

양수발전기의 신 효용성 평가 지수 개발

Development of New Effectiveness Assessment Indices of Pumped Storage Power Plant

이 성 훈* · 최 재 석[†] · 차 준 민** · 김 남 명***
(Sung-Hun Lee · Jae-Seok Choi · Jun-Min Cha · Daniel Kim)

Abstract - The pumped storage power plants have excellent load following characteristics. It can also be committed quickly for synchronous reserve when it is in the generating mode because it can readily increase its generating power and, consequently, increases the overall system reliability. There are strong incentives for standing the system reliability. Additionally, CO₂ emission can be typically impacted due to operation of pumped generators. The increase or decrease of CO₂ depends on the generation mix. This paper proposes evaluation of reliability, economy and environment of power system considering pumped generator. This paper describes three case studies of the reliability and economy and environment according to capacity factor and storage capacity of pumped generators. The probabilistic production simulation model is used in this paper. The practicality and effectiveness of the proposed approach are demonstrated by simulation studies for a real size power system model on the 5th power plan in Korea.

Key Words : Pumped storage power plant(PSPP), New effectiveness assessment algorithm, Energy storage system(ESS), Performance index(PI)

1. 서 론

양수발전원(PSPP: Pumped Storage Power Plant)의 경우 단기정전발생을 사전에 방지할 수 있는 부하추종능력이 탁월하여 전력 계통의 운영신뢰도에 기여하는 바가 크다.[2,5] 하지만 전력산업 구조개편 이후 양수발전소는 일반 화력발전소와 동일한 관점에서 전력시장에서 수익성에 의존하여 평가되고 있으며 왜곡된 심야전력요금제도로 심야시의 부하의 예상치 못한 급격한 증가로 양수발전원의 설비이용률이 급격히 낮아짐에 따라 양수발전소의 진정한 가치가 저평가 되어왔다. 그러나 우리의 관심에서 다소 멀어졌던 양수발전원의 중요성이 2011년 9.15 순환정전사태 이후 비상 발전원으로써 양수발전소 역할이 더욱 부각되고 있으며, 신재생에너지와 기저부하 증가 그리고 에너지저장시스템 기술개발에 따른 양수발전의 새로운 가치 평가 및 증장기 경쟁력 제고 방안에 대한 검토 필요성이 증대하고 있는 실정이다[1].

양수발전은 일반 수력발전과 달리 발전소의 상부와 하부에 저수지를 만들고 전력수요가 적은 시간동안 하부저수지의 물을 상부저수지로 양수하여 양수와 발전을 반복하여 전력을 생산하는 발전소이다. 세계최초 양수발전원은 1890년대에 이태리, 스위스에서 건설되어 운용되었으며 당초 효율

이 기술적인 한계로 70%였으나 점차 증가하여 현재 75%를 능가하고 있으며 1999년에 세계최초 30MW급의 해수양수발전원이 건설되었다.

특히, 최근 양수발전원은 자유경쟁전력시장체제하에서 전 세계적으로 발생하고 있는 전원개발에 대한 투자의 미흡에서 빚어진 전력수급운용의 어려움 그리고 스마트그리드로의 진화에 따른 신재생에너지발전원의 계통에서 투입 증가로 인한 계통운영상 주파수조정역등 전력계통의 운영신뢰도 증진 측면에서 매우 중요한 임무를 부여받고 있다. 이는 심야시에 발생하는 과잉전력공급을 흡수하여 양수한 후에 첨두부하시에 이를 낙차 하여 전력을 발생함으로써 경제성을 꾀하고자하는 양수발전원의 당초의 임무에서 많이 벗어나 전력계통에서는 운영신뢰도측면에서 필수적인 전원의 한자리로 자리매김을 하고 있다[4].

본 논문은 양수발전의 역할 증대와 비상 발전원으로서의 기능 강화에 따른 양수발전의 새로운 효용가치를 분석하고, 양수발전의 전력계통 및 경제·사회적 기여도를 객관적으로 검증하는 양수발전의 신효용성 평가 알고리즘을 개발함에 있다.

2. 양수발전원의 신효용성

2.1 신효용성의 정의

전술한바와 같이 최근 양수발전원은 자유경쟁 전력시장체제하에서 전 세계적으로 발생하고 있는 전원개발에 대한 투자의 미흡에서 빚어진 전력수급운용의 어려움 그리고 스마트그리드로의 진화에 따른 신재생에너지발전원의 계통에서의 증가로 인한 계통운영상에서 주파수조정역할, 전력계통의

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University, Korea

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University, Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Daejin University, Korea

*** Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD

Received : March 27, 2014; Accepted : June 25, 2014

운용신뢰도 증진측면에서 매우 중요한 임무를 부여받고 있다. 이는 심야시에 발생하는 과잉전력공급을 흡수하여 양수한 후에 첨두부하시에 이를 낙차 하여 전력을 발생함으로써 에너지의 효율적 활용을 도모하고자 하는 양수발전원의 당초의 임무에서 많이 벗어나 전력계통에서는 운용신뢰도측면에서 필수적인 전원의 한자리로 자리매김을 새롭게 하고 있는 것이다. 이를 정리하면 아래와 같다.

- 비상전원으로써의 역할강화.
- 신재생에너지원 증대로 인한 계통의 불확실성.
- 전력산업 전력계통 운용에서 양수발전 임무의 다양화.
- 국·내외적으로 급격한 문화변화(정보화산업 발달, 생활패턴의 다양화 등)에 따른 전력소비형태의 변화.

본 연구에서는 당초의 임무뿐만 아니라 이러한 새로운 전력 산업 환경 하에서 주어진 임무를 양수발전원의 신 효용성이라고 정의하기로 한다.

2.2 신호용성의 평가 방안

본 연구에서는 양수발전원이 전력계통에 미치는 항목별 영향도(기여도)의 정도를 성능지수로 나타내기로 하였으며 표 1은 궁극적으로 개발이 필요할 것으로 사료되는 양수발전원의 성능지수 및 평가 프로그램을 나타낸다[6,8].

표 1 양수발전(PSPP)의 성능지수 및 프로그램
Table 1 Performance index and Program of PSPP

Physical & Economic PI -> Time line PI	신뢰도측면 성능지수:PI _R	경제성측면 성능지수: PI _E	프로그램
장기전원개발 계획속에서의 양수발전원의 성능지수	부하 및 계통의 불확실성을 고려한 BGM에 바탕을 둔 PI _{RL}	경제성인자의 불확실성을 고려한 BGM에 바탕을 둔 PI _{EL}	프로그램: PG-BGM
중기발전계획 속에서의 양수발전원의 성능지수	GMS을 고려한 연간 발전모의속에서의 PI _{RM}	GMS을 고려한 연간 발전모의속에서의 PI _{EM}	프로그램: PG-GMS or PRASim
단기발전계획 속에서의 양수발전원의 성능지수	UC를 고려한 주간 및 일간 발전계획으로부터의 PI _{RS}	UC를 고려한 주간 및 일간 발전계획으로부터의 PI _{ES}	프로그램: PG-OGS
순시운영속에서의 양수발전원의 성능지수	PI _{RR}	PI _{ER}	-
종합 성능지수	PG_TPI _R	PG_TPI _E	

3. 신호용성 평가지수 정식화

본 연구에서는 양수발전원의 독립변수(용량 및 설비 이용률 등)의 변화량이 종속변수항목(신뢰도, 경제성 및 환경성 등)별로 “얼마나 기여변화량을 가져 오는가”로 정의하기로

하였다. 즉, 양수발전원이 우리가 평가하고자 하는 평가함수의 순간변화율의 정도를 그 성능지수로 삼기로 하였다.

나아가 본 성능지수는 물리량이 신뢰도는 정전시간의 기대치 혹은 정전 에너지 등의 물리량으로 표현되며, 경제성은 [원]등의 화폐단위로 나타나는 바 이를 상호 결합하기는 불가능하다. 따라서 이를 단위법[pu]의 형식과 변화량의 형식을 이용하여 성능지수를 구성하였다. 아래의 그래프는 이를 보인 것이다. 이를 정식화하면 아래 식(1)과 같다.

한편, 전술한 LOLE 및 EENS와 같은 신뢰도지수, CO₂ 배출량인 환경성지수 그리고 총발전비용과 같은 경제성지수 등은 그 물리량이 각각 작을수록 신뢰도가 높고, 환경성이 좋으며 경제성이 양호하다[3]. 따라서 식(1)과 같이 정의한 성능지수에 마이너스를 취하고 역수로 함이 그 지수가 높을수록 성능이 좋다고 할 수 있는 당초의 성능지수라는 정의에 합당할 것이다. 그러나 편의상 본 연구에서는 식(1)의 분모에 마이너스를 붙이도록 하여 일단 양수(+)값을 취하도록 하였다.

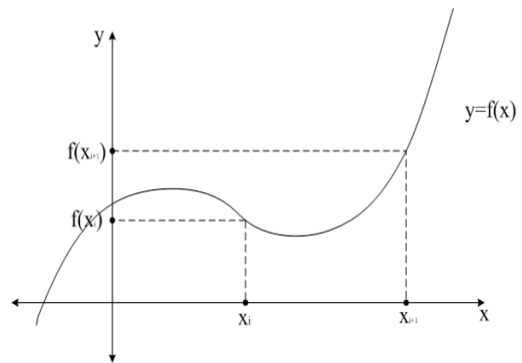


그림 1 성능지수 도출 그래프

Fig. 1 Performance Index Inducement graph

$$PI = \frac{(f(x_i) - f(x_{i+1})) / f(x_i)}{(x_{i+1} - x_i) / x_i} \tag{1}$$

단, $i = 1 \sim N-1$

N : 변화율(성능지수) 평가를 하기위한 구간의 수

3.1 신뢰도 측면에서의 신호용성 성능지수

식 (1)을 사용하여 본 연구에서는 신뢰도 측면에서의 신호용성 성능지수를 LOLE 와 EENS의 두 개의 신뢰도지수에 대하여 양수발전원의 총용량변화 및 양수발전원의 설비 이용율의 변화에 따른 가치성을 평가하는 것으로 하였다. 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$CAP_PI_{RLOLE} = \frac{(LOLE_i - LOLE_{i+1}) / LOLE_i}{(CAP_{i+1} - CAP_i) / CAP_i} \tag{2}$$

$$CAP_PI_{REENS} = \frac{(EENS_i - EENS_{i+1}) / EENS_i}{(CAP_{i+1} - CAP_i) / CAP_i} \tag{3}$$

$$CF PI_{ROLE} = \frac{(LOLE_i - LOLE_{i+1}) / LOLE_i}{(CF_{i+1} - CF_i) / CF_i} \quad (4)$$

$$CF PI_{RENS} = \frac{(EENS_i - EENS_{i+1}) / EENS_i}{(CF_{i+1} - CF_i) / CF_i} \quad (5)$$

여기서

CAP_i : #i 번째 구간의 양수발전기의 용량 [MW]

CF_i : #i 번째 구간의 양수발전기의 설비이용률 [%]

3.2 경제성 측면에서의 신호용성 성능지수

나아가 식 (1)을 사용하여 본 연구에서는 경제성 측면에서의 신호용성 성능지수를 확률론적인 총 발전비용에 대하여 양수발전원의 총용량변화 및 양수발전원의 설비이용율의 변화에 따른 가치성을 평가하는 것으로 하였다. 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$CAP PI_{ETPC} = \frac{(TPC_i - TPC_{i+1}) / TPC_i}{(CAP_{i+1} - CAP_i) / CAP_i} \quad (6)$$

$$CF PI_{ETPC} = \frac{(TPC_i - TPC_{i+1}) / TPC_i}{(CF_{i+1} - CF_i) / CF_i} \quad (7)$$

여기서

TPC_i : #i 번째 구간의 총 발전비용[Won]

3.3 환경성 측면에서의 신호용성 성능지수

한편, 식 (1)을 사용하여 본 연구에서는 환경성 측면에서의 신호용성 성능지수를 총 CO₂발생량에 대하여 양수발전원의 총용량변화 및 양수발전원의 설비이용율의 변화에 따른 가치성을 평가하는 것으로 하였다. 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$CAP PI_{ECO_2} = \frac{(CO2_i - CO2_{i+1}) / CO2_i}{(CAP_{i+1} - CAP_i) / CAP_i} \quad (8)$$

$$CF PI_{ECO_2} = \frac{(CO2_i - CO2_{i+1}) / CO2_i}{(CF_{i+1} - CF_i) / CF_i} \quad (9)$$

여기서

CO_{2i} : #i 번째 구간의 총 CO₂발생량[Ton/yr]

4. 신호용성 평가 지수산정 흐름도

본 연구에서 제안하는 양수발전원의 신호용성을 분석하기 위한 흐름을 보면 아래와 같다. 여기서 제안하는 방안은 시물레이션(모의) 방법이다. 따라서 각 모의를 수행할 수 있는 툴이 필수조건이다. 그러나 이들 모두를 고려한 양수발전원의 가치평가 툴의 개발은 매우 어렵고 현실적으로 개발시간이 꽤 소요되는 문제이다. 따라서 여기서는 연간 발전시물레이션에 초점을 맞추고 그림 2에서 단지 자체적으로 개발한 연간 확률론적인 발전모형인 PRASim이라는 툴을 이용하여 감도해석을 통하여 전술한 제안하는 성능지수를 단위량 변화에 따른 평가함수의 변화량을 분석함으로써 그 성능지

수를 얻기로 하였다. 차후에 발전기보수유지계획(GMS: Generators Maintenance Scheduling) 및 발전기 기동정지계획(UC:Unit Commitment) 그리고 실시간 분석툴을 개발하여 종합적인 양수발전원의 가치평가시스템의 개발이 필요하다.

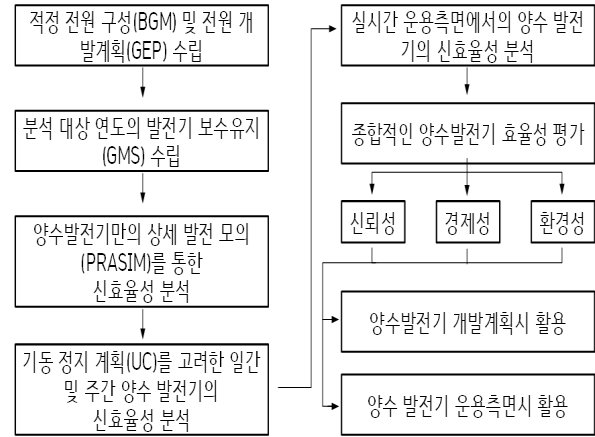


그림 2 본 연구가 추구하는 궁극적인 양수발전원의 신호용성 평가 지수산정 알고리즘

Fig. 2 New Effectiveness Assessment Indices Algorithm Proposed Eventually in This Study

5. 사례 연구

본 연구에서 궁극적으로 제안하는 알고리즘 중에서 이번에는 본 연구실에서 자체적으로 개발한 연간 발전시물레이션 프로그램인 PRASim을 사용하여 우리나라 2012년도를 대상으로 제5차 전력수급계획을 이용하여 사례연구를 실시하여 보았다.

5.1 2012년도 부하곡선패턴을 이용한 성능지수

본 연구에서는 2012년도 부하를 대상으로 하여 1년 동안의 신뢰도 지수와 경제적 지수의 평가를 실시하였다. 주어진 2012년도의 부하곡선패턴은 그림 3과 같다. 표 2는 본 사례연구에서 사용한 발전기 유형에 따른 CO₂배출계수(ξ)의 범위를 참고로 보인 것이다.

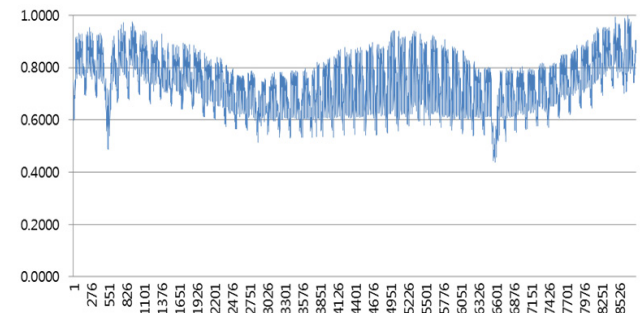


그림 3 2012년도 시간별 최대 부하 변동 곡선

Fig. 3 Load Variation Curve in 2012

표 2 발전기 유형에 따른 CO₂배출계수(ξ)의 범위

Table 2 Range of CO₂ Emission Factor

원자력	ξ의 범위[Ton/MWh]
원자력	0
석탄	0.80~1.05
LNG	0.59~0.76
석유	0.36~0.49

5.1.1 양수발전원의 설비용량 변화에 대한 분석

양수발전원의 설비용량변화에 따른 기여도(지수)의 변동을 보이면 표 3과 같다. 얻어진 기여도(지수)를 식 (2)~(9)에 대입하여 계산한 성능지수의 변동을 나타내면 표 4와 같다. 그림 4 및 그림 5는 표 3 및 표 4에서의 그 특성을 파악하기 쉽도록 그림(그래프)으로 보인 것이다. 참고로 표 3 및 표 4에서의 i*는 식 (2)~(9)에서 전술한 바와 같이 물리량을 갖는 기여도(지수)를 본 연구에서 제안하는 성능지수(가치성 지수)로 변환하기 위한 그림 1에서의 평균변화율의 구간을 의미한다. 가령, i=1은 양수발전원의 설비용량 4,700MW ~4,900MW의 구간을 표시한다.

표 3 및 표 4에서 굵게 표시한 값은 본 연구에서 설정한 양수발전기의 용량변화량 범위 내에서 본 연구에서 모의물로 이용한 PRASim을 통하여 얻어진 기여도 지수 및 그리고 그 기여도에서 계산한 성능지수가 최적값이라고 판단되는 값을 파악하기 쉽도록 각각 나타낸 것이다. 역시 그림 4에서 굵게 타원으로 표시한 부분은 기여도(지수) 값이 포화내지 최적에 도달하였다고 판단되는 범위를 파악하기 쉽도록 표시를 하여본 것이다. 가령, 그림 4에서 LOLE 및 EENS는 양수발전원의 설비용량이 증가함에 따라 좋아지다가 6,700MW(구간 i=11)에서부터 포화된다고 볼 수 있으며 TPC는 6,500~7,700MW(구간 i=10~15)의 범위에서는 기여도가 큰 변화를 보이지 않는 특성을 가지면서 최적범위로 볼 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 편의상 표 4의 CAPPIROLE, CAPPIREENS, CAPPICEO2, 및 CAPPITPC를 그림 5에서 PI-LOLE, PI-EENS, PI-CO2, 및 PI-TPC로 나타내었다. 양수발전원 설비용량 변화에 따른 성능지수 변동을 표시한 표 4 및 그 그래프인 그림 5에서도 이러한 성능지수면에서의 최적범위를 나타내는 특성을 볼 수 있다. 참고로, 성능지수는 어디까지나 절대치의 값이므로 경제성 성능지수는 절대치를 취하여야 할 것이며 더불어 클수록 좋으나 여기서는 그 역수로 나타내도록 하였다. 결론적으로 종합성능지수면에서 2012년도 부하 및 제5차 전력수급계획을 대상으로 할 경우에 우리나라의 양수발전원의 적정설비용량은 본 연구에서 새롭게 제안하는 종합성능지수=7.2720을 갖는 구간인 i=6으로 5,700MW라고 판단된다. 단, 여기서는 건설비는 포함하지 않았으며 이러한 비용까지 감안하면 경제성에서 다소 낮아질 것으로 판단되며 차후연구로 남기도록 하였다.

표 3 양수발전원의 설비용량변화에 따른 지수들의 변동

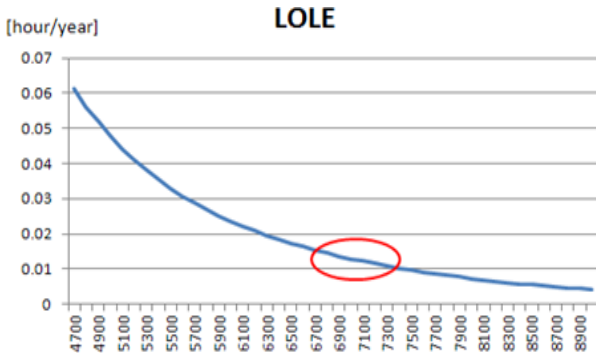
Table 3 Changes in The Contribution According to The PSPP Capacity Changing(2012)

[MW]	i*	LOLE [hour/yr]	EENS [MWh/yr]	CO ₂ [ton/year]	TPC [kWon/year]
4700	1	0.06111	33.05	9012449.96	13502065461
4900	2	0.0518	27.55	9013220.26	13500354249
5100	3	0.04425	23.19	9014010.14	13498802581
5300	4	0.03806	19.69	9014816.19	13497409505
5500	5	0.03297	16.87	9015633.51	13496172179
5700	6	0.02873	14.55	9016464.19	13495089053
5900	7	0.02517	12.64	9017307.6	13494156026
6100	8	0.02215	11.04	9018162.24	13493369217
6300	9	0.01957	9.69	9019026.6	13492725144
6500	10	0.01735	8.53	9019894.39	13492215185
6700	11	0.01542	7.54	9020763.88	13491838142
6900	12	0.01372	6.67	9021631.54	13491588845
7100	13	0.01223	5.91	9022499.6	13491462555
7300	14	0.01091	5.25	9023366.08	13491456099
7500	15	0.00973	4.66	9024234.04	13491566603
7700	16	0.00869	4.14	9025097.65	13491788683
7900	17	0.00776	3.68	9025954.91	13492118489
8100	18	0.00693	3.27	9026806.2	13492552957
8300	19	0.00619	2.91	9027649.33	13493085577
8500	20	0.00554	2.59	9028483.19	13493712797
8700	21	0.00495	2.3	9029318.5	13494430660
8900		0.00443	2.05	9030148.93	13495235121

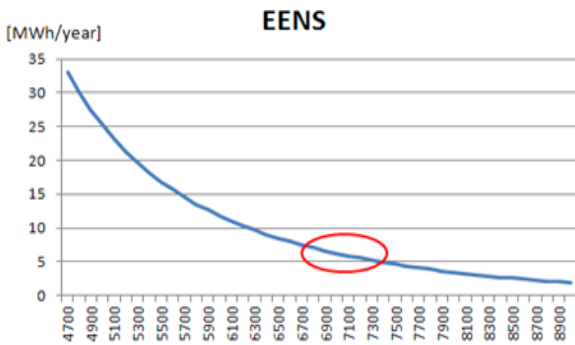
표 4 양수발전원 설비용량변화에 따른 성능지수의 변동

Table 4 Changes in The Performance Index According to The PSPP Capacity Changing(2012)

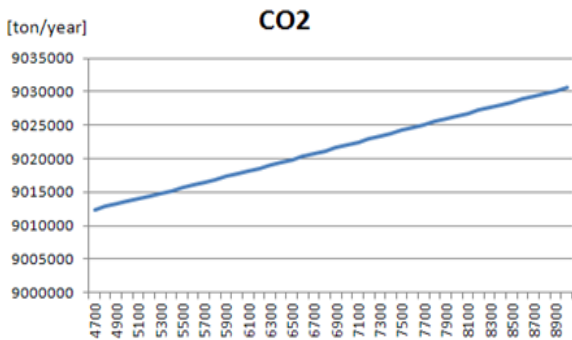
i*	CAPPIROLE	CAPPIREENS	CAPPICEO2	CAPPITPC	PI 지수합
1	3.5802	3.9107	-0.0020	0.0030	7.4919
2	3.5709	3.8773	-0.0021	0.0028	7.4489
3	3.5671	3.8486	-0.0023	0.0026	7.4161
4	3.5440	3.7953	-0.0024	0.0024	7.3394
5	3.5365	3.7819	-0.0025	0.0022	7.3181
6	3.5315	3.7412	-0.0027	0.0020	7.2720
7	3.5395	3.7342	-0.0028	0.0017	7.2726
8	3.5526	3.7296	-0.0029	0.0015	7.2807
9	3.5733	3.7709	-0.0030	0.0012	7.3424
10	3.6153	3.7720	-0.0031	0.0009	7.3850
11	3.6933	3.8654	-0.0032	0.0006	7.5560
12	3.7467	3.9310	-0.0033	0.0003	7.6748
13	3.8316	3.9645	-0.0034	0.0000	7.7926
14	3.9478	4.1019	-0.0035	-0.0003	8.0458
15	4.0082	4.1845	-0.0036	-0.0006	8.1886
16	4.1203	4.2778	-0.0037	-0.0009	8.3934
17	4.2249	4.4008	-0.0037	-0.0013	8.6207
18	4.3247	4.4587	-0.0038	-0.0016	8.7780
19	4.3578	4.5636	-0.0038	-0.0019	8.9156
20	4.5262	4.7587	-0.0039	-0.0023	9.2787
21	4.5697	4.7283	-0.0040	-0.0026	9.2914
AVG	3.8553	4.0570	-0.0031	0.0005	7.9097



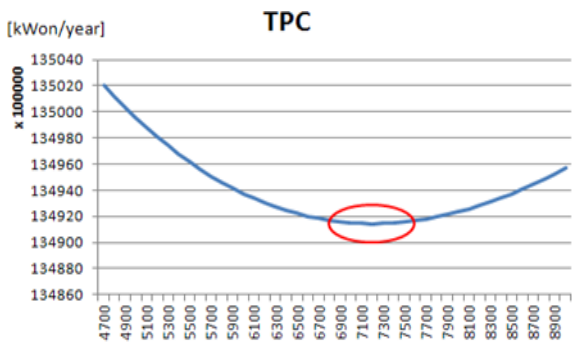
(a) 신뢰도 LOLE 기여도



(b) 신뢰도 EENS 기여도



(c) 환경성 CO₂ 기여도



(d) 경제성 확률론적발전비용(TPC)

그림 4 양수발전원 설비용량 변화에 따른 기여도 변동 그래프(2012)

Fig. 4 Changes in The Contribution Graph According to The PSPP Capacity Changing(2012)

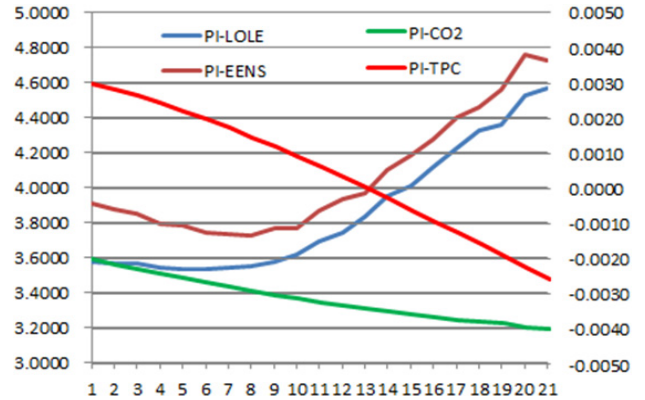


그림 5 양수발전원 설비용량 변화에 따른 성능지수 변동 그래프(2012)

Fig. 5 Changes in The Performance Index Graph According to The PSPP Capacity Changing(2012)

5.1.2 양수발전원의 설비비용률 변화에 대한 분석

한편, 양수발전원의 설비비용률 변화에 따른 기여도(지수)의 변동을 보이면 표 5와 같다. 얻어진 기여도(지수)를 식 (2)~(9)에 대입하여 계산한 성능지수의 변동을 나타내면 표 6과 같다. 그림 6 및 그림 7은 표 5 및 표 6에서의 그 특성을 파악하기 쉽도록 그림(그래프)으로 보인 것이다. 참고로 표 5 및 표 6에서의 i^* 는 식 (2)~(9)에서 물리량을 갖는 기여도(지수)를 본 연구에서 제안하는 성능지수(가치성 지수)로 변환하기 위한 그림 1에서의 평균변화율의 구간을 의미함은 전술한 바와 동일하다.

역시 표 5 및 표 6에서 굵게 표시한 값은 본 연구에서 설정한 양수발전기의 설비비용률의 변화량 범위 내에서 본 연구에서 모의 톨로 이용한 PRASim을 통하여 얻어진 기여도 지수 및 그리고 그 기여도에서 계산한 성능지수가 최적값이라고 판단되는 값을 파악하기 쉽도록 각각 나타낸 것이다. 또한 그림 7에서 굵게 타원으로 표시한 부분은 기여도(지수) 값이 포화내지 최적에 도달하였다고 판단되는 범위를 파악하기 쉽도록 표시를 하여본 것이다. 가령, 그림 7에서 LOLE 및 EENS는 양수발전원의 설비비용률이 증가함에 따라 좋아지다가 11%(구간 $i=6$)에서부터 포화된다고 볼 수 있으며 TPC는 11~13%(구간 $i=6\sim 8$)의 범위에서는 기여도가 큰 변화를 보이지 않는 특성을 가지면서 설비비용율의 적정범위로 볼 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 편의상 표 6의 CFPIROLE, CFPIREENS, CFPIECO2, 및 CFPIETPC를 그림 7에서는 PI-LOLE, PI-EENS, PI-CO2, 및 PI-TPC로 표시하였다. 양수발전원의 설비비용률 변화에 따른 성능지수 변동을 표시한 표 6 및 그래프인 그림 7에서도 이러한 성능지수면에서의 최적범위를 나타내는 특성을 볼 수 있다. 결론적으로 종합성능지수면에서 우리나라의 양수발전원의 적정 설비비용률은 본 연구에서 새롭게 제안하는 종합성능지수가 2.3452를 갖는 구간인 $i=9$ 으로 14%라고 판단된다. 단, 여기서는 앞서의 설비용량 성능지수평가에서처럼 건설비는 포함하지 않았으며 이러한 비용까지 감안하면 경제성에서 다소 낮아질 것으로 판단되며 이는 차후연구과제로 남기도록 한다.

표 5 양수발전원 설비이용률 변화에 따른 기여도의 변동 (2012)

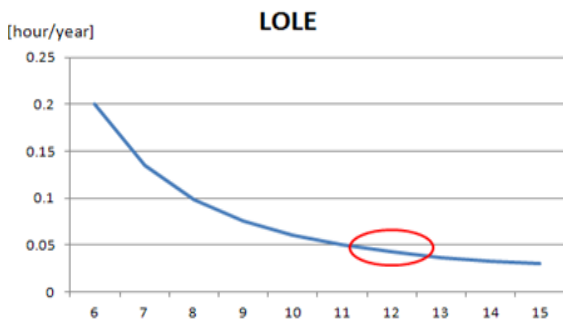
Table 5 Changes in The Contribution According to The PSPP Capacity Factor Changing(2012)

[%]	i^*	LOLE [hour/yr]	EENS [MWh/yr]	CO ₂ [ton/year]	TPC [kWon/year]
6	1	0.19991	114.83	9005072	13521668824
7	2	0.13424	74.77	9006506	13514834082
8	3	0.09777	53.49	9008243	13509292551
9	4	0.0762	41.35	9010249	13505046524
10	5	0.06111	33.05	9012450	13502065461
11	6	0.05033	27.24	9014731	13500260910
12	7	0.0426	23.15	9017023	13499512346
13	8	0.03705	20.27	9019291	13499668455
14	9	0.03305	18.22	9021540	13500608245
15		0.03015	16.76	9023747	13502252208

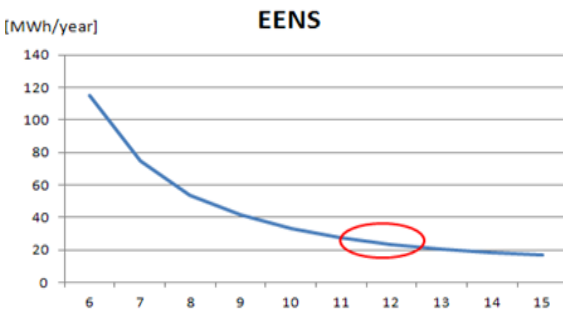
표 6 양수발전원 설비이용률 변화에 따른 성능지수의 변동 (2012)

Table 6 Changes in The Performance Index According to The PSPP Capacity Factor Change(2012)

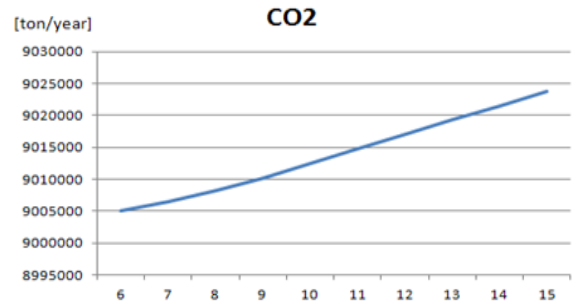
i^*	CFPI _{ROLE}	CFPI _{RENS}	CFPI _{ECO2}	CFPI _{ETPC}	PI지수합
1	1.9710	2.0932	-0.0010	0.0030	4.0662
2	1.9017	1.9922	-0.0014	0.0029	3.8955
3	1.7650	1.8157	-0.0018	0.0025	3.5814
4	1.7823	1.8065	-0.0022	0.0020	3.5886
5	1.7640	1.7579	-0.0025	0.0013	3.5208
6	1.6894	1.6516	-0.0028	0.0006	3.3389
7	1.5634	1.4929	-0.0030	-0.0001	3.0531
8	1.4035	1.3148	-0.0032	-0.0009	2.7141
9	1.2284	1.1218	-0.0034	-0.0017	2.3452
AVG	1.6743	1.6718	-0.0024	0.0011	3.3449



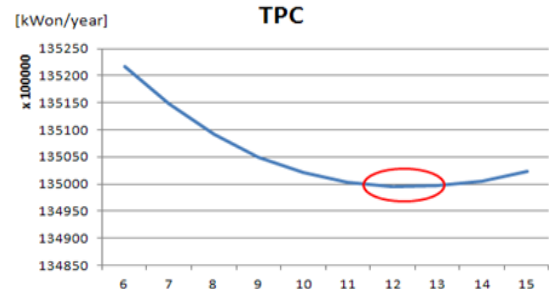
(a) 신뢰도 LOLE (x축: 설비이용률[%])



(b) 신뢰도 EENS (x축: 설비이용률[%])



(c) 환경성 CO₂ (x축: 설비이용률[%])



(d) 경제성 TPC (x축: 설비이용률[%])

그림 6 양수발전원 설비이용률 변화에 따른 기여도 변동 그래프 (2012)

Fig. 6 Changes in The Contribution Graph According to The PSPP Capacity Factor Changing(2012)

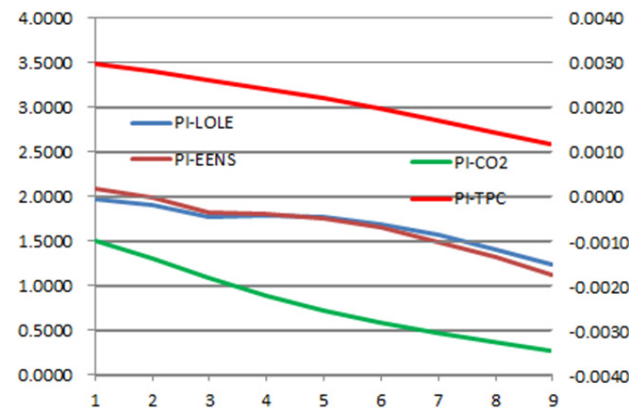


그림 7 양수발전원의 설비이용률 변화에 따른 성능지수 변동 그래프(2012) (x축: 식 (1)의 평균변화율 구간)

Fig. 7 Changes in The Performance Index Graph According to The PSPP Capacity Factor Changing(2010)

5.2 경제성으로 환산한 양수발전의 신호용성 분석

한편, 근래 CO₂ 배출거래제가 이슈로 떠오르고 있다. 따라서 확률론적인 총발전비용과 CO₂의 배출비용을 합산한 경제성으로 환산한 관점에서 양수발전원의 설비용량 및 설비이용률의 변화에 따른 환산총비용의 변동을 살펴보았다. 단, 여기서는 CO₂ 배출가격이 25,000원/Ton으로 가정하였다. 그림 8 및 그림 9는 양수발전원의 설비용량 및 설비이용률의 변화에 따른 경제성으로 환산된 총비용변동을 각각 나타낸 것이다. 여기서, TPC는 총발전비용을 CO₂의 CO₂배출

비용을 그리고 TC는 총비용을 각각 의미한다. 차후에는 EENS도 공급지장비로 환산하여 고려한 경제성 관점에서 연구할 필요가 있다고 사료된다.

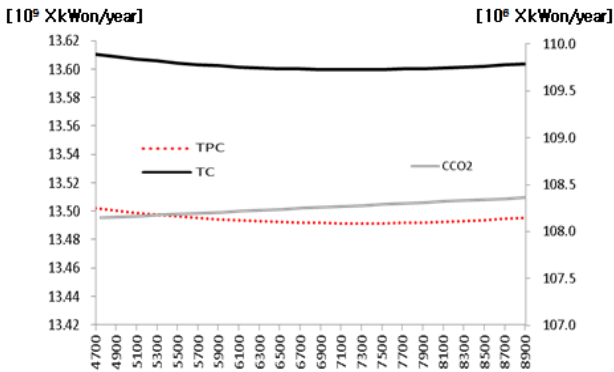


그림 8 양수발전원의 설비용량 변화에 따른 경제성(2012)
Fig. 8 Economy Due to The PSPP Capacity Changing(2012)

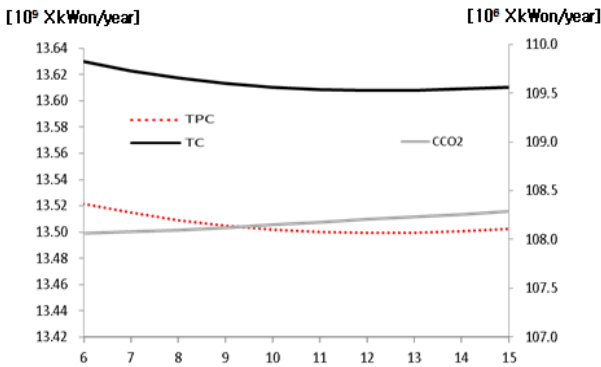


그림 9 양수발전원의 설비이용률 변화에 따른 경제성(2012)
Fig. 9 Economy Due to The PSPP Capacity Factor Changing(2012)

6. 결론

본 연구에서는 최근 계통운용측면에서 그 중요성이 새롭게 부각되고 있는 에너지 저장시스템인 양수발전원의 신뢰용성을 평가하기 위한 성능지수 및 알고리즘을 제안하였다. 나아가 우리나라의 제5차 전력수급계획을 대상으로 그 유용성을 분석하여 보았다. 이번에 제안하는 경제성, 신뢰도 및 환경성을 감안한 신뢰용성의 가치분석 모형 시뮬레이션결과에 의하면 현재의 양수 설비용량 4,700MW에서 최대 6,700MW~ 7,100MW까지 설비증설이 적정하다고 얻어졌으나 양수발전소 추가 건설비용을 감안할 때 우리나라에서 2013년도 시점에서 적정 양수설비용량은 5,500MW가 적정하다고 사료된다. 이때의 신뢰도지수 중 EENS(Expected Energy Not Served: 공급지장에너지대치)는 33.05MWh/년에서 16.87MWh/년 감소하여 최근의 우리나라의 단기정전에 따른 공급지장비단가(정전손실비용)의 추정액인 20천원~1000천원을 사용할 경우에 약 16MWh/년($20 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$) 원/kWh=3.2~160억원/년의 주파수조정에 들어가는 신뢰도측면에서의 신뢰용성 기여도가 얻어질 수 있다고 사료된다.

궁극적으로 위의 사례연구결과 현재의 4,700MW는 정적인 계통상태(Adequacy) 및 동적인 상태(Security)에서 계통운영안정화(신뢰도유지) 유지와 불안정성요소를 해소함에 많은 기여를 함에 크게 부족하다고 판단되며 적어도 양수발전원의 800MW 정도는 급히 건설이 필요하다고 사료된다. 즉, 적어도 5,500MW정도의 양수설비가 신뢰도를 고려한 신뢰용성 가치측면에서 필요하다고 사료된다. 기존의 이론에 의한 모형을 이용하여 전력수급측면에서의 분석하면 양수발전원의 경제성은 왜곡된 심야전력가격에 토대 높은 부하율 등으로 당연히 떨어질 것으로 보이나 본 연구에서 제시하는 신뢰용성 신뢰도, 환경성 및 확률론적인 발전비용을 모두 고려한 PRASim이라는 확률론적인 일간단위로 이루어진 연간 분석 프로그램에 의하면 제5차 전력수급계획을 대상으로 한 2012년도 부하를 대상으로 한 사례연구에 의하면 정적인 상태(Adequacy)에서 초차 발전비용 및 신뢰도 유지측면에서 연간 최대 약 150억원/년 정도의 이득이 얻어짐을 볼 수 있다. 이는 제6차 전력수급계획을 대상으로 한 2015년도를 모의할 경우에는 그 효과는 더욱 클 것으로 사료되며 동적인 주파수제어의 효과까지 고려하면 더욱 클 것으로 쉽게 추측이 되며 이어서 제6차 전력수급계획에 대한 평가도 실시할 예정이다.

참고로 여기서 제안하는 성능지수는 어디까지나 신뢰도, 환경성 및 경제성만을 단순히 산술적으로 합산하는 방식에 따르는 것으로 하였다. 이는 상호 물리적인 의미가 다른 것을 산술합산 것으로 임시방편의 한 방법이라고 할 수 있으므로 그 각각의 특성을 상세히 이해하여 사용함이 보다 정확하다고 사료된다. 그리고 여기서 제안하는 성능지수는 그 값이 작을수록 효율성이 큼을 의미한다. 차후에 이를 더욱 보완하여 보다 정밀한 성능지수와 그 성능지수가 클수록 효율성이 큼을 의미하는 성능지수로 확장하는 연구와 더불어 양수발전원의 주파수제어의 동적 및 정적모델링 개발과 이의 설비를 개발하여 양수발전소에 급히 장착하는 개발연구가 즉시 필요하다고 사료된다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD and the Korean National Research Foundation(KNRF) (#2012R1A2A2A01012803)

References

- [1] KEPCO, "Development of Reliability & Economics Evaluation Models for Optimal Grid Expansion Planning" KEPRI Final Report, August 31, 2012.
- [2] Jin-Teak Lim, Jae-Seok Choi, Kyengsoo Park, Yonggyo Lee, "Reliability Evaluation and CO2 Emission Assessment of Power System Considering Pumped Generators", 2012KIEE Power System Research Association Summer Conference, pp.332-333, July, 2012
- [3] Jaeseok Choi, "Power System Reliability Evaluation

Engineering” G&U Publishing Co., 2012.

- [4] Jeongje Park, Jaeseok Choi, Ungki Baek, Junmin Cha and Kwang Y. Lee, "Flexible Maintenance Scheduling of Generation System by Multi-Probabilistic Reliability Criterion in Korea Power System", KIEE, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 8~15, March. 2010.
- [5] Jeongje Park, Kyeonghee Cho, Jaeseok Choi, Ungki Baek, "A Study on the Balanced Generators Maintenance Scheduling of Generation Companies", 2009 KIEE Power System Research Association Autumn Conference,, pp.61-63, November, 2009.
- [6] Jeongje Park, Jaeseok Choi, Yong-Bum Yun, Young-Bum Jung, "A Study on Decision of Optimum Installed Reserve Rate using Probabilistic Reliability Criterion" KIEE, Journal Vol. 57, No. 8, pp.1318-1326, August, 2008.
- [7] J.S. Choi, D.H. Do, 1997, "Development of a Method for the Generator Maintenance Scheduling using Fuzzy Integer Programming, Journal of KFIS", Vol. 7, No. 5, pp.77-85, December, 1997.
- [8] J.S. Choi, Kil-Yeong Song, "A Study On the Generator Maintenance Scheduling", 1985 KIEE Power System Research Association Summer Conference, pp.148-151, July, 1985.



차 준 민 (車 濬 敏)

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 대전대 전기전자통신공학부 교수.
Tel : 031-539-1915
E-mail : chamin@daejin.ac.kr



김 남 명 (金 南 明)

1968년 10월 1일생. 1992년 숭실대 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 2014년~ 현재 한국수력원자력 근무
Tel : 033-440-3242
Fax : 033-440-3214
E-mail : danielkim@khnp.co.kr

저 자 소 개



이 성 훈 (李 星 勳)

1984년 11월 25일생. 2011년 경상대 전기공학과 졸업. 2012년~현재 경상대 석사과정.
Tel : 055-772-1715
E-mail : hun22ya@gnu.ac.kr



최 재 석 (崔 在 錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~현재 경상대 교수.
Tel : 055-772-1715
Fax : 055-772-1719
E-mail : jschoi@gnu.ac.kr