

시화조력발전 계통연계에 따른 시간대별 발전량 산정

(Calculation of Generation Power Integrating Sihwa Tidal Power into Power Systems)

김규호* · 송경빈**

(Kyu-Ho Kim · Kyung-Bin Song)

요 약

본 연구에서는 시화조력발전소의 계통 연계에 따른 발전량을 예측하여 평가하는 방안을 제안하였다.

국립해양조사원에서 제공되는 시화방조제의 대한 조석에 따른 고조(high water)와 저조(low water)의 해측 예측 자료에 대하여 보간법(interpolation)을 이용하여 1분 단위의 시화호 해측의 수위를 예측하였다. 예측된 시화방조제의 해측과 내측의 수위를 이용하여 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 계산하였다. 계통 운영회사에서는 이러한 발전량을 근거하여 계통 기동정지계획 등에 활용할 수 있다.

Abstract

This paper presents a method to calculate generation power for integrating Sihwa tidal power into power systems.

The sea levels of 1 minute interval using cubic interpolation based on the forecasted levels of high and low water offered from Nori(National Oceanographic Research Institute) are calculated. If the sea level is greater than the lake level and the difference between sea level and lake level at high tide is over the default value, it begins to calculate the tidal power. It is seen that tidal power can supply power to demand side stably and economically from assessment of effect for integrating tidal power into power systems.

Key Words : Sihwa Tidal Power, Power Generation Forecast, Cubic Interpolation

1. 서 론

해양에너지의 하나인 조력발전은 바다의 밀물과 썰물의 차이를 이용하는 발전으로서 그림 1과 같이

조석(ebb and flow)이 발생하는 하구 또는 만을 방조제로 막아 해수를 가두고 수차발전기를 설치하여 외해와 조지내의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이다.

조력발전에 관한 각국의 주요활동을 년대별로 살펴보면 1966년 프랑스는 랑스 하구에 240,000[kW]를 발전할 수 있는 조력발전소를 완공하였으며, 프랑스는 랑스 조력발전소에 이어 연간 30억[kW]규모의 조력발전소를 계획했으나 아직도 계획선에 머물

* 주저자 : 안산공과대학 전기과 부교수
** 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 조교수
Tel : 02-820-0648, Fax : 02-817-7961
E-mail : kbsong@ssu.ac.kr
접수일자 : 2006년 10월 26일
1차심사 : 2006년 10월 31일
심사완료 : 2006년 11월 13일

시화조력발전 계통연계에 따른 시간대별 발전량 산정

러 있다. 러시아의 Kislaya Guba 시험 조력발전소 준공, 1970년대에 캐나다의 Fundy만 예비 타당성 재검토, 1980년대에 캐나다의 Annapolis 시험발전소 준공과 영국의 Severn강 하구, Mersey강 하구 등에서 소규모 조력지점 개발 타당성 검토사업 등을 들 수 있다. 일본은 물결이 강한 내도해협에서 조류발전 실험에 성공했다. 중국은 발해에서 북부만에 걸쳐 8기의 조력발전소를 보유하고 있는데 그 용량은 모두 합쳐 6,000[kW]이다[1].

우리나라에서도 조력발전에 대한 조사 및 건설 작업이 한창이다. 현재 경기도 시화호 방조제의 작은 가리섬에 2009년 5월에 완공 목표로 조력발전소를 건설 중에 있으며 설비용량은 254,000[kW]로서 조력발전으로는 국내 최초이다. 또한 계획 중에 있는 가로림만에 조력발전소를 설치하면 약 480,000[kW] 정도의 전력을 생산할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 시화조력발전소의 계통 연계에 따른 발전량을 예측하여 평가하는 방안을 제안하였다.

국립해양조사원에서 제공되는 시화방조제의 대한 조석에 따른 고조(high water)와 저조(low water)의 해측 예측자료에 대하여 보간법(interpolation)을 이용하여 1분 단위의 시화호 해측의 수위를 예측하였다. 예측된 시화호의 수위를 이용하여 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 계산하였다.

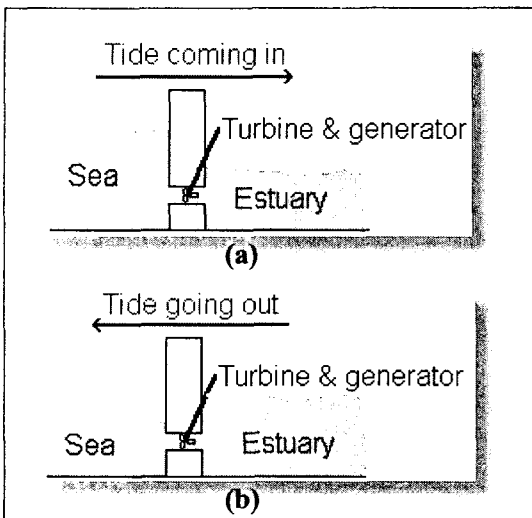


그림 1. 밀물과 썰물에 따른 발전방식
Fig. 1. Generation types with high and low water

2. 조력발전의 원리 및 종류

2.1 조력발전의 원리

수력발전소와 비슷한 원리이나 수력발전의 낙차가 수십[m]인데 비해 조력발전은 낙차가 보통 10 [m] 이하라는 점이 다르다. 또한, 밀물 때 수문을 열면 물이 쏟아져 들어오면서 터빈을 돌려 발전하게 되고, 썰물 때는 터빈의 날개가 반대 방향으로 돌면서 다시 발전하게 되는데 조수의 방향 변화에 따라 두 가지 문제가 발생한다. 첫째, 조수의 힘이 계속해서 바뀌다가 간조(low tide) 때와 만조(high tide) 때는 조수의 흐름이 정지되므로 이 힘도 제로가 된다. 즉 조수의 힘이 하루에도 여섯 시간 마다 제로로 떨어지거나, 조위가 일정한 시간대에서는 발전할 수 없다는 등 변화가 심하기 때문에 조력발전을 계통에 연계할 때는 전력수급에 세심한 고려를 해야 한다. 둘째, 조수의 미치는 범위에도 변화가 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 보름달이거나 그믐달일 때는 달, 지구, 태양이 일직선으로 늘어서는 사리(대조, spring tides)시에는 서로 끌어당기는 힘이 강해져서 바닷물도 높이 찻다가 밀려가기를 반복하기 때문에 조수의 힘도 가장 강해진다. 그러나 달, 지구, 태양이 직각으로 배열되어 반달이 되는 조금(소조, neap tides)시에는 끌어당기는 힘이 약해지고 조수의 힘도 약해진다. 즉 조수의 미치는 범위가 연중 주기적으로 변하기 때문에 이것을 고려하여 전력공급을 하여야 한다.

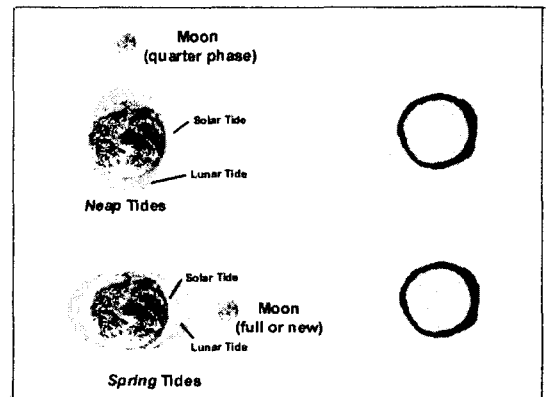


그림 2. 조석현상 및 해수면의 변화 원인
Fig. 2. Tide and variation of sea level

2.2 조력발전의 종류

조력발전의 종류에는 단류식과 복류식 두 가지의 발전방식이 있다. 단류식(Single Effect) 발전은 낙조(썰물)류나 창조(밀물)류 중 하나의 흐름만 이용하여 발전하고, 복류식은 낙조류와 창조류 두 가지를 모두 사용하여 발전하는 방법이다.

2.2.1 창조발전

그림 1의 (a)와 같이 조류의 방향이 외해에서 조지 방향으로 흐를 때에 발전하는 것을 창조발전(Flood Generation)이라 한다. 그림 3은 외해의 수위와 조지의 수위의 변화에 따른 발전, 충수 및 대기의 과정을 나타낸 것이다.

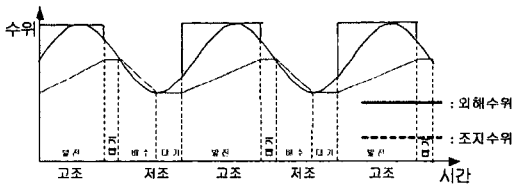


그림 3. 창조식 발전주기
Fig. 3. Flood generation period

2.2.2 낙조발전

그림 1의 (b)와 같이 조지에서 외해 방향으로 발전하는 방식으로 낙조발전(Ebb Generation)이라 한다. 그림 4는 외해의 수위와 조지의 수위의 변화에 따른 발전, 대기 및 충수의 과정을 나타낸 것이다.

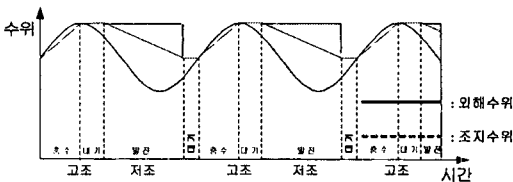


그림 4. 낙조식 발전주기
Fig. 4. Ebb generation period

2.2.3 복류식 발전

창조발전과 낙조 발전을 조합하면 발전량을 두 배로 늘릴 수 있고, 조지내의 조차 변동폭도 넓어지고

기존 조석과 비슷해지면 환경문제도 없을 것이다. 그림 5는 복류식(Double Effect) 발전 주기를 나타낸 것이다.

낙조와 창조 발전 사이에 수문을 개방하여 해수를 방출하므로 발전에 사용되는 수량도 줄어들고, 창조식 발전시 수차의 역방향 발전으로 인한 효율 저하로 복류식은 단류식보다 발전량이 작다. 따라서 같은 발전량을 내려면 수차 대수가 늘어나므로 단류식보다 10% 정도 더 비싸다. 그러나 수차의 발전 수두가 낮아지면 최대 출력이 낮아지고, 매조석당 두 번 발전하므로 계통인입이 쉬운 이점도 있다. 복류식 발전의 약점은 조지 수위가 낮아지므로 조지내 위치하는 항구에 수심유지 문제가 생길 수 있다.

결과적으로 낙조발전이 운전에서 가장 간단하고 경제적인 발전방식이고, 수차구조도 간단하여 유지비도 적게 든다. 낙조 양수 발전은 선박 항해에 이점을 주지만 순 에너지가 증가되는 조석의 수는 제한된다. 복류식 발전단가는 더 비싸지만 하루 네 번 발전하여 계통 인입이 더 쉬워 두 번 발전하는 단류식보다 유리한 점도 있다.

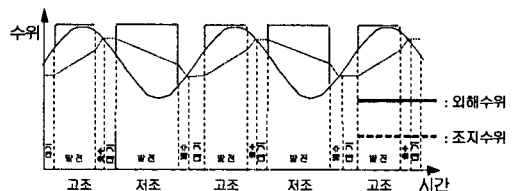


그림 5. 복류식 발전주기
Fig. 5. Double effect generation period

3. 조력발전의 계통접속에 따른 발전량 계산

3.1 시화조력 접속에 따른 발전계획

3.1.1 조석예보시스템

조석은 준주기적 운동으로 선형성과 비선형성이 혼합되어 있지만 선형의 합으로 표현 가능하기 때문에 예측이 가능하다. 즉 조석과 같은 운동은 수없이 많은 조화파(cosine wave)의 합으로 표현할 수 있다. 이러한 조화파들의 진폭과 위상을 알면 합성하여 원

시외조력발전 계통연계에 따른 시간대별 발전량 산정

래의 조석운동을 재현할 수 있고, 조석이 잘 변하지 않는다는 점을 이용하여 예측도 가능하다. 그림 6은 안산 탄도 관측소에서 측정한 실시간 조위 및 예측 조위를 나타낸 것이다. 단 가늘게 나타낸 예측 조위선은 기존의 과거 실측자료를 바탕으로 조석조화분해를 통해 산출된 예보자료로 그래프를 그린 것이며, 가늘게 나타낸 실선에 중복 표기된 실선은 준실시간 모드로 각 관측소에서 CDMA 방식으로 1분 간격의 관측한 자료를 10분마다 모아서 DATA 전송 방식으로 국립해양조사원 서버로 전송하는 방식이다.

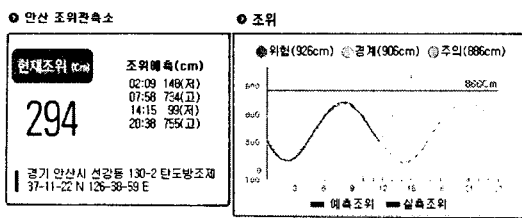


그림 6. 안산 탄도 실시간 조위 및 예측 조위
Fig. 6. Real time and forecasting sea level of Tando at Ansan

3.1.2 시화호 해측 및 내측 수위예측

본 논문에서는 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 계산하기 위하여 시화방조제의 수위를 예측하였다. 시화호 해측 수위는 시화조력발전소와 가장 근접한 위치에 있는 안산 탄도의 조위관측소의 과거 실측자료를 바탕으로 조석·조화 분해를 통해 산출된 값을 이용하였다.

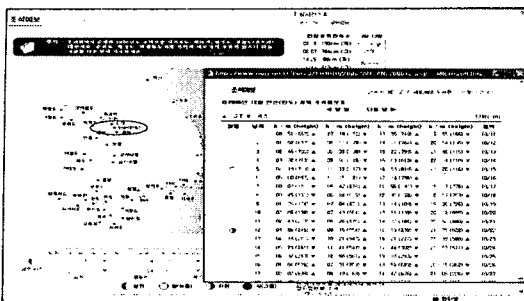


그림 7. 안산 탄도 조석예보 시스템
Fig. 7. Tide forecasting system of Tando at Ansan

그림 7과 같이 제공되는 조석에 따른 일별 고조(high water)와 저조(low water)의 예측자료에 대하여 보간법(interpolation)을 이용하여 1분 단위의 시화호 해측의 수위를 예측하였다. 시화호 내측의 수위는 내측의 수위를 이용한 장기수면 관측 자료이거나 장기 관측하여 얻은 해수면자료를 조석·조화 분해하여 나온 조화상수를 이용하여 예측할 수 있다. 시화호의 경우 관리수위를 EL -1.0[m]로 유지하고 있어 밀물시 이 수위를 넘지 않는 범위 내에서 시화호의 수위를 관리하고 있다.

3.1.3 보간법(interpolation)

내삽법(內插法)이라고도 하며 실변수 x 의 함수 $f(x)$ 의 모양은 미지이나, 어떤 간격(등간격이나 부등간격이나 상관없다)을 가지는 2개 이상인 변수의 값 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 에 대한 함수값 $f(x_i)$ 가 알려져 있을 경우, 그 사이의 임의의 x 에 대한 함수값을 추정하는 것을 말한다. 실험이나 관측에 의하여 얻은 관측값으로부터 관측하지 않은 점에서의 값을 추정하는 경우나 로그표 등의 함수표에서 표에 없는 함수값을 구하는 등의 경우에 이용된다. 가장 간단한 방법으로서, 변수를 x 좌표, 그 변수에 대한 기지 함수값을 y 좌표로 하는 점들을 이어 곡선을 그어, 구하고자 하는 함수값을 구하는 방법이다[6].

또 함수의 전개를 이용하여 변수 x_0, x_1 의 근방에서 함수 $f(x)$ 를 근사적으로 나타내는 식 (1)을 나타내었다.

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (1)$$

식 (3.1)은 간단하게 나타낸 보간식인데 비례부분 또는 선형 보간이라고 한다. x_0, x_1 을 로그표나 삼각함수표에서와 같이 그 사이의 간격을 충분히 작게 해 놓았으므로 선형 보간이 이용된다. 더욱 엄밀한 계산을 하기 위해서는 뉴턴의 보간공식을 사용한다. 보간법에 대하여 x_1 과 x_n 의 바깥쪽에 있는 임의의 x 에 대한 $f(x)$ 의 근사값을 구하는 방법을 외삽법(外插法) 또는 보외법(補外法)이라 한다.

3.1.4 시화조력발전소의 수차 구성 및 발전 형식

프랑스의 랑스 조력발전소의 경우 runner의 직경은 5.35[m]이고 수위변동에 따른 정격속도 미세 조절을 위해서 4개의 가변익(movable blade)으로 제작되어 운영되고 있다.

시화조력의 시간의 변화에 따라 발전 도수로를 통과하는 물의 양이 바뀌어 수차의 속도도 변화되는데, bulb 수차의 특성상 guide vane(wicket gate)와 movable blade가 있어 이 날개들을 변화시켜 수차의 속도를 항상 정격속도를 유지하게 된다. 따라서 1시간 발전하게 되면 1기당 25,400[kWh]를 발전하게 되어 10기 모두 합이 254,000[kWh]가 된다. 또한 guide vane(wicket gate)은 16개로 구성되어 있으며 수차의 runner(movable blade)은 3개로 구성되어 있고 가변익의 직경은 7.5[m]이다.

시화조력발전소의 발전형식은 창조식으로 즉 밀물일 때만 발전을 하게 된다. 이때 해측과 내측의 수위의 차가 평균 2.7[m] 이상 차이가 발생되면 발전을 시작하고 차이가 감소되어 평균 1.3[m] 차이가 나면 발전을 중단하는 것으로 계획되어 있다. 이때 발전 및 정지 방법은 joint control 개념으로 10기가 동시에 발전되어 254,000[kW]가 계통에 접속 및 정지하며 정격에 도달하는 시간은 2~3분 정도 걸린다. 그래서 하루 두 번의 발전시간 동안 평균 약 8.9시간 발전하는 것으로 계획되어 있다. 발전형식을 창조식으로 한정하는 이유는 시화호 관리수위가 EL -1.0[m]이고 바다평균 간조위가 EL-2.81[m]이기 때문에 낙조(썰물)시 발전개시 낙차를 2[m] 이상 확보할 수가 없기 때문에 낙조식 발전은 불가능하며, 결국 창조식 발전과 낙조식 발전을 모두 할 수 있는 복류식 발전이 불가능하다.

3.1.5 시화조력 기동정지계획

사리(spring tide)와 조급(neap tide)시에는 평균 발전시간이 달라질 수밖에 없으며 평균 8.9시간 발전은 2009년 5월 1일부터 2010년 4월 30일까지 조위를 10분 단위로 구분 예측 계산된 결과 값이다. 그리고 조석주기는 약 12시간 25분 정도로서 1년 730조석중 발전기 가능한 조석은 700~705조석이며, 1년

기준으로 700조석 발전시 30조석은 15일에 해당되므로 연간 15일은 최소 조급시 발전할 수 없는 조건으로 해수만 유통시키게 된다.

발전 및 정지 방법은 joint control 개념으로 10기가 동시에 발전되고 정지하며 정격에 도달하는 시간은 2~3분 정도 걸린다.

3.1.6 시화조력의 시간대별 발전량

예측한 시화방조제의 해측과 내측의 수위를 이용하여 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 계산하였다. 그림 8의 첫 번째 파형은 국립해양조사원에서

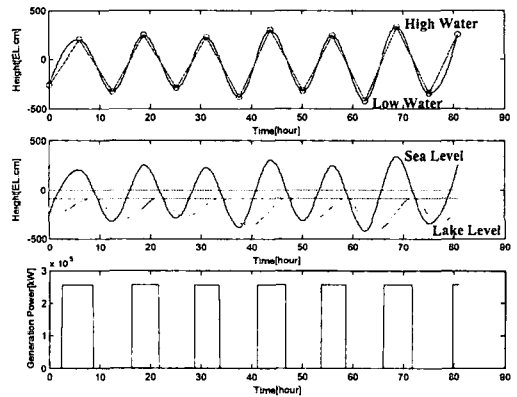


그림 8. 시화조력 시간대별 발전량(2006년 12월 1일~3일)
Fig. 8. Time varying generation with Sihwa tidal power plant(12/01/2006~12/03/2006)

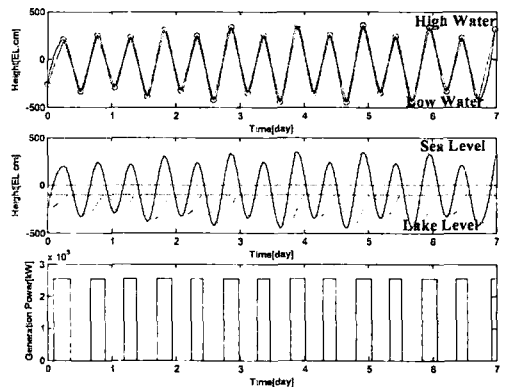


그림 9. 시화조력 시간대별 발전량(2006년 12월 1일~7일)
Fig. 9. Time varying generation with Sihwa tidal power plant(12/01/2006~12/07/2006)

시화조력발전 계통연계에 따른 시간대별 발전량 산정

제공되는 시화방조제의 대한 조석에 따른 고조(high water)와 저조(low water)의 해측 예측자료에 대하여 보간법(interpolation)을 이용하여 1분 단위의 시화호 해측의 수위를 예측하여 나타내었다. 첫 번째 파형에서 직선은 linear interpolation으로부터 계산된 파형이며 곡선은 cubic interpolation을 이용하여 계산된 파형이다. 그림 8의 두 번째 파형은 해측(Sea Level), 내측(Lake Level) 그리고 시화호 관리수위(EL -1.0[m])를 나타낸 것이다. 마지막으로 그림 8의 세 번째 파형은 해측과 내측의 수위를 이용하여 시화조력발전소의 2006년 11월 30일 약 18시부터 12월 5일 03시까지의 시간대별 발전량을 나타낸 것이다. 그림 9는 그림 8에서 시간대별 발전량의 기간을 확장한 것으로 2006년 11월 30일 약 18시부터 12월 7일 18시까지에 대하여 계산한 약 1주일간의 시화호의 해측(Sea Level), 내측(Lake Level), 시화호 관리수위(EL -1.0[m]) 및 시간대별 발전량을 나타낸 것이다. 이렇게 예측된 조위를 활용하여 발전계획을 1주일 단위로 작성하여 계통 운영회사에 사전 통보함으로써 계통 운영회사에서는 이러한 계획에 근거하여 계통 기동정지계획 등에 활용해야 할 것이다.

그림 10은 2006년 11월 30일 약 18시부터 12월 31일 20시까지에 대하여 계산한 시화호의 해측(Sea Level), 내측(Lake Level), 시화호 관리수위(EL -1.0[m]) 및 시간대별 발전량을 나타낸 것이다.

3.2 시화조력발전소 운영계획

3.2.1 시화조력 운영

프랑스의 랑스 조력발전소의 경우 1주일 단위로 예측된 조위를 활용 발전계획을 작성하여 계통 운영회사에 사전 통보하고 계획에 의거 발전하고 있다. 운전방식으로는 주간은 유인, 야간 및 휴일은 무인 운전중이며 주간근무 운전원이 발전기 가동상태 점검, 유지 및 보수업무를 총괄 지휘 감독하는 방식으로 운영 중이다.

따라서 시화조력의 경우도 프랑스 랑스의 조력발전소의 운영 방법과 유사하게 운전함으로써 발전계획 또는 기동정지계획에 중요한 역할을 하여야 한다.

3.2.2 시화조력발전소의 계통연계

시화조력발전 출력은 10.2[kV]/154[kV] 승압되어 지중선로 11.4[km]를 통해 남시화 변전소(60,000[kVA]×4뱅크)에 연결하여 시화공단에 전력을 공급한다. 시화조력발전소에서 발전되는 254,000[kW]는 지중송전선로를 통하여 남시화 변전소에 연결되어 시화공단지역(현재 최대부하 124,000[kW])에 전력을 공급하고 남은 전력은 다른 지역으로 공급하게 된다.

따라서 남시화 변전소는 시화조력이 발전가능한 시간대에는 그림 11의 실선과 같이 공급받게 되고

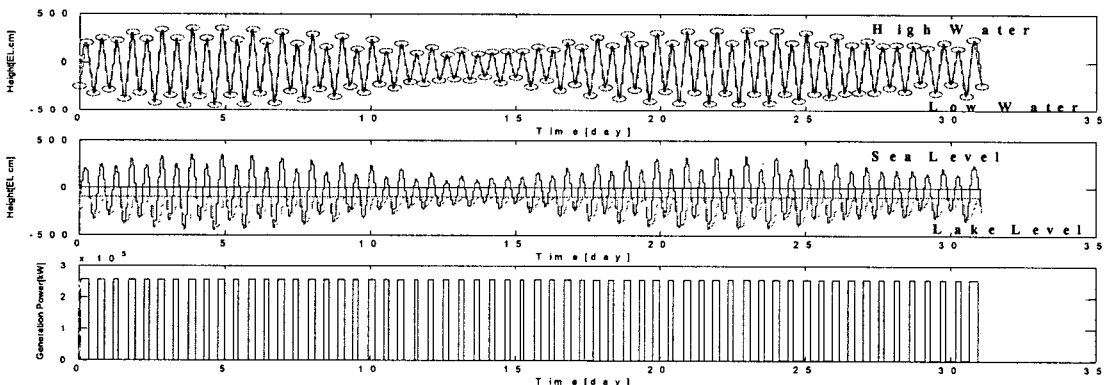


그림 10. 시화조력 시간대별 발전량(2006년 12월 1일~31일)

Fig. 10. Time varying generation with Sihwa tidal power plant(12/01/2006~12/31/2006)

시화조력이 발전을 하지 않는 시간대에는 그림 11의 점선과 같이 다른 송전선로(시화변전소와 서시화변전소)를 통하여 공급받는다.

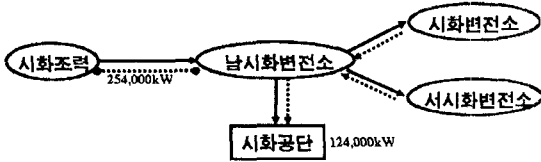


그림 11. 시화조력 계통연계 및 전력공급
Fig. 11. Integrating Sihwa Tidal Power into Power Systems

5. 결 론

본 논문에서는 현재 건설 중인 시화조력발전소의 발전가능한 시간대별 발전량을 산출함으로써 조력발전이 안정적이면서 경제적으로 전력을 공급할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 조력발전량을 산출함으로써 발전계획 수립 및 기동정지계획 등에 활용할 수 있다.

우리나라의 신재생 연차별 보급계획에 따르면 조력발전 보급용량은 2011년 이후에 총용량 825,000 [kW]의 설비가 보급될 전망이다. 세계 각국에서 조력발전에 대한 검토는 많이 이루어졌으나 실천에 옮기지 못하는 이유는 조력발전소를 건설하기 위해서는 방조제를 세워야 하는 문제가 발생된다. 따라서 우리나라의 경우 지속적으로 조력발전 및 조류발전을 계획하고 있다면 방조제가 설치되어 있는 지역을 우선적으로 선정하여 경제성과 효율성을 검토해야 할 것이다.

본 연구는 2005년 한국전력거래소 지원에 의하여 이루어졌으며 관계부처에 감사드립니다.

References

- (1) 한국해양연구원, "조력발전 기술 현황 분석", 1993.
- (2) 수자원교육원, "재생에너지 개발과정", 2005.
- (3) 한국해양연구원, "아산항 조력발전 타당성 검토", 1997.
- (4) 국립해양조사원 홈페이지 자료, "http://www.nori.go.kr".
- (5) 수자원공사, "시화호 조력발전 건설사업 타당성조사 및 기본계획 보고서", 2002.
- (6) William H. Press, "Numerical Recipes in C", Cambridge Univ. Press.

◇ 저자소개 ◇

김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 안산공과대학 전기과 부교수.

송경빈 (宋敬彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M전기공학과 졸업(박사). 1996년 한전전력연구원 선임연구원. 1998년 대구효성가톨릭대학교 전임강사. 2000년 계명대학교 전임강사. 2002년 송실대학교 전기제어시스템공학부 전임강사. 2004년~현재 송실대학교 전기제어시스템공학부 조교수.