

원전 및 신재생에너지 정책에 따른 전력공급비용 분석

Analysis of Power Supply Cost According to Nuclear and Renewable Energy Policies

우 필 성* · 김 강 원** · 황 순 현*** · 김 발 호*
(Pil Sung Woo · Kang-won Kim · Soon-hyun Hwang · Balho H. Kim)

Abstract - As a result of the Fukushima disaster and climate change due to excessive greenhouse gases, international energy affairs are currently focused on establishing safe and environment-friendly policies. To achieve this, Republic of Korea has established a plan for environment-friendly energy supplies. It is expected that policy enforcement will be accompanied by an increase in energy supply costs. An analysis of energy supply costs is necessary before the establishment of any national energy policy. This paper analyzes and compares the energy supply costs accompanying environmental and nuclear energy policies, based on the Korean National Energy Master Plan and the Basic Plan for Long-Term Electricity Supply and Demand, in order to understand the implications of these national energy policies.

Key Words : Nuclear, Renewable Energy Portfolio Standard (RPS), Power supply plan, Power supply cost, Dynamic programming, Energy policy, Basic plan for long-term electricity supply and demand,

1. 서 론

현 전력산업은 급증하는 전력수요에 대처하고, 지속 가능한 발전을 토대로 환경문제를 해결하기 위한 방안이 필요한 실정이다. 즉, 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출량이 기하급수적으로 증가하면서 이상기후현상이 발생하고 있다. 이러한 문제로 인해 1992년 6월 브라질 리우환경회의에서 기후변화협약이 채택되어 2020년 이후 자발적 감축목표(Intended Nationally Determined Contribution; INDCs)를 제출하는 신기후체제(POST-2020)에 대한 논의가 활발히 진행 중에 있다[1]. 이러한 시류에 발맞춰 범세계적으로 에너지산업 분야에 신재생에너지 활성화 등 새로운 패러다임이 등장하였고, 더 나아가 체르노빌과 후쿠시마 등의 원전사고로 인하여 에너지 안보를 고려한 발전설비 계획을 요구하고 있다. 대표적으로 일본과 독일은 원전정책의 전면 재검토와 탈원전 정책 방침을 결정하여 신재생에너지 전환 프로그램을 추진 중에 있다. 또한 원자력 설비용량이 세계 2위의 규모인 프랑스는 후쿠시마 사고 이후에 원자력 에너지 정책을 점진적으로 축소하는 방안을 고심하고 있다[2].

그러나 상기 탈원전 정책에 반대하는 입장도 팽배하다. 실례로 프랑스 원자력청은 안정적인 에너지 공급을 위해 기존 원전에 대

한 수명 연장의 필요성을 주장하고 있으며, 독일의 사회민주당은 탈원전 에너지정책은 소비자와 산업 전반에 큰 피해를 줄 수 있는 정책이라 부정적으로 바라보고 있다. 현재 2017년 기준으로 일본과 독일 모두, 산업용과 가정용의 전기요금이 2010년 대비 대략 20% 상승하였다. 독일의 경우, 탈원전 정책과 신재생에너지 정책 추진에 대한 에너지 공급 비용 증가 현상을 국민들에게 공표하여 전기요금 인상은 불가피한 상황을 인지한 상태이므로 기존 탈원전 정책을 고수하고 있다. 반면에 일본의 경우, 원전 가동이 중단됨과 동시에 에너지 수입 비용이 크게 증가하여 원전 제로 방침을 철회하고 원자력규제위원회 안전심사를 통과한 원전의 재가동을 추진하기로 결정하였다[3].

우리나라는 2010년 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법 개정을 통해 2012년부터 500MW 이상 발전설비를 소유한 발전사업자를 대상으로 실시중이며, 2015년도에 온실가스 배출권 거래제를 시행 중에 있다[4]. 또한 현 정부의 에너지 기초정책인 탈원전과 신재생에너지 확대 정책을 추진 중에 있으며, 기 정책에 대해 우리나라 역시 찬반 대립이 첨예한 상황이다.

급변하는 전력산업의 패러다임에 대한 유연한 대응을 위해 다양한 시나리오에 따른 전력공급비용의 비교·분석은 필수 선행연구라 사료된다. 따라서 본 논문에서는 우리나라 정부에서 고시한 국가에너지기본계획과 전력수급계획을 기반으로 원전 및 신재생에너지 정책 추진에 따른 전력공급비용을 비교·분석하여 향후 원전계획수립에 대한 시사점을 도출하였다.

2. 우리나라 에너지정책 현황

우리나라 에너지정책 시행을 위해 정부는 에너지 관련 계획에

* Corresponding Author : Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea.

E-mail : bhkim@hongik.ac.kr

* Electrical Safety Research Institute, Korea Electric Safety CO., Korea. (woopilsung@kesco.or.kr)

** Korea Energy Agency, Korea.

***Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea.

Received : August 7, 2017; Accepted : November 27, 2017

대해 원칙과 방향을 제시하는 성격을 가지는 최상위계획인 국가 에너지기본계획을 수립한다. 또한 기 계획을 기반으로 전력수급 기본계획을 수립한다.

본 장에서는 제2차 국가에너지기본계획에 대한 주요 골자를 발췌하고[5], 제5~7차 전력수급기본계획에 명시된 발전설비계획의 기본방향을 분석하였다[6]-[8].

2.1 제2차 국가에너지기본계획

국가에너지기본계획에서는 수요관리 중심의 에너지 정책전환, 분산형 발전시스템 구축 및 환경보호, 에너지 안전강화 및 기술 등 지속가능성 제고, 에너지 안보 강화, 에너지원별 안정적 공급체계 구축, 에너지 사업 활성화를 위한 정책 추진의 6가지 중점과제를 선정하여 2035년까지의 중장기 에너지정책방향을 제시하였다.

국가에너지기본계획에 고시된 전원 믹스는 2035년까지 원전 29%, 신재생에너지 11%로 구성하고 그 외는 석탄과 LNG로 구성토록 확정하였다.

특히 원전의 경우 제1차 국가에너지기본계획상 보급목표인 41%에서 대폭 감소하였고, 신재생에너지구성(11%)에서 폐기물 30.2%, 풍력 18.8%, 바이오 15.2%, 태양광 14.6%로 구성하였다.

2.2 전력수급기본계획

전력수급기본계획의 주요 골자는 안정적이고 경제적인 전력계통 운영을 위해 2년 단위로 15년의 전력설비에 대한 중·장기계획을 수립하는 것이다. 본 절에서는 전력수급기본계획의 여러 항목 중 발전설비계획 부분을 중점으로 기술하였다.

2.2.1 제5차 전력수급기본계획

본 계획의 발전설비계획의 정책은 친환경 전원구성, 저원가 전력공급체계 구축, 전력수급 안정성 강화, 타 계획과의 정합성 확보인 4가지 정책목표를 제시하였고, 각 정책목표에 대한 구체적인 사항은 다음 <표 1>과 같다.

표 1 제5차 전력수급계획의 발전설비계획 수립방향

Table 1 Direction of Plan for Power Generation Facilities in the 5th Basic Plan for Long-Term Energy Supply and Demand

정책목표	세부 사항
친환경 전원구성	- 원전 및 신재생전원 최대 반영
저원가 전력공급체계 구축	- 기저설비(원자력, 석탄)의 비중 확대 - 계통한계가격(System Marginal Price SMP) 안정
전력수급 안정성 강화	- 공급신뢰도 확보기준 : 0.5일/년 - 4,000MW 초과수요 발생시 공급신뢰도 기준 충족
타 계획과의 정합성 확보	- 국가에너지기본계획의 BAU 및 목표수요와의 정합성 확보

2.2.2 제6차 전력수급기본계획

본 계획의 발전설비계획의 정책은 경제규모에 부합한 안정적 예비설비 확보, 경제적·사회적 비용을 최소화한 전원구성, 지역수용성 및 계통여건을 고려한 발전설비 확충을 추진한다는 3대 방향을 제시하였고, 각 정책목표에 대한 구체적인 사항은 다음 <표 2>와 같다.

표 2 제6차 전력수급계획의 발전설비계획 수립방향

Table 2 Direction of Plan for Power Generation Facilities in the 6th Basic Plan for Long-Term Energy Supply and Demand

정책목표	세부 사항
경제규모에 부합한 예비율 확보	- 2027년 22%의 예비율 목표 설정 1. 공급신뢰도 확보기준 : 0.3일/년(15%) 2. 수요관리 불확실성에 따른 예비율 7%
경제적·사회적 비용을 최소화한 전원구성	- 원전 : 제2차 국가에너지기본계획 확정 시까지 신규반영 유보 - 신재생 : 2027년 기준 발전설비 비중 12% 이상
지역수용성 및 계통여건을 고려한 발전설비 확충	- 신규 필요설비 용량 : 29,570MW

2.2.3 제7차 전력수급기본계획

본 계획의 발전설비계획의 정책은 안정적 전력수급을 위한 발전설비 확충, 온실가스 감축목표 대응을 위한 저탄소 전원구성, 전원구성시 경제성·환경성·수용성 고려, 분산형 전원 확대를 추진한다는 4대 방향을 제시하였고, 각 정책목표에 대한 구체적인 사항은 다음 <표 3>과 같다.

표 3 제7차 전력수급계획의 발전설비계획 수립방향

Table 3 Direction of Plan for Power Generation Facilities in the 7th Basic Plan for Long-Term Energy Supply and Demand

정책목표	세부 사항
안정적 전력수급을 위한 발전설비 확충	- 2029년 22%의 예비율 목표 설정 1. 공급신뢰도 확보기준 : 0.3일/년(15%) 2. 수요관리 불확실성에 따른 예비율 7%
온실가스 감축목표 대응을 위한 저탄소 전원구성	- 석탄화력 비중축소 : 설비 4기 철회 - 원전 2기 신설 : 제2차 국가에너지기본 계획의 원전비중 정책목표 반영 - 신재생 : 2029년 발전설비 비중 20.1%
전원구성시 경제성, 환경성, 수용성 고려	- 온실가스 감축을 위한 배출권 구입비용 반영 - 원전 사후처리 및 사고위험비용 추정 반영
분산형 전원 확대	- 2029년 총발전량의 12.5%

3. 원전 및 신재생에너지 정책에 따른 전력공급비용 분석

3.1 전력공급비용 분석의 정식화

본 연구에서는 제2차 국가에너지기본계획과 전력수급기본계획의 데이터를 기반으로 원전 및 신재생에너지에 대한 다양한 정책 시나리오를 통해 전력공급비용의 변화를 비교하였다.

전산모형의 전체적인 구성은 전력수급계획 프로그램(WASP)과 유사하고[9]-[10], 최적화 기법으로는 동적계획법(Dynamic Programming)을 적용하였다[11]-[14]. 본 연구에 활용된 전산 모형의 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Min. } \sum_y (C_y^{\text{gen}} + C_y^{\text{const}}) \quad (1)$$

$$\text{S.t. } \sum_N X_{N,y,t} + \sum_F X_{F,y,t} + \sum_R X_{R,y,t} = D_{y,t} \quad (2)$$

$$X_{N,y,t} \leq I_{N,y} \quad (3)$$

$$X_{F,y,t} \leq I_{F,y} \quad (4)$$

$$X_{R,y,t} \leq I_{R,y} \cdot Util_R \quad (5)$$

$$I_{N,y} = I_{N,y-1} + Add_{N,y} \quad (6)$$

$$I_{F,y} = I_{F,y-1} + Add_{F,y} \quad (7)$$

$$I_{R,y} = I_{R,y-1} + Add_{R,y} \quad (8)$$

$$\sum_R \sum_t X_{R,y,t} \geq \sum_t D_{y,t} \cdot RPS_y \quad (9)$$

$$\sum_N I_{N,y} + \sum_F I_{F,y} + \sum_R (I_{R,y} \cdot Util_R) \geq D_{y,t} \cdot reserve \quad (10)$$

$$X_{N,y,t}, X_{F,y,t}, X_{R,y,t}, Add_{N,y}, Add_{F,y}, Add_{R,y} \geq 0 \quad (11)$$

여기서,

- y : 년도
- t : 시간
- N : 원자력설비
- F : 화력설비 종류
- R : 신재생설비 종류
- C_y^{gen} : y년도 발전비용
- C_y^{const} : y년도 신규설비 건설비용
- $X_{N,y,t}$: 원자력설비 N의 시간(t)별 발전량
- $X_{F,y,t}$: 화력설비 F의 시간(t)별 발전량
- $X_{R,y,t}$: 신재생설비 R의 시간(t)별 발전량
- $D_{y,t}$: 시간(t)별 수요량(MWh)
- $I_{N,y}$: 원자력설비 y년도 설비용량(MW)
- $I_{F,y}$: 화력설비 y년도 설비용량(MW)
- $I_{R,y}$: 신재생설비 y년도 설비용량(MW)

- $Util_R$: 신재생설비별 이용율(%)
- $Add_{N,y}$: 원자력설비 y년도 증설용량(MW)
- $Add_{F,y}$: 화력설비 y년도 증설용량(MW)
- $Add_{R,y}$: 신재생설비 y년도 증설용량(MW)
- RPS_y : y년도 신재생설비 의무발전 비율
- $reserve$: 예비율 기준

식 (1)은 계획기간의 총 비용을 최소화하는 목적함수이다. 이 목적함수는 발전비용과 건설비용을 계산하는 부분으로 이루어져 있으며 연도별 발전비용은 연료비 및 유지보수비를 식 (12)와 같이 정식화하였다.

$$C_y^{\text{gen}} = \sum_N [\sum_t (X_{N,y,t} \cdot C_N) + I_{N,y} \cdot M_N] + \sum_F [\sum_t (X_{F,y,t} \cdot C_F) + I_{F,y} \cdot M_F] + \sum_R [\sum_t (X_{R,y,t} \cdot C_R) + I_{R,y} \cdot M_R] \quad (12)$$

여기서,

- C_N : 원자력설비 운전비(연료비)
- C_F : 화력설비 운전비(연료비)
- C_R : 신재생설비 운전비(연료비)
- M_N : 원자력설비 유지보수비(원/MW)
- M_F : 화력설비 유지보수비(원/MW)
- M_R : 신재생설비 유지보수비(원/MW)

또한 연도별 E건설비는 설비별 단위 건설비용을 이용하여 식 (13)와 같이 정식화 하였다.

$$C_y^{\text{const}} = \sum_N (Add_{N,y} \cdot K_N) + \sum_F (Add_{F,y} \cdot K_F) + \sum_R (Add_{R,y} \cdot K_R) \quad (13)$$

여기서,

- K : 설비별 단위 건설비용(원/MW)

3.2 사례연구 및 입력정보

본 사례연구에서는 제7차 전력수급계획의 정보를 기반으로 할 인율 6.5%를 적용하였으며, 2015~2025년(10년)의 전력공급비용을 산출하였다. 세부 시나리오 산정과 입력 정보는 다음과 같다.

시나리오의 구성의 경우, 원전과 신재생에너지 정책을 기준으로 7개의 시나리오로 구성하였다. 기준 시나리오는 정부에서 고시한 제7차 전력수급계획의 전원설비계획을 그대로 반영하였다.

원전정책의 경우 시나리오 2~4에서는 제7차 전력수급계획의 발전설비 폐지 계획을 적용하여 점진적인 탈원전 시나리오로 구성하였고, 시나리오 5~6에서는 현재 보유한 원자력 발전원부터 전면 중단한 시나리오로 구성하였다. 다음으로 신재생에너지 정

책의 경우 현행 시행중인 RPS 연도별 공급의무비율을 시나리오 1과 5에 반영하였으며, 현 정부의 신재생에너지 확대 정책인 총 발전량의 20% 확대 정책을 시나리오 4와 7에 적용하였다. 기술된 시나리오는 <표 4>와 같고, 시나리오에 활용된 발전설비 관련 데이터는 <표 5>와 <표 6>과 같다.

표 4 원전 및 신재생에너지 정책에 대한 시나리오

Table 4 Scenario for nuclear & renewable energy policy

	원전정책	신재생정책
(기준) 시나리오1	제7차 전력수급계획	제7차 전력수급계획
시나리오2	원전 수명 후 폐기 (증설 없음)	RPS제도 반영
시나리오3	원전 수명 후 폐기 (증설 없음)	총 발전량의 10%
시나리오4	원전 수명 후 폐기 (증설 없음)	총 발전량의 20%
시나리오5	원전 폐기(증설 없음)	RPS제도 반영
시나리오6	원전 폐기(증설 없음)	총 발전량의 10%
시나리오7	원전 폐기(증설 없음)	총 발전량의 20%

표 5 발전원별 관련 입력정보

Table 5 Input-data by power type

	NUCL	COAL1	COAL2	LNG1	LNG2	Oil
단위용량 (MW)	1400	500	1000	400	800	350
연료비 (천원/Gcal)	5.07	38.02	28.02	116.73	116.73	179.56
유지보수비 (백만원/MW년)	122	48.9	38.5	32.52	44.52	13.86
투자비 (백만원/MW)	2,590	1,508	147.3	1,174	981	2,276
수명(년)	60	30	30	30	30	30

표 7 시나리오별 발전원의 누적설비용량

Table 7 Accumulated power facility capacity by scenario

	NUCL	COAL	LNG	OIL	수력	양수	풍력	집단	IGCC	태양광
(기준) 시나리오1	39429	44518	34567	1195	1814	4700	6905	8969	900	14563
시나리오2	22616	56599	41024	1195	1814	4700	6905	8969	900	14563
시나리오3	22616	55500	41024	1195	1814	4700	8062	8969	900	14563
시나리오4	22616	52755	40563	1195	1814	4700	11705	8969	900	14563
시나리오5	0	80212	40101	1195	1814	4700	6905	8969	900	14563
시나리오6	0	79114	40101	1195	1814	4700	8062	8969	900	14563
시나리오7	0	76368	39640	1195	1814	4700	11705	8969	900	14563

표 6 신재생에너지원별 관련 입력정보

Table 6 Input-data by renewable energy type

	수력	양수	육상 풍력	집단	IGCC	태양광
단위용량 (MW)	50	300	100	100	300	100
연료비 (천원/Gcal)	0	0	0	116.73	38.02	0
유지보수비 (백만원/MW년)	24.4	27.6	51	44.52	125.79	17.94
이용률	0.12	0.08	0.246	0.44	1	0.18
투자비 (백만원/MW)	3,083	8,461	221	1,464	3,918	546.4
수명(년)	50	50	20	20	20	20

3.3 사례연구 결과

원전 유지 및 폐기 정책과 총 발전량에서 신재생에너지의 비율을 바탕으로 시나리오를 분석해본 결과, 원전의 비중과 수요의 증가 부분을 주로 석탄발전기가 감당을 하고 총 전력공급비용은 기준 시나리오에 대비 최대 27.65% 증가하였다. 전력공급의 측면에서 신재생에너지원의 경제성은 타 발전원에 비해 경쟁력이 부족한 것으로 나타났다. 또한 신재생에너지원의 특성을 반영한 보조정책이 없이 연간 총 발전량에 대한 특정 비율로 제한할 경우, <표 7>의 결과처럼 경제적인 측면에서 경쟁력이 부족한 신재생 설비의 투자에 제한이 있음 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 제7차 전력수급기본계획을 기준으로 원전 유지·폐기 및 신재생비율의 증가의 시나리오에 대한 전력공급비용을 비교하였다. 원전을 유지 할 경우 보다 폐지할 경우의 전력공급비용은 상승하고, 신재생 설비별 특성에 따른 별도의 지원정책 없이는 경제적인 수준에서 투자를 유도할 수 없음을 알 수 있다. 즉, 현 에너지 정책의 기조인 저렴하고 안정적인 에너지공급과

[단위 : MW]

표 8 시나리오별 2015~2025년의 총 전력공급비용

Table 8 Total power supply cost by scenario from 2015 to 2025

	전력공급비용 (백만원)	기준대비 증감 (백만원)	기준대비 증감 (%)
(기준) 시나리오1	310,757,957	-	-
시나리오2	322,144,547	11,386,590	3.53
시나리오3	339,515,882	28,757,925	8.47
시나리오4	362,849,638	52,091,681	14.36
시나리오5	392,073,305	81,315,348	20.74
시나리오6	406,565,545	95,807,588	23.57
시나리오7	429,531,470	118,773,513	27.65

더불어 친환경성까지 고려하고자 한다면 각 정책이 적정 수준으로 유지될 수 있는 합의점을 찾는 것이 필요하다. 특히 전력공급비용의 급격한 상승에 대비하기 위해서는 예산의 합리적인 확보와 전기요금의 현실화가 선행되어야 할 것이라 판단된다.

향후연구로 원전 사후 처리비용과 배출권거래제도 등이 반영된 사회적 편익 반영된 시나리오 분석이 실시된다면 보다 유의미한 결과를 도출할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : R17XA04-77).

References

[1] Kangwon Kim, "A Development of the Generation Expansion Planning model considering energy and environmental policies", Doctorate thesis, Hongik University, 2014.
 [2] "Nuclear Policy Trends by Country", Korea Atomic Industrial Forum(KAIF), 2015.
 [3] "2016 Nuclear Power White Papwer", Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., 2016.
 [4] "2016 Renewable Energy White Papwer", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2016.
 [5] "The 2nd Korea National Energy Master Plan", Ministry of Trade, Industry and Energy
 [6] "The 5th Basic Plan for Long-Term Energy Supply and Demand", Ministry of Knowledge Economy
 [7] "The 6th Basic Plan for Long-Term Energy Supply and Demand", Ministry of Trade, Industry and Energy

[8] "The 7th Basic Plan for Long-Term Energy Supply and Demand", Ministry of Trade, Industry and Energy
 [9] Young-chang Kim, "Investment Theory of Power Plant", Energy Economy M&B, 2006.
 [10] "WASP model considering power plant extension planning theory and environmental constraints", Korean Institute of Electrical Engineers, 2011.
 [11] Gross, Charles A., Power System Analysis, John Wiley & Sons, 1986.
 [12] Peterson, E. R., "A dynamic programming model for the expansion of electric power systems," Management Science, pp. 656-644, Dec. 1973.
 [13] Dapkus, W. D. and T. R. Bowe, "Planning for new electric generation technologies: a stochastic dynamic programming approach," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, pp.1447-1452, 1984.
 [14] Neelakanta, P. S. and M. H. Arsali, "Integrated resource planning using segmentation method based dynamic programming," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 375-385, Feb. 1999.

저 자 소 개



우 필 성 (Pil Sun Woo)

1987년 5월 6일생. 2012년 배재대 광전기공학과 졸업. 2014년 홍익대 전기정보제어공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기정보 제어공학과 박사수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 재직중. 관심분야 : 스마트그리드, 최적화이론
 E-mail : woopilsung@kesco.or.kr



김 강 원 (Kang-won Kim)

1977년 3월 23일생. 2003년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기정보 제어공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 현재 한국에너지공단 재직중. 관심분야 : 에너지정책(신재생, 신산업, 수요관리)
 E-mail : kimkw@energy.or.kr



황 순 현 (Soon-hyun Hwang)

1986년 3월 13일생. 2012년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 2014년 동 대학원 전기정보 제어공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기정보제어공학과 박사수료. 관심분야 : 전원계획, 최적화이론
E-mail : hsoon0313@gmail.com



김 발 호 (Balho H. Kim)

1962년 7월 11일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1999년~현재 홍익대학교 전기정보 제어공학과 교수. 관심분야 : OPF, 최적화이론, 전력경제(시장)
E-mail : bhkim0711@gmail.com