측이 가능하기 때문에 예측된 조위를 근간으로 조지의 저수량을 효율적으로 운영하는 저수지운영곡선을 결정하는 조력발전 최적 운영계획을 수립할 수 있다.
조위예측 흐름과 조력발전의 한 싸이클에서 최대발전량을 확보할 수 있는 최적발전개시시점과 최소발전정지시점을 결정하는 과정을 흐름도에 나타내었다. 발전대기모드는 조지내에 유입되는 유량은 없고 조지내 수위는 일정하게 유지된다. 배수대기 모드는 낙조시에 수두차가 최소발전가능 수두차 이하일 때는 발전이 불가능하다 수차를 닫고 대기한다. 조지내 수위는 일정하게 유지된다.

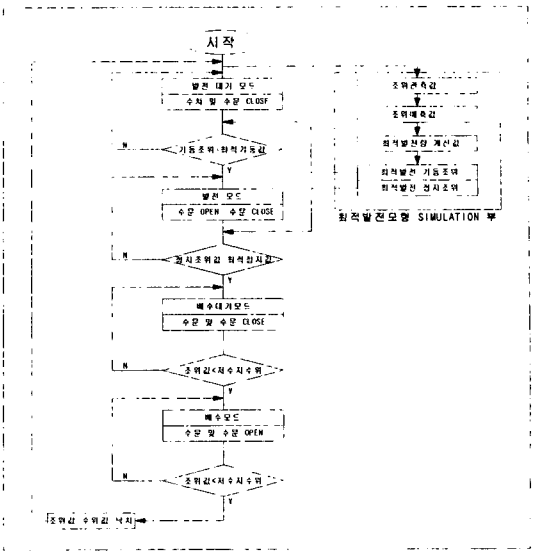


그림 5. 조력발전 운영흐름도

3.4 2계층 구조설계

조위측정센서에서 관측된 데이터를 실시간(On-Line)운전과 일정지연시간(Off-Line)으로 운영한다.

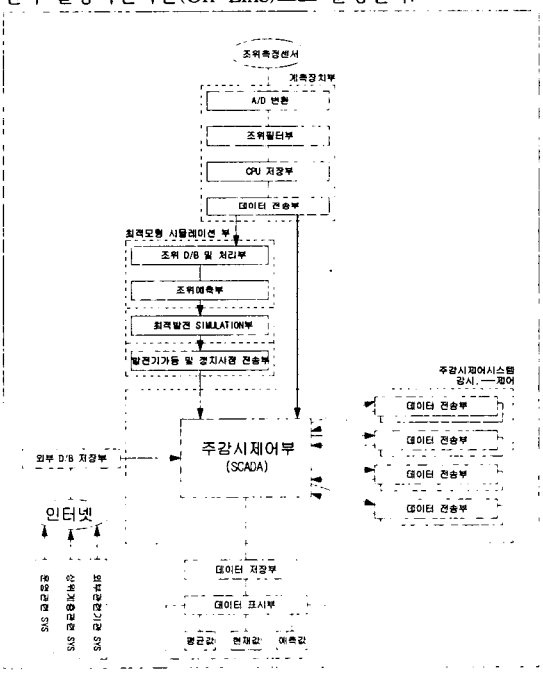


그림 6. 계층제어 구조 분석도

본 설계방법에서는 조위관측 데이터의 이용방법으로 계층적 2 Level 방법에 이용한다. 운영은 2원화(1Level;총괄운영, 2Level 감시제어)하고 감시제어는 1원화 방안으로 1개 시스템에서 집중감시제어한다.
즉, 1개의 측정값은 수차발전기의 실시간 운전감시제어를 수행하고 또 다른 1개의 측정값은 시스템 최적계산을 수행하며 그 결과 값을 일정시간 마다 SCADA에 전송 실시간으로 명령을 수행하도록 한다. HMI표시부에서는 과거의 평균값과 관측값 및 예측값을 그래픽상에서 비교하므로 의사결정지원을 할 수 있도록 한다.

4.. 적 용 사 례

4.1 조력 발전 통합운영시스템

조력발전 통합운영시스템이란 조지의 수위관리에 의해 발전소 가동 및 정지 명령을 내리고 홍수 유입시 수위를 예측하며 수질변화를 관리한다..

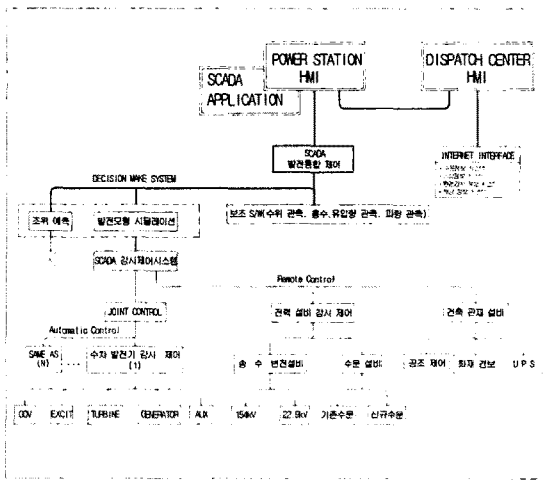


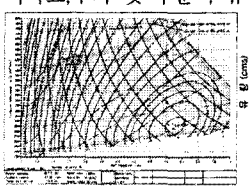
그림 7. 조력발전 운영시스템 구성도

그림(7)에서 조위예측과 발전모형 시뮬레이션은 발전소 최적운영시스템으로 발전량극대화계산 및 발전기 기동정지 시점을 제공하고 있다.

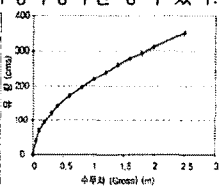
전력설비 및 건축 관제설비는 원격감시제어대상에 포함하고 수차발전기는 Joint Control에서 다수의 수차 조속기를 전체부하와 연계하여 1대를 운영하는 것처럼 발전출력을 일정하게 운전하도록 한다. 각 단위 수차터빈에서는 개별 부하에 안내날개와 런너의 각도를 조절 개별출력을 자동제어 한다.

4.4 입력

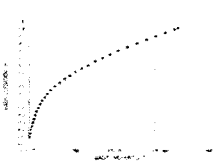
발전량산정 시뮬레리션의 입력자료로는 조석자료,내용적자료,수차 및 수문의 유량특성곡선 등이 있다.



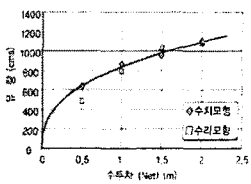
(1)터빈효율곡선



(2) 수차유량특성곡선



(3)저수지내용적곡선



(4) 수문유량특성곡선

그림 8. 입력 자료

- 수차효율곡선은 수차제작사가 수차모델시험 결과에 의해 제시되는 곡선으로 다항식 형태로 발전량산정 모형에 입력된다.
- 수차 및 수문 유량특성곡선은 각단위기 용량별 특성을 결정하고 수리모형실험을 통하여 유·출입부의 와류발생 여부, 수로내 부압발생 여부 등을 확인한 결과 양호한 곡선으로 다항식 형태로 발전량 산정 모형에 입력된다.

4.5 발전량 계산

조력발전은 조지용량이 한정되어 있다. 시설제약 조건하에서 발전량을 최대화 할 수 있는 방안으로 그림 (9)와 같이 발전량계산 흐름도를 나타내었다.

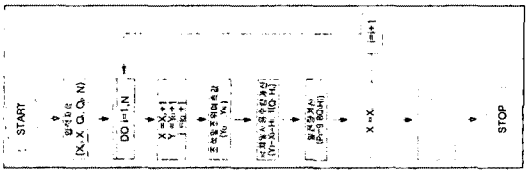


그림 9. 발전량 계산 흐름도

발전가능최소낙차를 초기값으로 주고 조석곡선의 등간격 t로 $i=i_0+1$로 최대조위까지 반복해서 계산하며 조지의 수위 X_i가 시설제약조건인 최종 수위 $X_i=X_L$에 도달하면 계산을 마친다.

4.6 출력

발전량산출결과는 조석의 간만 차에 따리 민감하게 반영된다. 그림 (9)에서 외조위 와 내수위의 차가 유효낙차가 된다.

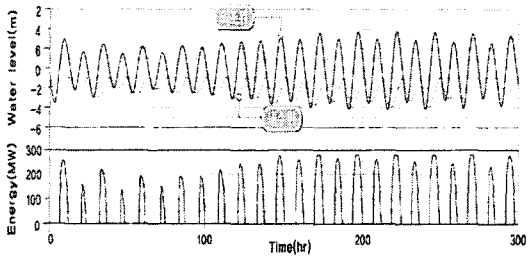


그림 10. 시뮬레이션 결과

. 그림에서 에너지 산출결과에서 알 수 있듯이 외조위가 높게 나타난 조석에서 발전량이 크게 나타나고 있다. 따라서 조력발전에서 인공조지의 용량은 시설제한으로 일정하다. 매 조석마다 어느 조위시점에서 기동하고 정지하는 것이 발전량의 극대화를 기할 수 있는지 기동정지 시점은 발전량 생산에 중요한 변수로 작용하고 있다.

(표 1) 발전량 계산결과

조석수	발전시간 (hr)	발전개시조건			조석당 발전량 (MWh)	누가 발전량 (MWh)	발전시 유입량 (m^3)	배수시 수차 배수량 (m^3)	배수시 수문 배수량 (m^3)
		수두차 (m)	외조위 (m)	내수위 (m)					
20	4.8	3.42	0.76	-2.66	757.76	11,726.3	8.88E+07	2.54E+07	6.34E+07

조력발전의 모의 운영에 의한 발전량을 산출한 결과 표(1)에 나타내었다. 매 조석마다의 발전시간 발전량, 배수량 및 수위에 대한 변수를 계산하고 있다. 표에서는 1개 조석에 대한 발전량의 산출결과를 예로 나타내고 있다.

5. 결 론

1.조력발전의 운영과 제어관계를 2계층으로 분석하였으며 SCADA에서 적용방안을 제시하였다. 유용성 검증을 위해 현장 적용 연구가 진행되어야 한다.

2.조력발전량 극대화를 위해서 최적화 방법이 도입되어져야하고 조지운영의 최적운영계획연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

[참 고 문 헌]

[1]해양수산부(2001), 해양에너지 실용화 기술개발(I):조력, 조류에너지

[2]한국해양연구소(1997),조력발전시스템 최적화연구