

전력예비율과 전기요금, 신재생, 경제성장, 동·하계 동시피크 간 인과관계 연구 : OECD 패널 분석

A Study on the Causality between Electric Reserve Margin, Electricity Tariff, Renewable Energy, Economic Growth, and Concurrent Peak in Winter and Summer: OECD Panel Analysis

이 중 호* · 박 경 민** · 박 중 구†
(Jung-Ho Lee · Kyung-Min Park · Jung-Gu Park)

Abstract - In Korea, prior to 2011, the electric reserve margin followed the probabilistic reliability view and the planning reserve margin had been operated at about 15% based on the assumption that power outage was permitted within 0.5 days a year. However, after experiencing the shortage of the electric generation capacity in Sept. 15, 2011, the planning reserve margin was selected as 22% to improve the reliability of the electric supply.

In this paper, using panel data of 28 OECD countries over the period 2000-2014 we attempted to empirically examine the linkage between reserve margin, electricity tariffs, renewable energy share, GDP per capita, and summer/winter peak-to-peak ratios. As a result, all four independent variables have been significant for the electric reserve margin, and in particular, we found that countries with similar peaks in winter and summer have operated 4.3% higher reserve margin than countries experiencing only summer peak.

Key Words : Electric reserve margin, Panel analysis, Peak to peak ratio, Renewable energy, Electricity tariff, Economic growth

1. 서 론

최근 7~8년간 한국경제 내 에너지 분야에서 전력예비율은 현안과제가 되어왔다. 2011년 순환정전 이후 부족한 발전설비를 늘려야 한다는 주장에서부터 최근 추가 설치된 발전설비로 인한 과다 유휴발전기 논란까지 적어도 문제 많기도 문제인 것이 발전설비와 전력예비율의 현 주소라고 할 수 있다.

전력예비율은 한 국가의 전력계통을 계획하는 가이드라인으로 사용되며, 기준 전력예비율이 너무 낮으면 피크 시에 발전설비 부족으로 전기를 공급하지 못하여 블랙아웃 또는 순환정전을 초래하게 되고, 반면 기준 전력예비율이 너무 높으면 사용하지도 않을 발전설비가 과도하게 건설되어 국가경제에 낭비요인으로 작용하게 된다[1].

2003년 북미 대정전, 2011년 우리나라의 순환정전, 그리고 2017년의 대만 대정전은 낮은 예비율의 영향으로 인해 발생한

사고이다. 반면 우리나라의 기준 전력예비율을 1% 낮추면 약 8천억~1.6조원의 발전소 건설비를 절감시킬 수 있다. 이와 같이 전력예비율은 사회, 경제 및 안보에 중요한 영향을 끼치는 요소라고 할 수 있다.

한국전력거래소에서 운영하는 전력시장운영규칙에 따르면, 예비력의 개념은 예측수요의 오차, 발전기 불시고장 등으로 인하여 전력수급의 균형을 유지하지 못할 경우를 대비하여 전력수요를 초과하여 보유하는 발전기의 여유용량이다[2]. 또한 설비예비율은 전체 설치된 설비용량에서 최대 전력수요를 뺀 값(예비력)을 최대 전력수요로 나누어 산출한 수치로서 전력의 수급상태를 나타낸 지표이다.

전력 설비예비율 계산공식은 아래와 같다[3].

$$\text{설비예비율} = \frac{(\text{설비용량} - \text{최대수요})}{\text{최대수요}} \times 100\% \quad (1)$$

지금까지 우리나라는 1년에 몇 시간까지 정전을 허용할 것인가 하는 확률론적인 관점에서 전력예비율을 관리해 왔는데, 이 방법은 계산과정이 복잡하고 제약조건에 따라 많은 편차가 있어 적정성에 대한 논란이 있어왔다[1,3].

본 논문은 현재까지의 접근방식에서 벗어나 OECD 국가들은 평균적으로 어느 정도의 예비율로 계통을 운영해 왔으며, 그 예비율에 영향을 미치는 요인은 무엇이고, 요인별 영향력은 얼마인

† Corresponding Author: Department of Energy Policy, Seoul National University of Science & Technology, Korea.

E-mail: pjg@seoultech.ac.kr

* Department of Energy Policy, Seoul National University of Science & Technology, Korea.

E-mail: ljh0628@kepco.co.kr

** School of Business, Yonsei University, Korea.

Received : June 27, 2018; Accepted : October 30, 2018

지를 알아보려고 한다. 이에 따라 전력예비율과 전기요금, 신재생 점유비율, 1인당 GDP, 동하게 피크차이율 간의 인과관계를 분석하기로 한다.

그리고 본 논문은 전력예비율에 회귀분석적 방법론을 적용하기 위하여 패널 데이터 분석법을 최초로 도입하였다. 데이터가 비교적 균질한 OECD 34개국의 2000년~2014년(15년간)의 패널 데이터에 대하여 E-views 방법론을 이용하였다[4]. 통계분석 기법 가운데 패널 데이터 분석법은 다중공선성의 문제를 줄여주고 모델 추정에서 더 높은 자유도를 제공한다. 따라서 모든 변수에 대해 횡단면 정보가 있고 횡단면 대비 시계열이 더 작을 때의 예측 문제에 특히 적합하다[5].

본 논문은 서론에 이어 2장에서는 전력예비율과 관련한 방법론 및 선행연구를 기술함은 물론 신재생과 경제성장, 전기요금에 관한 선행연구에 대하여 분석하기로 한다. 또한 본 논문의 패널 데이터 추출 기준 및 연구방법과 연구결과에 대해 기술하기로 한다. 3장에서는 결론과 함께 논문의 한계에 대해서 정리하기로 한다.

2. 본 론

2.1 선행연구

전력계통에 있어 신뢰도와 예비율은 매우 깊은 상관관계를 맺고 있다. 북미전력계통 신뢰도 위원회(NERC)에 따르면 전력계통의 신뢰도를 “고객이 요구하는 시점에 원하는 전력량을 원하는 수준으로 공급할 수 있는 정도”로 정의하고 있다.

이 정의에 따라 고객이 원하는 시점에 원하는 전력을 제공하기 위해서는 최대전력 대비 적절한 예비율 규모를 갖추어야 한다. 하지만 예비율은 신뢰성과 경제성을 모두 충족시켜야하기 때문에 어느 정도를 적절한 양으로 설정할지가 매우 까다롭다.

적절한 전력예비율 기준을 산정하는 방법은 주로 정전발생의 확률을 기준으로 전력예비율을 산정하는 방법인 확률론적 신뢰도 지수를 사용해 왔으며, 그 종류에는 공급지장 확률법(Loss of Load Probability, LOLP), 공급지장에너지 확률법(Loss of Energy Probability, LOEP), F&D법(Frequency and Duration) 등이 있다. 이 외에도 전력의 공급비용 및 공급지장비용을 포함하는 경제적 비용을 목적함수로 하여 비용을 최소화하는 방법에 의해 전원개발계획을 수립하는 방법(공급지장비용법)도 일부 사용되고 있는데, 여러 가지 방법론을 통해 결과적으로 전력계통에 필요한 적정예비율이 결정된다[3].

한국은 과거 공급지장확률법(LOLP)에 따라 1년에 0.5일의 공급중단 확률을 고려하여 전력예비율 기준을 대략 15% 정도로 운영하여 왔다[6,7]. 그러나 2011년 9월 15일 순환정전을 경험한 이후 이 기준을 22%로 정하여 운영하고 있다. 기준예비율 22%는 세부적으로, 공급신뢰도 기준 하에서 발전기 고장정지, 예방정비, 석탄 리트르핏 일정 등을 반영하여 산출되는 최소 예비율 13%와 연도별 수요 불확실성, 발전설비 건설시 발생할 수 있는 공급지연 등을 고려한 불확실성 대응 예비율 9%로 구분된다[8].

2011년 9월 11일 순환정전 이전의 국내 전력예비율 관련 연

구가 정전확률 기반으로 예비율 기준을 얼마로 정하느냐에 주안점이 맞추어져 있었다고 하면, 순환정전 이후에는 정전확률을 낮추어 예비율을 올린다는가, 아니면 전문가 설문조사 등을 통해 기준을 정하는 식으로 전력예비율 관련 연구방법이 다양해지고 있는 추세이다.

노준우 외 4명(2008)은 LOLP 0.5일/년을 기준으로 할 때 적정 예비율은 12%라고 주장하였다[6]. 박정제 외 3명(2008)은 계통규모가 커지고 국민총생산(Gross National Product, GNP)이 상승할수록 동일한 공급지장시간 기대치(Loss of Load Expectation, LOLE)에서 설비예비율(Installed Reserve Rate, IRR)은 작아진다고 설명하며, 우리나라의 신뢰도 기준 LOLP=0.5일/년에 해당하는 IRR값은 14.9%라고 주장하였다[7]. 박정제 외 1명(2010)은 용량신뢰도라는 새로운 개념을 도입하여 불확실성이 매우 큰 신재생에너지 전원 투입 시의 실제적인 유효설비 예비력을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다[9].

남일총(2012)은 국가별로 전력시장 운영방식과 환경이 다르기 때문에 적정 예비율은 모두 다를 수 있지만 대부분의 선진국에서는 연중 최대 전력을 충족하는 수준의 설비규모에 15% 내외의 예비율을 기준으로 한다고 소개하였다. 또한 예비율의 근거가 되는 전력공급중단 확률(LOLP)에 대하여 미국 대부분의 지역과 일부 다른 나라에서는 1일/10년의 발생 가능성을 사용하고 있으나, 우리나라는 0.5일/1년으로 잡고 있어 우리나라의 LOLP 기준은 선진국의 5배에 달하는 공급중단 확률을 허용하고 있다고 주장하였다[1].

남수현(2015)은 LOLP에 의한 전력예비율 계산과정이 너무 복잡하고 또한 여러 가지 제약조건 하에서 계산되어 결과적으로 많은 편차를 보임에 따라 산·학·연 전문가들에 대한 설문조사를 통해 최적의 기준 전력예비율을 산정하였으며, 그 결과 25%를 적정 설비예비율로 제안하였다[3].

한편 우태윤(2016)은 OECD 국가들의 전력예비율 관리 현황을 SPSS를 이용하여 회귀분석하였다. 독립변수인 부하변동률, 원자력발전 비율, 석탄발전 비율이 종속변수인 전력예비율에 유의한 영향을 보이며, 제 7차 전력수급기본계획에 따른 2020년 적정 전력예비율은 18%라고 주장하였다[10].

다수 선진국의 연구결과들을 살펴보면(Sadorsky(2009), Apergis(2010), Menegaki(2011), Lotz(2016), Bhattacharya(2016), Ito(2017)) 신재생 에너지와 경제성장(GDP)과의 상관관계에 대해 패널 분석하였으며, 그 결과 대부분의 경우에 상호 상관관계가 있는 것으로 해석되었다[11-16]. 또한 Sadorsky(2009)는 전기요금 변화가 재생에너지 소비에 영향을 미친다고 주장한 바 있다[11]. 본 논문은 전력예비율을 결정하는 선행연구들의 변수들 간 높은 상관관계를 고려하되, 종속변수인 전력예비율에 미치는 영향을 중심으로 독립변수들을 구분하여 타 논문들과 차별화하였다.

한편 상기의 선행연구들에서는 신재생에 의한 전기 생산량(W_n)을 기준으로 한 반면, 본 논문에서는 신재생 설비용량(W)을 기준으로 했기 때문에 의미적으로 다소 차이가 있을 수 있다. 이러한 변수 채택은 Kim(2016) 등에 의해 시도된 바 있으며[17], 예비율 자체가 전력 생산량(W_n)을 기준으로 하는 것이 아니라 최대수요(W)가 발생하는 시점 또는 연도의 발전설비 용량(W)을

기준으로 산정하는 것이기 때문에 불가피하게 용량을 기준으로 하였다.

다음으로 본 논문은 동하계 피크차이율 변수를 포함하고자 한다. 2011년 9월 15일 한국에서 추석명절 직후 늦더위로 인해 발생한 이상부하 및 설비용량 부족으로 의해 순환정전이 발생했다. 본 논문은 그 원인을 2007년 이전까지 하계에만 발생하던 전력 피크가 2009년 이후 하계와 동계에 모두 비슷하게 발생하고 있는 점에서 찾고자 한다[18].

2009년 여름과 겨울에 모두 연중 피크가 발생하였고, 피크기간에는 설비점검을 위한 예방정비(overhaul)를 하기 어려우므로 그 이후 예방정비를 할 수 있는 기간이 기존의 9개월(9월부터 익년 5월까지(가을, 겨울, 봄))에서 약 6개월(9월부터 11월(가을), 3월부터 5월(봄))로 줄어들었다[19-21]. 이에 따라 계획정비 기간에 정비해야할 물량이 1.5배로 늘어났고 결국 계획정비 기간에 속하는 9월의 늦더위로 인해 늘어난 냉방부하를 공급할 수 있는 가동 가능한 설비가 부족하게 되었다는 점에 착안하였다[22]. 따라서 동계피크와 하계피크의 값 차이가 크지 않은 나라의 경우 그렇지 않은 나라보다 예비율이 높을 것이라는 가설을 세웠다.

표 1은 한국의 2003년부터 2011년까지 동계와 하계피크를 비교한 것이다[18]. 2007년까지는 대체로 7% 이상의 차이로 하계 피크가 높았으나 2009년부터는 동계피크와 하계피크가 비슷한 수준에 있으며, 2010년부터는 동계피크가 오히려 하계피크에 비해 약간 커졌다는 것을 알 수 있다.

표 1 한국의 연도별 동계피크와 하계피크 비교

Table 1 Comparison of Winter/Summer peak by Year in Korea

연도	동계피크 (MW)	하계피크 (MW)	동하계 피크차이율(%)
2003년	45,062	47,385	4.9
2004년	46,387	51,264	9.5
2005년	49,990	54,631	8.5
2006년	54,451	58,994	7.7
2007년	55,508	62,285	10.9
2008년	60,947	62,794	2.9
2009년	62,645	63,212	0.9
2010년	71,310	69,890	-2.0
2011년	73,140	72,190	-1.3

한편 변동성 있는 신재생 발전(풍력, 태양광, 조력)의 경우 급전성(dispatchable)이 보장된 수력, 화력, 원자력에 비해 피크 기여율이 현저히 낮은 것이 사실이다. 이에 따라 본 논문은 변동성 있는 신재생(풍력, 태양광, 조력) 용량은 전력예비율 계산에서 아예 배제하였다. 그러나 Chen(2015), 박정제(2008), 박정제(2010)는 신재생발전(풍력, 태양광)의 피크부담 능력 평가방법 또는 신재생을 고려한 적정 설비 예비율 계산방법을 제안한 바 있다 [7,9,23].

2.2 데이터 추출 및 연구방법

2.2.1 데이터 추출 기준

본 논문에서는 OECD Library의 데이터를 이용하였다[4]. OECD 34개국의 2000년부터 2014년까지 15년간의 설비정보(수력, 화력, 원자력, 풍력, 태양광 등)와 최대 수요(피크), 가정용 전기요금, 월별 전력량 데이터를 기반으로 변수 값들을 계산하였다. 다만, 1인당 GDP는 세계은행의 GDP 자료와 OECD Library의 나라별 연도별 인구자료를 활용하였다. GDP값은 2010년 미국 달러로 고정된 구매자 가격 기준이다.

OECD 34개국 중에서 캐나다는 최대수요 데이터가 전혀 없어 예비율을 계산할 수 없었고, 핀란드는 예비율이 대부분 마이너스(-) 값이며, 칠레는 2014년 예비율이 109.7%로서 예비율이 이상치(outlier) 기준 이상으로 너무 높으며, 아이슬란드와 룩셈부르크는 가정용 전기요금 데이터가 전혀 없고, 이스라엘은 월별 전력량 데이터가 없어서 동하계 피크차이율을 계산할 수 없었으므로 6개국을 제외하고 나머지 28개국만을 대상으로 분석하였다. 세부 국가 목록은 표 3에 기술된 바와 같다.

한편 최대수요 데이터가 없어서 일부 년도가 누락된 국가들과 누락년도는 다음과 같다. 오스트리아(2000년), 에스토니아(2000~2003년), 독일(2002~2007년), 이탈리아(2000~2004년), 네덜란드(2000~2004년), 미국(2000년)의 총 22개 데이터 라인이 누락되었다. 또한 월별 전력량 데이터가 없어서 동하계 피크차이율 변수 값을 계산하지 못하므로 일부 년도가 누락된 국가들과 누락년도는 다음과 같다. 에스토니아(2004~2007년), 슬로베니아(2000~2008년)의 총 13개 데이터 라인이 누락되었다.

또한 스페인(2012~2014년), 스웨덴(2000~2006년)은 괄호 안의 기간 동안 가정용 전기요금 데이터가 누락되어 전년도 또는 후년도 값으로 동일하게 채워 넣었다.

결과적으로 총 385개의 국가별 연도별 데이터로 패널을 구성하였다.

2.2.2 분석모형

본 논문의 각 독립변수가 실제 종속변수인 전력예비율에 미치는 영향을 분석하고자 하는 것이다. 이에 따라 각 독립변수가 가지는 특성을 다중회귀모형으로 분석해 보았다.

$$\text{reserve_rate} = \alpha + \beta_1 \times \text{tariff} + \beta_2 \times \text{renewable_rate} + \beta_3 \times \text{gdppc} + \beta_4 \times \text{sumter_y7} \quad (2)$$

종속변수 : reserve_rate(전력예비율)

독립변수 :

- tariff : 가정용 전기요금(\$/MW)

- renewable_rate : 변동성 있는 신재생 점유비율(풍력, 태양광, 조력)

- gdppc : GDP Per Capita, 1인당 GDP(\$)

- sumter_y7 : 동하계 피크차이율(7% 이상은 상한 처리)

종속변수인 전력예비율은 식 (1)과 같이 연도별 설비용량과 최

대부하의 관계식으로 계산하되, 변동성이 크고 제어가 불가능하여 피크 기여율이 낮은 신재생발전(풍력, 태양광, 조력)은 전력예비비율 계산에서 제외하였다.

첫 번째 독립변수인 가정용 전기요금(변수명 tariff)은 OECD 자료를 활용하였다. 한편 우리나라에서 가정용 보다 전력 사용량 점유율이 높은 산업용 전기요금을 독립변수로 고려해 볼 때, OECD 통계에서 가정용 대비 산업용 전기요금이 평균 60% 수준 밖에 되지 않는 것이 문제로 작용하였다. 다수의 OECD 국가에서 산업용 전기요금에 대해 보조금 성격의 요금정책을 취하고 있어 인과관계를 연구하는 통계분석에 오류가 발생할 우려가 있으며, 실제 산업용 전기요금을 독립변수로 반영하여 패널 분석을 실행해 본 결과 90% 신뢰수준에서 유의하지 않은 것으로 판명되어 본 논문에서는 가정용 전기요금을 변수로 채택하였다.

두 번째 독립변수인 신재생 점유비율(변수명 renewable_rate)은 전력예비율 계산에서 제외했던 변동성 있는 신재생인 풍력, 태양광, 조력의 용량 합계를 전력예비율 계산 시 사용한 설비용량(화력, 수력, 원자력, 바이오, 지열 등)에 대한 비율로 계산하였다. 따라서 풍력, 태양광 등의 재생발전 설비용량이 화력 등 일반 발전 설비용량의 2배라면 신재생 점유비율은 200%가 되는 방식이다. 바이오발전, 지열, 수력 등 통상 신재생으로 분류되기는 하지만 급전 가능한(dispatchable) 재생에너지는 전력예비율 계산시의 설비용량에 포함시켰다.

$$\text{신재생 점유비율} = \frac{\text{변동성 신재생발전 설비용량 합계}}{\text{변동성 신재생 제외 나머지 발전설비용량 합계}} \times 100\% \quad (3)$$

한편 대부분의 국가는 신재생을 전력회사 설비로 분류하기도 하지만, 일본, 멕시코의 경우처럼, 대부분의 신재생 설비용량이 고객소유로 분류되는 경우가 있다(표 2 참조).

표 2 국가별 신재생 발전설비 소유구분 (2014년, MW)

Table 2 Ownership of renewable generation facilities by country (2014, MW)

구분	일본	멕시코	벨기에	호주
전력회사 소유	111	603	1,926	3,801
고객 소유	25,981	2,065	3,027	4,004
합계	26,092	2,668	4,953	7,805

따라서 전력회사 소유이거나 고객 소유이거나 관계없이 바람과 햇빛에 의해 자연적으로 구동되어 전력계통으로 전기를 보내는 신재생의 특성을 고려하여 고객소유 신재생발전 설비용량도 포함하여 신재생 용량으로 산정하였다. 단, 고객소유의 기타 발전설비는 고객의 임의로 가동하는 것으로서 본 논문의 전력예비율 및 신재생 점유비율 계산 시에 제외하였다.

세 번째 독립변수인 1인당 GDP는 Sadorsky(2009), Apergis(2010), Menegaki(2011), Lotz(2016), Bhattacharya (2016), Ito(2017) 등 다른 선행 논문에서 경제성장률을 나타내는 대체변

수로서 자주 사용되었으며[11-16], 본 논문은 독립변수로서 뿐만 아니라 표 4의 OECD 내에서 4만불 이상의 국가와 4만불 미만의 국가들을 구분하는 기준으로도 사용하였다.

네 번째 독립변수인 동하계 피크차이율(변수명 Sumter_y7)의 경우 각 국가의 연도별 하계, 동계 피크 데이터를 확보하기 어려워 동계(12, 1, 2월) 월간 전력사용량 3개 중 최대값과 하계(6, 7, 8월) 월간 전력사용량 3개 중 최대값을 대체변수로 선정하고 그 값의 차이율을 변수 값으로 적용하였다.

$$\text{즉, 동하계 피크차이율} = \frac{\text{Abs(동계와 하계의 월별 전력사용량 최대값 차이)}}{\text{동계와 하계 월별 전력사용량 6개 중 최대값}} \times 100\% \quad (4)$$

따라서 동계, 하계의 피크값의 차이가 크면 변수값이 크고 동

표 3 패널분석 대상 28개국 적용 변수값 (2014년도)

Table 3 Applied variable values of 28 countries (2014)

(unit : %, dollar)

국가	예비율	전기요금 (MW)	신재생 점유율	1인당 GDP	동하계피크 차이율
호주	33.5	258	12.7	54,362	5.91
오스트리아	86.4	267	13.2	47,175	1.62
벨기에	14.8	244	25.4	44,630	7.00
체코	63.4	174	11.7	20,203	7.00
덴마크	27.9	403	42.0	59,256	7.00
에스토니아	76.4	169	11.1	17,302	7.00
프랑스	33.1	207	12.0	42,813	7.00
독일	40.5	395	41.1	44,596	7.00
그리스	52.0	236	24.9	21,736	7.00
헝가리	27.2	158	4.7	14,118	7.00
아일랜드	43.8	305	25.3	51,199	7.00
이탈리아	75.4	307	23.2	34,295	7.00
일본	47.1	253	10.0	46,145	4.87
대한민국	11.6	110	3.6	24,498	4.69
멕시코	33.6	90	4.7	9,493	7.00
네덜란드	37.1	252	14.7	50,424	7.00
노르웨이	28.0	127	2.7	89,027	7.00
뉴질랜드	36.0	236	7.4	35,557	7.00
폴란드	22.4	192	11.3	13,987	7.00
포르투갈	43.6	292	30.6	21,389	7.00
슬로바키아	66.1	214	7.3	17,925	6.09
슬로베니아	53.9	213	6.9	23,159	0.51
스페인	97.6	295	28.2	29,468	1.63
스웨덴	35.6	214	13.3	53,599	7.00
스위스	74.7	209	6.3	75,422	7.00
터키	60.6	169	5.3	13,312	7.00
영국	34.7	256	20.2	40,370	7.00
미국	23.8	125	7.7	50,918	6.49
평균	45.7	228	15.3	37,371	6.14

계, 하계 피크값의 차이가 작은 동하계 동시피크의 경우 변수값이 작아지도록 설정되었다.

또한 이 변수는 동하계 피크 차이가 작은 동하계 동시피크의 경우에는 예방정비에 어려움이 있어 설비량을 늘릴 필요가 있지만 동하계 피크 차이가 상당히 큰(하계 단독 피크 등) 경우에는 예방정비에 문제가 없으므로, 동하계 피크 차이가 작은 경우에만 유효한 것으로 산정하였다. 변수의 유효성을 차이 비율(0~10%)에 따라 단계별로 검토해 본 결과 차이비율이 7% 이하인 경우에 변수가 유효한 것으로 분석되어 변수의 최대치를 7%의 상한 캡을 씌워 적용하였다.

28개국 15년 치의 변수 값들을 논문에 모두 표시할 수는 없지만 독자들의 이해를 돕기 위해 가장 최근 적용년도인 2014년의 각 국가별 변수 값을 표 3에 제공하였다.

표 3에서 보는 바와 같이, 대한민국은 2014년 기준으로 28개 대상국가 중 설비 예비율이 가장 낮았으며 가정용 전기요금은 강력한 누진제를 운영 중인 멕시코에 이어 두 번째로 저렴하였다. 또한 신재생(풍력, 태양광) 점유비율도 발전설비 중 수력 점유율이 98%에 달하는 노르웨이를 제외하고는 가장 낮았다.

해외 예비율 기준과 사례를 살펴보면, 미국의 장기 전력수급 전망 및 전력수급 안전성 평가를 받고 있는 북미 전력안전성협회(NERC: North America Electric Reliability Corporation)에서 권고하는 기준 전력예비율은 15%이며[24], ENTSO-E(European network of transmission system operators for electricity)에서 발표한 유럽의 공급예비율 전망에 따르면 2014년에는 21.7%로 목표치를 설정한다고 되어있으나[25], 표 4에서 보는 바와 같이 OECD 통계의 설비용량과 피크 값으로 계산할 때, 변동성 신재생(풍력, 태양광)은 예비율 계산시 설비용량에서 제외하였음에도 불구하고 미국은 23.8%, 프랑스, 독일, 영국 등 유럽 대부분의 국가들은 30% 이상의 예비율을 보이고 있어 권고치와 실제 운영 사이에 괴리가 있는 것으로 보인다. 보다 정확한 인과관계 분석을 위해서는 괴리의 원인에 대한 상세한 검토가 필요하다고 사료된다.

표 3에서 보이는 2014년 동하계 피크 차이율의 경우 7% 미만의 값을 보이는 국가가 8개국 밖에 없으나, 2000년부터 총 15년의 기간 중 1번 이상 7% 미만의 값을 보이는 국가는 15개국으로서 유의미한 통계를 낼 수 있는 숫자라고 생각된다.

또한 연구목적을 살리기 위해 1인당 GDP 4만불 이상 국가와 4만불 미만 국가들의 변수값 평균을 아래 표 4에 제공하였다.

표 4 분석대상 국가들을 구분하여 평균 비교 (2014년)

Table 4 Average comparison of segments(2014)
(unit : %, dollar)

GDP 그룹구분	예비율	전기 요금 /MW	신재생 점유 비율	1인당 GDP	동하계 피크 차이율
4만\$ 이상 14개국	40.1	251	17.6	53,567	6.35
4만\$ 미만 14개국	51.4	204	12.9	21,174	5.92

표 4에서 보는 바와 같이, 4만불 미만 국가들의 예비율이 4만불 이상 국가들보다 11% 이상 높았다. 반면 4만불 이상 국가들의 가정용 전기요금이 4만불 미만 국가에 비해 25%이상 높았고, 신재생설비 점유비율도 5%가량 높았다. 1인당 GDP 평균은 약 2.5배였다. 동하계 피크차이율의 경우 7% 이상의 값은 모두 7%로 캡(상한)을 씌운 것이므로 평균값 자체는 큰 의미가 없다고 사료된다.

2.3 분석방법론

먼저 일반적인 패널분석 기법인 패널 고정효과(Fixed Effect, FE)와 패널 임의효과(Random Effect, RE)를 비교하였다. 표 5에서 보는 바와 같이 Hausman test에 의해 귀무가설인 임의효과(RE)가 1% 유의수준에서 기각됨에 따라 고정효과(FE) 모델을 사용하였다[26]. 사실 전력 예비율의 경우 해당 국가의 발전 설비량과 피크값을 사용하므로 국가들 간의 영향이 크지 않고 OECD 개별 국가들의 특색이 상당하므로 패널 고정효과(FE)가 가장 적합하다고 판단된다.

2.4 분석결과

종속변수 1개, 독립변수 4개에 대해 E-views의 패널 고정효과(FE) 모델을 적용하여 표 5와 같은 결과를 얻었다.

표 5 패널 고정효과 적용 결과

Table 5 The result of panel fixed effect

	Variables	Coefficient
1	Tariff	0.0354**
2	Renewable_rate	0.5059***
3	Gdppc	-0.0013***
4	Sumter_y7	-0.6112**
	Constant	80.742
	Hausman	0.0007

*, **, ***는 차례대로 10%, 5%, 1%의 통계적 유의성을 의미한다.

표 5에서 보는 바와 같이 독립변수 4개 모두 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 판명되었다. 또한 수정된 R-squared 값도 0.83으로 설명력이 높은 것으로 판단된다.

따라서 전력예비율을 결정하는 함수는 다음과 같이 설정될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{reserve_rate} = & 80.742 + 0.0354 \times \text{tariff} + 0.5059 \times \\
 & \text{renewable_rate} - 0.0013 \times \text{gdppc} \\
 & - 0.6112 \times \text{sumter_y7} \quad (5)
 \end{aligned}$$

1) 전기요금은 전력예비율과 양(positive)의 인과관계가 있다. 전기요금이 높으면 에너지를 절감하게 되고 에너지절감은 피크(최대수요)를 낮추어서 전력예비율이 올라가게 된다. 이것은 제6차 전력수급계획의 '최근 전력수급 불안요인 분석'에서 언급된 '높은 전력수요는 상대적으로 낮은 전기요금 등에 기인'

하며 '중요한 수요관리 수단인 전기요금 현실화 및 전기요금 체제 개편 등을 통한 수요감축 노력이 상대적으로 부족' 했다는 내용과 맥을 같이하는 결과이다[27].

- 2) 신재생 점유비율은 전력예비율과 양(positive)의 인과관계가 있다. 신재생 발전은 구름, 바람 등 자연적 요소에 따라 변동되므로 통제할 수 없기는 하지만 신재생 비율이 높으면 피크 시에도 신재생 발전이 전력생산에 어느 정도 기여를 하여 최대수요(피크)를 낮추고 예비율은 올라가게 된다. 한편 이것은 박정제(2010) 논문에서 언급된 바와 같이 신재생 발전기가 일정 부분 전력생산에 기여하고 있으나 이에 대한 실질적 기여도 계산 방식이 필요하다는 점과 패를 같이 한다[9].
- 3) 1인당 GDP와 전력 예비율은 음(negative)의 인과관계를 가진다. 1인당 GDP 값이 낮은 후발국가들은 경제성장이 빠르기 때문에 급증하는 수요에 대비하기 위해 상대적으로 예비율이 높게 된다. 한편 이것은 박정제(2008) 논문에서 언급된 GNP가 상승할수록 IRR(전력예비율)이 작아진다는 사실과 동일한 결과를 얻었음을 알 수 있다[7].
- 4) 동하게 피크차이율은 전력예비율과 음(negative)의 인과관계를 갖는다. 동하게 피크의 차이가 작으면 계획정비(overhaul) 시에 동계·하계 피크를 모두 대비할 수밖에 없고, 계획정비를 할 수 있는 기간이 대폭 줄어들어서(9개월 → 6개월) 상대적으로 짧은 기간에 많은 설비가 계획정비에 들어가게 돼서 급전 가능한 설비의 부족을 겪게 된다. 따라서 추가 설비용량 확보가 필요하므로 발전설비 건설이 늘어나게 된다. 결과적으로 동하게 피크차이율이 낮은 국가의 전력예비율은 올라가게 된다.

변수별 영향력을 설명하자면, 가정용 전기요금(tariff)이 MW당 1\$(kW당 약 1.1원) 오르면 예비율은 0.035% 올라가게 되며, 신재생 점유비율이 1% 증가하면 예비율은 0.51% 증가하는 경향이 있다. 반대로 1인당 GDP가 10,000\$ 증가하면 예비율은 13% 감소하며, 동하게 피크차이율이 0~7% 이내의 범위에 있으면 동하게 피크차이율이 1% 줄어든 때마다 예비율은 0.61% 증가하는 경향이 있다. 즉, 동하게 피크차이율이 0~7%의 범위를 가지므로 베타값 -0.61을 적용하면 최대 4.3%의 편차를 가지게 된다. 따라서 동계와 하계의 피크가 동일한 국가는 하계피크 만을 경험하는(동계와 7% 이상 차이) 국가에 비해 약 4.3% 더 높은 예비율을 가질 필요가 있다. 참고로 OECD 데이터에서 동하게 피크 차이가 15개년 중 1년이라도 7% 이내로 나타난 15개 국가들과 15년간 한번도 7% 이내로 내려가지 않은 13개 국가들을 구분하여 각각 예비율을 평균하였을 때, 전자의 예비율이 약 7% 높은 것으로 나타났다.

상기 변수별 영향력은 한국의 경우로 볼 때, 전기요금(가격)을 10%(kW당 11원) 올려도 예비율은 0.35% 밖에 올라가지 않는데 비해 신재생 점유비율을 10% 올리면 예비율이 5.1%나 올라간다. 신재생 점유비율의 영향력이 가격(전기요금)보다 10배 이상 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 신재생 점유비율은 가동 여부가 명확하지는 않지만 매년 실질적인 설비용량으로 작용하는 반면, 전기요금의 경우 전기요금이 급격히 인상되면 사용량이

줄어들어 단기적으로는 예비율이 어느 정도 올라가겠지만 장기적으로는 발전설비에 대한 신규투자의 필요성이 줄어들어 몇 년 후 예비율은 과거와 비슷한 수준에 머물 것이라는 점을 반영하고 있다.

3. 결 론

한국은 2011년 이전에는 확률론적 신뢰도 관점의 LOLP 기준으로 1년에 0.5일까지는 정전이 허용된다는 전제에서 전력예비율을 15% 정도로 운영해왔으나, 2011년 9월 15일 순환정전 이후에는 기준 전력예비율을 22%로 정하여 과거에 비해 다소 증가시킨 방향으로 산정해왔다.

본 논문에서는 OECD 국가들의 전력설비 및 피크 현황 데이터를 기반으로 패널 분석 기법과 E-views 통계 방법론을 적정 예비율 산정에 적용하여 회귀분석 계수를 도출하였다.

종속변수인 전력 예비율에 영향을 미치는 전기요금, 신재생 점유비율, 1인당 GDP, 동하게 피크차이율의 4개 독립변수의 유효성을 분석하였다. 그 결과 독립변수 4개 모두 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 판명되었으며, 가정용 전기요금이 kW당 1.1원 오르면 예비율은 0.035% 올라가게 되며, 신재생 점유비율이 1% 증가하면 예비율은 0.51% 증가하는 경향이 있고, 반대로 1인당 GDP가 10,000\$ 증가하면 예비율은 13% 감소하는 경향이 있다는 것을 분석했다.

또한 동하게 피크차이율이라는 새로운 변수를 개발하였으며, 동계와 하계의 피크가 비슷한 국가는 하계피크 만을 경험하는 국가에 비해 약 4.3% 높은 예비율을 가져야 한다는 점을 반증하였다.

결론적으로 우리나라는 OECD 국가 중 전력예비율이 가장 낮은 편에 속하는데, 그 이유는 신재생이 상대적으로 작고, 전기요금이 저렴하며, 1인당 GDP가 낮은 편이기 때문이라고 생각된다. 반면 우리나라는 2008년 이후 동하게 동시피크가 발생되고 있었으므로 전기요금을 인상하는 등 정책적 수단을 사용하여 과거년도 대비 예비율을 더 올렸어야 함에도 그러지 않았기 때문에 2011년 전력부족 사태를 경험한 것으로 사료된다.

표 3에서 보는바와 같이 우리나라는 다른 OECD 나라들과 비교할 때 상당히 전력 예비율이 낮아 계통운영의 안정성이 우려되는 측면이 있다. 하지만, 한국정부와 전력거래소는 2018년 1월 12일 동계 최대부하 시에 수요 감축 프로그램을 통해 약 4.3GW의 피크를 감축한 바 있으며[28], 2013년 하계 피크 시에도 약 7.3GW(최대수요의 10%, 원자력 발전소 7대 분량)를 수요관리로 줄인 바 있다[29]. 따라서 다른 국가에 비해 예비율이 다소 낮더라도 피크 시 수요관리 체계가 잘 준비되어 있다면 안정적으로 전력계통을 운영할 수 있다고 말할 수 있으나 이에 대한 OECD 국가별 데이터가 없어 변수로 적용하기는 어려운 측면이 있다.

또한 최근 의료장비, 첨단 생산설비 등 단 한순간이라도 정전이 발생하면 막대한 피해를 입게 되는 설비들이 늘어나고, 사회 전반에 에너지의 전기화 현상이 심화되고 전기에 대한 의존도가 높아지면서 전 세계적으로 과거보다 강화된 공급신뢰도를 요구하는 경향이 있을 수 있다. 이런 요소가 전력 예비율 운영에 미치는 영향에 대해 연구할 필요가 있다.

한편 본 논문의 한계로서, 국가별 동계, 하계 피크 데이터를

따로 구할 수 없어서 국가별 월별 전력사용량을 대체변수로 사용한 점을 들 수 있다. 8월의 어느 한 시점에 최대피크가 발생했다고 해서 8월 전체의 전력사용량이 많다는 것을 담보할 수 없고 그 반대의 경우도 마찬가지이기 때문이다. 다만 제6차 전력수급 계획에 언급된 바, “최대수요 연평균 증가율은 전력소비량 연평균 증가율과 깊은 상관이 있다.”는 점에서[27], 해당 대체변수 적용은 타당하다고 사료된다.

References

- [1] Il-Chong Nam, “Competition Policy for the Electricity Industry of Korea”, *Korea Development Institute Research Report*, 2012.
- [2] Rules for Electricity Market Operation, Korea Power Exchange, 2017.
- [3] Su-Hyun Nam, “Estimation of Optimal Power Reserve Ratio Reflecting Empirical Approach”, *Yonsei University, Electrical Engineering Master Thesis*, 2015.
- [4] OECD statistics http://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/iea-electricity-information-statistics_elect-data-en
- [5] Shuyun Ren, Tsan-Ming Choi, “Selection and Industrial Applications of Panel Data Based Demand Forecasting Models”, *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 116, pp.1131-1159, 2016.
- [6] Jun-Woo Noh, Mun-Kyeom Kim, Chang-Seok Oh, Yi-Kyung Chyun, Jong-Kuen Park, “The Investigation of the Adequate Reserve Margin in the Korean Power System : A Project Review”, *The Korean Institute of Electrical Engineers Autumn Conf.*, pp. 348-350, 2008.
- [7] Jeong-Jae Park, Jae-Seok Choi, Yong-Bum Yun, Young-Bum Jung, “A Study on Decision of Optimum Installed Reserve Rate Using Probabilistic Reliability Criterion”, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, 57(8), pp. 1318-1326, Aug. 2008.
- [8] “Eighth Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2017-2031)”, *Ministry of Commerce, Industry and Energy*, Dec. 2017.
- [9] Jeong-Je Park, Jae-Seok Choi, “Development of Methodology of New Effective Installed Reserve Rate Considering Renewable Energy Generators”, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 59(1), pp. 26-32, Jan. 2010.
- [10] Tae-Yun, Woo, “Estimation of Optimum Power Reserve Rate through Analysis of Power Demand”, *Yonsei University GBI MBA Project Report*, 2016.
- [11] P. Sadorsky, “Renewable Energy Consumption and Income in Emerging Economies”, *Energy Policy*, Vol. 37, pp. 4021-4028, 2009.
- [12] N. Apergis, J. E. Payne, K. Menyah, Y. Wolde-Rufael, “On the Causal Dynamics between Emissions, Nuclear Energy, Renewable Energy, and Economic Growth”, *Ecological Economics*, Vol. 69, Issue 11, pp. 2255-2260, 2010.
- [13] Angeliki N. Menegaki, “Growth and Renewable Energy in Europe : A Random Effect Model with Evidence for Neutrality Hypothesis,” *Energy Economics*, Vol. 33, Issue 2, pp. 257-263, 2011.
- [14] Roula Inglesi-Lotz, “The Impact of Renewable Energy Consumption to Economic Growth : A Panel Data Application”, *Energy Economics*, Vol. 53, pp. 58-63, 2016.
- [15] Mita Bhattacharya, Sudharshan Reddy Paramati, Ilhan Ozturk, Sankar Bhattacharya, “The Effect of Renewable Energy Consumption on Economic Growth : Evidence from Top 38 Countries”, *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 733-741, Jan. 2016.
- [16] Katsuya Ito, “CO2 Emissions, Renewable and Non-renewable Energy Consumption, and Economic Growth : Evidence from Panel Data for Developing Countries”, *International Economics*, Vol. 151, pp. 1-6, Oct. 2017.
- [17] Jeayoon Kim, Kwangwoo Park, “Financial Development and Deployment of Renewable Energy Technologies”, *Energy Economics*, Vol. 59, pp. 238-250, 2016.
- [18] Jin-Hyun Han, “A Study on the Forecast of Korean Peak Demand for Electricity and its Determinants”, *Seoul National University of Science and Technology, Doctoral Dissertation*, 2010.
- [19] “9.15 Circulation Electricity Outage is on the Chopping Board Again. KEPCO, Power Generation Companies, and Korea Power Exchange is Receiving State Affairs Audit. And Winter Electricity Supply and Demand is Emergency”, *Energy News*, Dec 13. 2012.
- [20] Lim Jae-gyu, “Preparation for Electricity Supply in Winter Season for 2011~2012”, p. 41, *Korea Energy Economics Institute*, Dec. 2011.
- [21] Seok Kwang-Hoon, Lee Yu-Jin, Han Jae-Kag, Lee Bo-a, “A Roadmap for Denuclearization and Energy Conversion”, *Green Party Korea, Energy Climate Policy Institute*, p. 37, 2012.
- [22] “Korea’s the First Circulation Electricity Outage is Caused by the Failure of Forecast Demand,” *Yonhap News*, Sept 15. 2011.
- [23] Zhi. Chen, Lei. Wu, Shahidehpour. M, “Effective Load Carrying Capability Evaluation of Renewable Energy via Stochastic Long-term Hourly Based SCUC”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 1, pp. 188 - 197, Jan. 2015.
- [24] 2012 Long-Term Reliability Assessment, NERC(North American Electric Reliability Corporation), Nov. 2012.

- [25] European Network of Transmission System Operators for Electricity <https://www.entsoe.eu/publications/statistics/statistical-yearbooks/Pages/default.aspx>.
- [26] W.H. Green, *Econometric Analysis*, 5th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey . 2003.
- [27] "Sixth Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2013-2027)," *Ministry of Knowledge Economy*, Feb. 2013.
- [28] "Pay Attention to 'DR System' Which is Compensated As Much As Electricity Saving", *E-News today*, Feb 6. 2018.
- [29] "The Second Day of Electric Power Crisis... 'Preparation Phase'", *Chung-cheong Daily*, Aug 13. 2013.

저 자 소 개



이 중 호 (Jung-Ho Lee)

1966년 6월 28일생. 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학 석사 취득. 2016년 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 박사과정 수료.
Tel : 054-970-3200
E-mail : ljh0628@kepcoco.kr



박 경 민 (Kyung-Min Park)

1968년 1월 14일생. 1989년 서울대학교 경영학과 졸업. 1991년 KAIST 경영과학 석사 취득. 2005년 INSEAD 경영대학원 박사 취득. 2006년~현재 연세대학교 경영대학 경영학과 교수
Tel : 02-2123-5488
E-mail : kminpark@yonsei.ac.kr



박 중 구 (Jung-Gu Park)

1957년 5월 20일생. 1980년 서울대학교 경제학과 졸업. 1993년 미국 Northern Illinois Univ. 경제학 석사, 박사 취득. 2005년~현재 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 교수
Tel : 02-970-6596
E-mail : pjg@seoultech.ac.kr