

시화조력발전 연계에 의한 남시화 계통의 최적 운영 방안

(Optimal Operation by Integrating Sihwa Tidal Power into NamSihwa Systems)

김규호* · 송경빈**

(Kyu-Ho Kim · Kyung-Bin Song)

요 약

본 연구에서는 시화조력발전소의 계통 연계에 따른 남시화 계통의 최적 운영 방안을 제안하였다.

남시화 계통의 최적 운영을 위하여 1분 단위의 시화호 해측의 수위를 예측하였으며, 예측된 시화방조제의 해측과 내측의 수위를 이용하여 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 계산하였다. 특히, 남시화 계통에서 구입하는 전력은 시화조력의 계산된 시간대별 발전량을 이용하여 송전계통에서 전체 전력을 구입하는 방안, 조력발전이 가능한 시간대에 생산되는 모든 전력을 구입하는 방안 그리고 송전계통과 조력발전으로부터 전력구입 비용을 비교하여 구입하는 방안을 마련함으로써 부존자원이 부족한 우리나라에서 에너지 절약에 기여할 수 있는 최적의 운영 방안을 제시하였다.

Abstract

This paper presents an optimal operating scheme by integrating Sihwa tidal power into NamSihwa systems.

For optimal operation of NamSihwa systems, the sea levels of 1 minute interval using cubic interpolation based on the forecasted levels of high and low water are calculated. Especially, it is compared by three schemes to purchase total power from transmission system, to purchase total power from tidal power system in time period that can generate tidal power and to purchase total power by comparing purchase costs from transmission system and tidal power system. The scheme may contribute to energy save in Korea that natural resources are lacking.

Key Words : Sihwa Tidal Power, Power Generation Forecast, Interpolation, Optimal Operation

1. 서 론

현재 우리나라는 총 전력생산 중 신재생에너지 발전량이 차지하는 비율의 목표를 OECD 전망치를 감안하여 2011년까지 7.0[%]로 설정하여 보급할 계획에 있다[1]. 부존자원이 부족한 우리나라에 있어 풍력, 태양광, 연료전지 및 해양에너지 등과 같은 신재생에너지의 보급과 더불어 계통연계를 위한 영향 분

* 주저자 : 한경대학교 전기공학과 조교수
** 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 부교수
Tel : 02-820-0648, Fax : 02-817-7961

E-mail : kbsong@ssu.ac.kr
접수일자 : 2009년 4월 14일
1차심사 : 2009년 4월 27일, 2차심사 : 2009년 5월 15일
심사완료 : 2009년 5월 15일

석 및 운영 방안에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 해양에너지의 하나인 조력발전은 조류발전과 더불어 관심이 높아지고 있으며 2010년 시화방조제에 254,000[kW]의 조력발전소가 건설되어 상용 운전될 예정이다. 그러나 시화조력발전 계통연계에 따른 시간대별 발전량 산정에 관한 연구는 진행되었으나, 조력발전이 상용 운전이 되었을 경우에 대한 경제성적이며 합리적인 운영 방안에 관해서는 연구되지 않은 상태이다[3]. 조력발전 현황은 표 1에 나타내었듯이 캐나다, 중국, 프랑스, 구소련 등에서 건설해 운영하고 있으며, 우리나라를 비롯해 조력발전이 가능한 지역을 보유하고 있는 미국, 호주, 인도 등의 국가에서도 조사 및 건설 작업이 한창이다[4]. 이러한 조력발전소가 건설되어 계통연계시 계통영향 평가 및 운영 방안을 수립하는 것이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 부존자원이 부족한 우리나라에서 조력발전 연계에 의한 에너지 절약에 기여할 수 있는 최적의 운영 방안을 제시하였다.

표 1. 조력발전소 운영 및 개발계획 현황
Table 1. Tidal plant operation and development status

구분	국가명	위 치	평균낙차 (m)	조지면적 (km ²)	시설용량 (MW)
운영중	프랑스	랑 스	8.5	22	240
	캐나다	아나폴리스	7.0	11.5	20
	러시아	키스라야 구바	1.0~3.9	1.1	0.4
	중국	지양시아	5.08	1.37	3.2
개발 및 계획중	한국	시화지구	5.64	43.93	254
	러시아	펜진스크	6.2	20,530	87,400
	프랑스	코 텐 틴	8.0	4,750	50,000
	영국	세 번	8.3	480	8,600
	캐나다	코베퀴드	11.8	264	4,000
	미국	닉 - 암	8.4	1,600	1,400
	인도	캠 베이	6.8	1,972	7,400
	중국	류오유안완	5.2	160	500

2. 조력발전의 원리 및 종류

2.1 조력발전의 원리

조력발전의 원리는 수력발전소와 비슷한 원리이나 수력발전의 낙차가 수십[m]인 데 비해 조력발전은 낙차가 보통 10[m] 이하라는 점이 다르다. 또한, 밀물 때 수문을 열면 물이 쏟아져 들어오면서 터빈을 돌려 발전하게 되고, 썰물 때는 역방향 발전이 가능한 경우 물이 빠져 나가면서 터빈의 날개를 반대 방향으로 돌려 다시 발전하게 된다. 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 되어 조위가 일정한 시간대에서는 발전할 수 없기 때문에 조력 발전을 계통에 연계할 때는 전력수급에 세심한 고려를 해야 한다. 둘째, 조수의 미치는 범위에도 변화가 있다. 그림 1의 (a)에서 알 수 있듯이 사리(대조, spring tides)시에는 서로 끌어당기는 힘이 강해져서 바닷물도 높이 찻다가 밀려가기를 반복하기 때문에 조수의 힘도 가장 강해진다. 그러나 그림 1 (b)의 조금(소조, neap tides)시에는 끌어당기는 힘이 약해지고 조수의 힘도 약해진다. 즉 조수의 미치는 범위가 연중 주기적으로 변하기 때문에 이것을 고려하여 계통운영 및 기동정지계획을 하여야 한다[4-5].

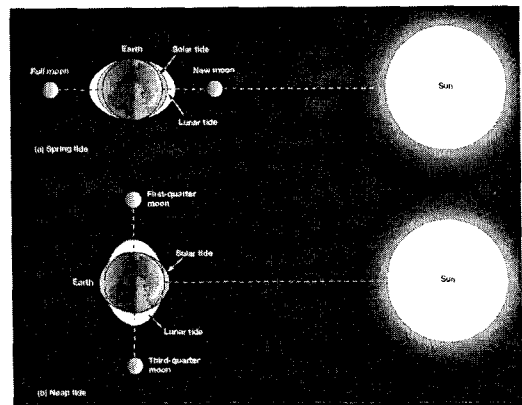
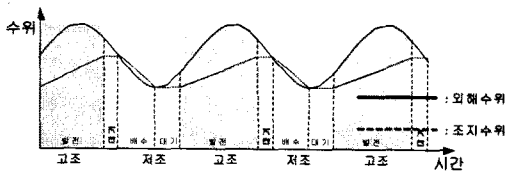


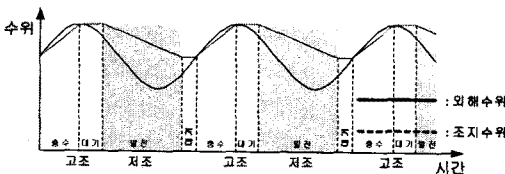
그림 1. 조석현상 및 해수면의 변화 원인
Fig. 1. Tide and variation of sea level

2.2 조력발전의 종류

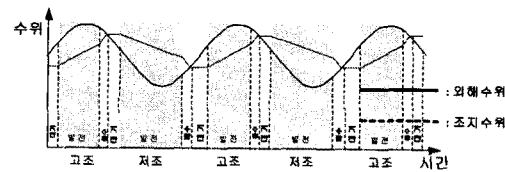
조력발전의 종류에는 발전은 낙조(썰물)류나 창조(밀물)류 중 하나의 흐름만 이용하여 발전하는 단류식(Single Effect) 발전과 낙조류와 창조류일 때 모두 발전하는 복류식(Double Effect) 발전방식이 있다. 그림 2의 (a)와 (b)는 조류의 방향이 외해에서 조지 방향으로 흐를 때에 발전하는 창조발전(Flood Generation)과 조지에서 외해 방향으로 발전하는 낙조발전(Ebb Generation)을 각각 나타낸 것으로, (a)는 외해수위가 조지수위 보다 높은 경우에만 발전을 하고 (b)는 반대의 경우이다. 그림 2의 (c)는 복류식 발전 주기를 나타낸 것으로 창조발전과 낙조 발전을 조합하면 발전량을 이론적으로 두 배로 늘릴 수 있다[6,7].



(a) 창조식 발전주기
(a) Flood generation period



(b) 낙조식 발전주기
(b) Ebb generation period



(c) 복류식 발전주기
(c) Double effect generation period

그림 2. 조력발전의 종류
Fig. 2. Type of Tidal Power

3. 시화조력발전소의 발전량 산정

3.1 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[8].

그림 3과 같이 국립해양조사원에서 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 자료가 있거나 장기 관측하여 얻은 해수면 자료를 조석·조화 분해하여 나온 조화상수를 이용하여 예측할 수 있다. 시화호의 경우 관리수위를 EL -1.0m로 유지하고 있어 밀물시 이 수위를 넘지 않는 범위 내에서 시화호의 수위를 관리하고 있다.

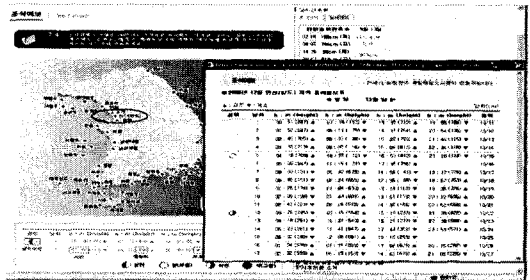


그림 3. 안산 탄도 조석예보 시스템
Fig. 3. Tide forecasting system of Tando

3.2 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 추정할 수 있다. 가장 간단한 방법으로는, 변수를 x 좌표, 그 변수에 대한 기저 함수값을 y 좌표로 하는 점들을

이러 곡선을 그어, 구하고자 하는 함수값을 구하는 방법이다[9]. 예를 들어 함수의 전개를 이용하여 변수 x_0, x_1 의 근방에서 함수 $f(x)$ 를 근사적으로 나타내는 식 (1)을 나타내었다. 두 개의 점이 주어졌을 경우, 두 점을 지나는 함수 $f(x)$ 를 직선의 방정식으로 구한다. $f(x) = a_0 + a_1x$ 를 직선의 방정식이라고 하면, 두 점($x_0, f(x_0)$), ($x_1, f(x_1)$)를 지나는 직선을 구할 수 있다.

$$f(x_0) = a_0 + a_1x_0 \quad (1)$$

$$f(x_1) = a_0 + a_1x_1$$

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

간격이 좁을수록 연속함수를 직선으로 근사시키는 것이 좋기 때문에 일반적으로 데이터 점들 사이의 간격이 작으면 작을수록 더욱 좋은 근사값을 얻을 수 있다.

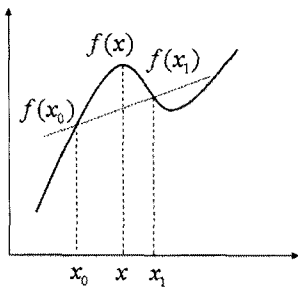


그림 4. 보간법
Fig. 4. Interpolation

식 (1)은 간단하게 나타낸 보간식인데 비례부분 또는 선형 보간이라고 한다. x_0, x_1 을 로그표나 삼각 함수표에서와 같이 그 사이의 간격을 충분히 작게 해 놓았으므로 선형 보간이 이용된다. 본 논문에서는 그림 3의 안산 탄도 조석예보 시스템으로부터 국립해양조사원에서 제공되는 고조와 저조의 예측자료를 식 (1) 및 그림 4 ($x_0, f(x_0)$), ($x_1, f(x_1)$)에 대입하여 ($x, f(x)$) 얻을 수 있다. 그러나 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(外挿法) 또는 보외법(補外法)이라 한다.

3.3 시화조력의 시간대별 발전량 계산 절차

그림 5는 시화조력 발전소의 발전량을 계산하기 위한 흐름도이다. 간략한 계산을 위하여 수차를 통과유량 계산시 수차의 유량특성은 고려하지 않았으며, 배수유량 계산시 신규 및 기존수문의 유량특성과 배수시 유량특성은 고려하지 않았다. 개략적인 발전량계산 방법은 썰물 때인 창조시에 시화호 해측과 내측의 수위를 비교하여 해측의 수위가 높고 수위차가 최적개시 수위차 이상 되면 발전을 시작하며, 창조시가 지나 내측의 수위가 운영수위 보다 낮고 수위차가 최소수위차 이상 되는 동안에는 지속적으로 발전을 한다.

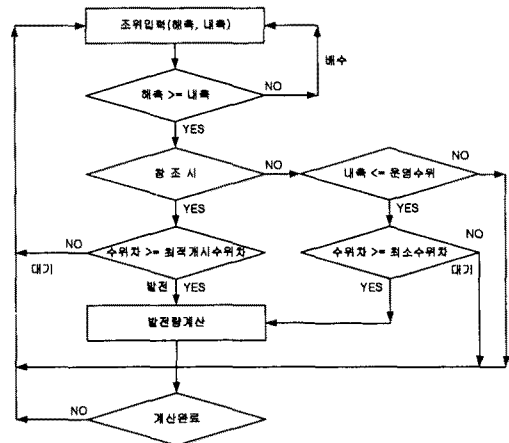


그림 5. 시화조력 발전량 계산을 위한 흐름도
Fig. 5. Flowchart for Generation in Sihwa Tidal Power

4. 남시화 계통의 운영비용 최소화

4.1 시화조력발전소의 계통연계 및 운영전략

시화조력발전소의 출력은 10.2[kV]/154[kV] 송압되어 지중선로 11.4[km]를 통해 남시화 변전소

시화조력발전 연계에 의한 남시화 계통의 최적 운영 방안

(60,000[kVA] x 4 배크)에 연결되어 254,000[kW]의 전력을 시화공단지역(최근 남시화 변전소 최대부하 174,000[kW])에 공급하고 남는 전력은 다른 지역으로 공급하는 것을 전제로 건설 중에 있다. 따라서 본 논문에서는 시화조력발전소를 아래와 같은 원칙에 의하여 운영하여 전력을 공급하는 측과 전력을 공급 받은 측 모두에 이득이 될 수 있도록 운영한다.

첫째, 시화조력발전이 가능한 시간대에는 그림 6의 실선과 같이 남시화변전소를 통하여 시화공단에 공급하고 잉여전력은 다른 지역으로 공급한다. 또한 시화조력이 남시화변전소의 부하를 충족하지 못할 경우 부족전력을 점선과 같이 송전계통(시화변전소와 서시화변전소)에서 구입한다.

둘째, 시화조력발전이 가능하지 않는 시간대에는 점선과 같이 송전계통(시화변전소와 서시화변전소)을 통하여 공급받는다.

셋째, 남시화변전소에 연결된 시화공단에 전력을 공급하기 위해서 전력을 구입할 때 그 구입비용은 시간대별 부하의 변화에 의해 차이가 있다. 따라서 남시화변전소에 연계되어 있는 시화조력을 전력 공급원으로 이용할 때는 송전계통으로부터 전력구입비용과 비교하여 더 저렴한 전력원을 선택하여 운영함으로써 운영비용을 최소화 한다.

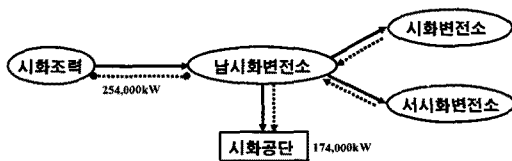


그림 6. 시화조력 계통연계 및 전력공급
Fig. 6. Integrating Sihwa Tidal Power into Power Systems

4.2 계통 운영비용

남시화 계통의 운영비용은 시화조력으로부터 전력구입비용과 송전계통으로부터 전력구입비용으로 구분되며 다음의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 송전계통에서 전력구입비용 C_{kepBuy} 는 시간에 따른 단위 전력당 구입비용 $K_{kep,i}$ 와 시화조력에서 단위 전력당 구입비용 K_{Tidal} 을 서로 비교하여 더 저렴한 비용을

선택하여 운영함으로써 운영비용을 줄일 수 있다. 송전계통에서 전력구입비용 C_{kepBuy} 는 식 (3)에 의해 구할 수 있으며 시화조력에서 전력구입비용은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. α 는 시화조력의 운전가능 여부를 나타낸다. 송전계통에서 전력구입비용과 시화조력에서 전력구입비용을 비교해 시화조력으로 부터 전력을 구입할 때는 β 가 1이고 전력을 구입하지 않을 때는 0이다.

$$C_{TotalBuy} = C_{kepBuy} + C_{TidalBuy} \quad (2)$$

$$C_{kepBuy} = \sum_{i=1}^n K_{kep,i} \text{Max}[0, P_{Load,i} - \alpha_i \beta_i P_{Tidal}] \quad (3)$$

$$C_{TidalBuy} = K_{Tidal} \sum_{i=1}^n \text{Min}[P_{Load,i}, \alpha_i \beta_i P_{Tidal}] \quad (4)$$

여기서,

C_{Total} : 총 운영비용의 합

C_{kepBuy} : 송전계통에서 전력 구입비용

$C_{TidalBuy}$: 조력발전에서 전력 구입비용

i : 1, 2, ..., n

n : 전체시간

$K_{kep,i}$: 시간 i 일 때 송전계통에서 단위전력당 구입비용

K_{Tidal} : 단위전력당 조력발전에서 구입비용

$P_{Load,i}$: 시간 i 일 때 계통 부하

P_{Tidal} : 조력발전에서 공급받는 전력

$\alpha = \begin{cases} 1: Tidal\ On \\ 0: Tidal\ Off \end{cases}$: 조력발전 운전가능 여부

$\beta = \begin{cases} 1: K_{kep,i} > K_{Tidal} \\ 0: K_{kep,i} \leq K_{Tidal} \end{cases}$: 전력구입비용 비교에 의한

조력발전 구매여부

5. 사례연구

5.1 시간대별 발전량 산정

다음의 그림 7은 예측한 시화방조제의 해측과 내측의 수위를 이용하여 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 1일, 3일 및 1주일 기간으로 계산하여 (a), (b) 및 (c)에 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 첫 번째 파형은 국립해양조사원에서 제공되는 시화방조제

에 대한 조석에 따른 고조(high water)와 저조(low water)의 시화호 해측(Sea Level) 예측자료에 대하여 고조가 발생하는 시간과 저조가 발생하는 시간 사이의 파형을 보간법을 이용하여 계산한 파형이다. 두 번째 파형은 시화호의 해측(Sea Level), 내측(Lake Level) 그리고 시화호 관리수위(EL -1.0m)를 나타낸 것이며, 세 번째 파형은 각각의 기간에 대하여 시화조력발전소의 시간대별 발전량을 나타내었다[3].

이렇게 예측된 조위를 활용하여 발전계획을 1주일 단위로 작성하여 계통 운영회사에 사전 통보함으로써 계통 운영회사에서는 이러한 계획에 근거하여 계통 운영 및 기동정지계획 등에 활용할 수 있다.

5.2 남시화 계통의 운영비용 계산

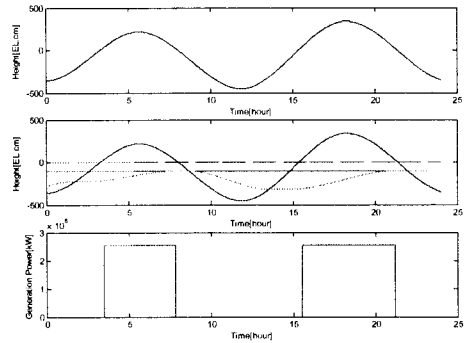
남시화 계통에 대한 최적의 운영을 위하여 1일, 3일 그리고 7일의 기간에 대하여 Case 별로 전력구입 비용을 계산하였다.

Case 1 : 송전계통에서 전체 전력구입(기저 : 40원/[kW], 중간 : 75원/[kW], 첨두 : 90원/[kW])

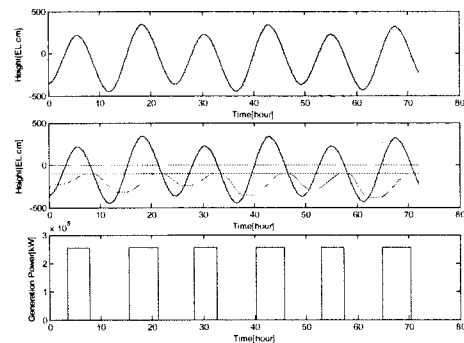
Case 2 : 조력발전이 가능한 시간대에 생산되는 모든 조력발전 전력구입(70원/[kW])

Case 3 : 송전계통에서 전력구입 비용과 조력발전의 전력구입 비용을 비교하여 전력구입 결정

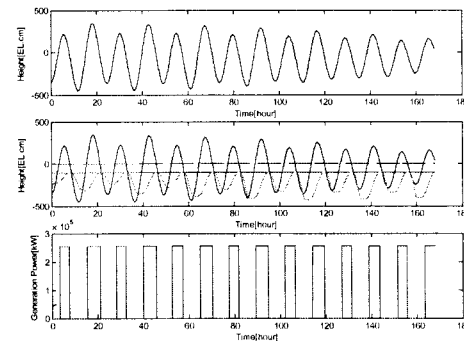
표 2는 각각의 경우에 대한 전력구입비용을 계산한 것으로 1일에 대한 Case 1의 송전계통에서 전체 전력을 구입비용은 225,592.5원인데, Case 2의 조력발전이 가능한 시간대에는 전량 조력발전으로부터 구매할 때 전력 구입비용은 217,905.5원으로 7,687원의 이득이 발생하였다. 이것은 Case 2에서는 중간부하 시간대와 첨두부하 시간대에 상대적으로 저렴한 조력발전의 전력을 구매할 수 있었기 때문이다. 또한, Case 3의 전력구입 비용을 비교하여 전력을 구입할 때 비용은 212,847.5원으로 Case 1보다 하루 12,745원의 이득이 발생하였고 Case 2의 7,687원의 이득 보다 더 이득임을 알 수 있다. 이것은 송전계통에서 전력구입 비용과 조력발전의 전력구입 비용을 비교하여 저렴한 쪽의 전력을 구입하였기 때문이다.



(a) 1일(2007년 1월 5일)
(a) 1 day(05/01/2007)



(b) 3일(2007년 1월 5일 - 7일)
(b) 3 days(05/01/2007 - 07/01/2007)



(c) 7일(2007년 1월 5일 - 11일)
(c) 7 days(05/01/2007 - 11/01/2007)

그림 7. 시화조력 시간대별 발전량
Fig. 7. Time varying generation with Sihwa tidal power

기간을 3일로 하였을 때 Case 2의 조력발전이 가능한 시간대에는 전량 조력발전으로부터 구매할 때 전력 구입비용이 482,785원으로 Case 1 보다 많은

시화조력발전 연계에 의한 남시화 계통의 최적 운영 방안

23,639원의 추가 비용이 발생하였다. 이것은 남시화 계통이 기저부하일 때 조력발전 운전이 가능한 시간이 되어 기저부하시의 발전비용 보다 상대적으로 비싼 조력발전 전력을 구입하였기 때문이다. Case 3은 442,861원으로 Case 1 보다 16,285원이 이득이었다.

마지막으로 기간을 7일로 하였을 때의 경우는 기간을 1일로 하였을 때와 마찬가지로 Case 2는 Case 1 보다 26,322.5원이 이득이고 Case 3은 77,142.5원이 이득이 되었음을 알 수 있다.

표 2. 남시화 계통 전력구입비용(단위 : 원)
Table 2. Power Buying Costs of NamSihwa systems(Unit : Won)

전력구입처		기 간		
		1일	3일	7일
Case 1	송전계통	225,592.5	459,146.0	1,336,791.0
	시화조력	-	-	-
Case 2	송전계통	141,346.5	302,612.0	826,481.5
	시화조력	76,559.0	180,173.0	483,987.0
	전체비용	217,905.5	482,785.0	1,310,468.5
	이 득	7,687.0	-23,639.0	26,322.5
Case 3	송전계통	148,090.5	355,844.0	894,241.5
	시화조력	64,757.0	87,017.0	365,407.0
	전체비용	212,847.5	442,861.0	1,259,648.5
	이 득	12,745.0	16,285.0	77,142.5

따라서 본 논문에서는 전력을 공급하는 측과 전력을 공급받는 측 모두에 이득이 될 수 있도록 운영함으로써 부존자원이 부족한 우리나라에서 조력발전 연계에 의한 에너지 절약에 기여할 수 있는 최적의 운영 방안을 수립할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 시화조력발전소의 계통연계에 따른 시간대별로 송전계통의 발전단가와 조력발전 단가를 비교하여 전력구입 비용을 최소화하는 방안을 제시하였다.

조력발전이 가능한 시간대에 생산되는 모든 전력을 구입하는 경우 보다 송전계통으로부터 전력을 구입하는 비용과 조력발전으로부터 전력을 구입하는 비용을 비교하여 전력구입을 결정하여 전력을 공급하는 측과 전력을 공급받은 측 모두에 이득이 될 수

있도록 운영함으로써 부존자원이 부족한 우리나라에서 조력발전 연계에 의한 에너지 절약에 기여할 수 있는 최적의 운영 방안을 수립할 수 있을 것이다.

따라서 제시한 시화조력의 최적 운영 방안은 향후 우리나라의 전력시장이 도매경쟁시장이 활성화 되든지 또는 시화조력발전이 구역전기사업자로 전환될 경우 매우 유용하게 응용될 수 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

References

- (1) 산업자원부, "제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2003~2012)", 2003년 12월.
- (2) 한국전력거래소, "신재생에너지 전원 접속에 따른 계통 영향 분석 및 운영방안 연구", 최종보고서, 2006년 10월.
- (3) 김규호, 송경빈, "시화조력발전 계통연계에 따른 시간대별 발전량 산정", 조명전기설비학회 논문지, 제21권 1호, pp.157-163, 2007년 1월.
- (4) 한국해양연구원, "조력발전 기술 현황 분석", 1993.
- (5) 수자원교육원, "재생에너지 개발과정", 2005.
- (6) 수자원공사, "시화호 조력발전 건설사업 타당성조사 및 기본계획 보고서", 2002.
- (7) 한국해양연구원, "아산항 조력발전 타당성 검토", 1997.
- (8) 국립해양조사원 홈페이지 자료, "http://www.nori.go.kr".
- (9) 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). 1996년 3월 안산공과대학 전기과 교수. 2008년 9월~현재 한경대학교 전기공학과 조교수.

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 숭실대학교 전기제어시스템공학부 전임강사. 2004년 숭실대학교 전기제어시스템공학부 부교수. 2008년~현재 숭실대학교 전기제어시스템공학부 부교수.