

온도변동성을 고려한 전력수요예측 기반의 확률론적 수요관리량 추정 방법

A Stochastic Planning Method for Demand-side Management Program based on Load Forecasting with the Volatility of Temperature

위 영 민*
(Young-Min Wi)

Abstract – Demand side management (DSM) program has been frequently used for reducing the system peak load because it gives utilities and independent system operator (ISO) a convenient way to control and change amount of electric usage of end-use customer. Planning and operating methods are needed to efficiently manage a DSM program. This paper presents a planning method for DSM program. A planning method for DSM program should include an electric load forecasting, because this is the most important factor in determining how much to reduce electric load. In this paper, load forecasting with the temperature stochastic modeling and the sensitivity to temperature of the electric load is used for improving load forecasting accuracy. The proposed planning method can also estimate the required day, hour and total capacity of DSM program using Monte-Carlo simulation. The results of case studies are presented to show the effectiveness of the proposed planning method.

Key Words : Demand-side management, Load forecasting, Temperature stochastic modeling

1. 서 론

최근 국내 전력수급은 지속적으로 증가하는 전력수요와 전기 설비 투자 미비로 인해 어려움을 겪고 있다. 사회·환경적 문제로 인해 대규모 전원 및 송·변전 설비의 입지 및 투자 확보가 어렵다. 또한 안전과 환경적 문제로 기존 전력수급의 가장 큰 역할을 해온 원전에 대한 투자가 힘들어진 환경이다. 위와 같은 환경에서 전력수급 개선을 위해 전기에너지 사용의 효율화와 신재생에너지원에 대한 관심과 투자가 높아지고 있다.

이러한 환경에서 스마트그리드는 전력수급 개선 및 전기에너지 사용 효율화를 위해 대두되었다. 스마트그리드 환경이 구축되었을 경우, 전기에너지원의 다각화와 전기에너지 사용 효율화 및 정보기술을 이용하여 다양한 전기에너지 서비스가 가능할 것으로 예상되며 또한 이를 통해 현재의 전력수급 문제를 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 스마트그리드 환경을 구축되기 전 현실적으로 안정적 전력수급을 위한 가장 높은 활용성을 보이는 방법은 수요관리이다. 수요관리란 인센티브 혹은 요금제를 이용하여 전기에너지 소비자의 사용 패턴의 영향을 주는 것으로 정의할 수 있다[1][2].

실제로 국내 전력수급을 담당하는 한국전력거래소와 한국전력

은 안정적 전력수급을 위해 수요관리를 적극 활용하고 있다. 최근 들어 한국전력거래소는 정부의 6 대 에너지 신산업 창출 정책에 따라 수요자원 거래시장을 개설하였으며 수요자원에 대한 감축 테스트를 진행하였다.

수요자원 시장과 같이 수요관리를 효율적으로 운용하기 위해서는 수요관리량에 대한 사전 예측이 필요하다. 하지만 필요한 수요관리량 추정 방법에 대한 체계적인 연구가 부족하다. 또한 기존의 방법은 확정적 전력수요 예측에 기반을 하고 있기 때문에 기상 변화에 따른 예측 오차에 대한 대응이 떨어질 수 있다.

수요관리량 추정을 위해서 무엇보다 중요한 것은 수요관리 기간에 대한 전력수요예측의 정확성 확보이다. 수요관리 프로그램들은 수요관리 기간을 수 개 월에서 1년 이내로 계획하고 그에 적합한 수요자원을 발굴한다. 따라서 수요관리 프로그램 설계를 위한 전력수요예측의 예측기간도 이를 따라야 한다. 1년 이내의 전력수요예측에서 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나는 기상현상이다. 하지만 수 개 월 후의 기상 예측을 정확히 한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이다.

본 논문에서는 이를 극복하기 위해 날씨파생상품에서 사용하는 확률론적 온도모델링을 전력수요예측에 적용하여 수요관리 프로그램 설계를 위한 전력수요 예측 모형을 제안하였으며 이를 이용하여 필요한 수요관리량을 확률론적으로 추정할 수는 기법을 연구하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 수요관리 프로그램에 대한 소개와 설계를 위해 필요한 요소기술에 대해 설명하며 3장에서는 제안된 수요관리량 추정 방법을 온도변동성을 고려한 전력수요예측 기반의 확률론적 수요관리량 추정 방법을

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

E-mail: ymwi@gwangju.ac.kr

Received : January 07, 2015; Accepted : May 28, 2015

소개한다. 사례연구에서는 2013년 하계 전력수요 피크 기간(7, 8월)에 제안된 방법을 적용하여 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 수요관리 프로그램 설계

최근 들어 환경적 제약과 사회 문제로 전력공급설비에 투자가 현실적 어려움이 있으며 그로 인해 전력수급 안정을 위해 소비자 측면에서 전기에너지 사용의 효율화를 높이는 방향으로 정부와 전력회사들의 노력이 이루어지고 있다. 전력부하관리포털에 따르면 수요관리란 최소의 비용으로 소비자의 전기에너지 서비스 욕구를 충족시키기 위하여 소비자의 전기사용 패턴을 합리적인 방향으로 유도하는 것으로 이는 전력수급을 위해 기존의 전력공급설비 확충에 중점을 주어 온 종전의 공급자 측면에 대응되는 개념이다[3].

국내의 수요관리 프로그램 중 한국전력에 운영하는 지정기간 수요조정제도와 주간예고 수요조정제도가 수요관리의 큰 비중을 차지하고 있으며 한국전력거래소의 수요자원시장 또한 도입되고 있다 [3]. 특히 국내의 경우 전기에너지 요금의 탄력적으로 운영되지 않기 때문에 요금 기반의 수요관리 프로그램을 확대하기에는 구조적 어려움이 있다. 따라서 국내의 환경에서는 인센티브 기반 수요관리 프로그램의 효율적 운영을 통해 안정적 전력수급을 도모하고 있다.

인센티브 기반 수요관리 프로그램 설계를 위해서 가장 중요한 것은 수요관리가 적용될 기간에 필요한 수요관리량을 산정하는 것이다. 왜냐하면 필요한 수요관리량에 따라 수요관리 자원을 모집하고 사전계약을 해야 하기 때문이다. 하지만 필요한 수요관리량을 추정하는 것은 미래의 전력수요와 전력공급설비의 상황을 알아야만 가능하다. 특히 수요관리가 적용될 기간에 대한 전력수요를 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 수요관리가 적용될 기간의 전력수요 예측의 경우 몇 주에서 몇 달 후 미래를 예측하는 것이기 때문에 기상의 영향을 많이 받는다. 하지만 기상을 정확히 예측하는 것은 전력수요를 예측하는 것보다 어려운 문제이기 때문에 수요관리 기간에 대한 정확한 전력수요 예측은 현실적으로 매우 어렵다.

본 논문에서는 기상 변동성에 따른 수요관리 프로그램이 적용될 기간의 전력수요 예측 어려움을 극복하기 위해 확률론적 접근 방법을 제안한다. 가까운 미래의 전력수요 예측에서 기상 요소 중 가장 영향을 많이 주는 요소는 온도이다. 따라서 제안된 방법에서는 온도의 확률론적 모형을 적용하여 수요관리 기간의 전력수요 예측을 진행하였다. 확률론적 온도 모형은 최근 기상과생상품을 설계할 때 많이 사용되고 있다. 또한 제한된 방법에서는 몬테칼로 시뮬레이션을 적용하여 필요한 수요관리량의 확률분포를 만들어내며 정규분포 모형을 적용하여 수요관리량에 대한 신뢰구간에 대한 추정된 정보를 만들어 낸다. 제안된 방법에서 수요관리량 정보는 수요관리 적용 시간, 일수, 총량을 포함하고 있으며, 세 가지 지표에 대한 확률론적 추정값을 제공할 수 있다

3. 온도변동성을 고려한 전력수요 예측 기반의 확률론적 수요관리량 추정 방법

본 논문에서는 수요관리량 추정을 위한 확률론적 전력수요예

측 및 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 확률분포 추정 절차를 제안하였고 그림 1은 제안된 방법의 절차를 보여준다.

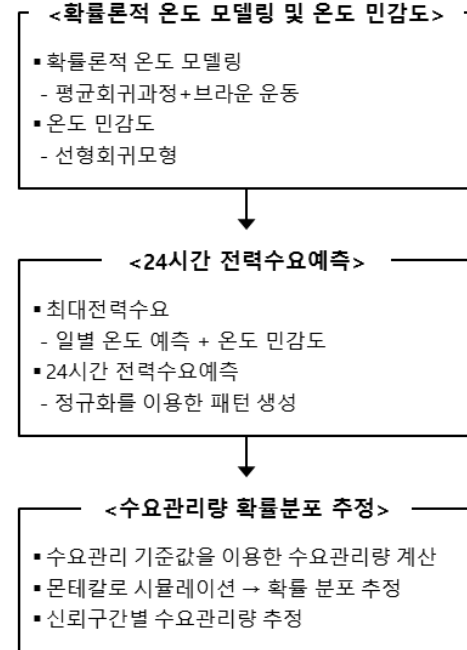


그림 1 제안된 확률론적 수요관리량 추정 절차

Fig. 1 Block diagram of the proposed stochastic planning method for DSM program

3.1 확률론적 온도 모델링 및 온도 민감도

본 논문에서 제안된 전력수요 예측 방법은 전력수요의 온도민감도를 이용한 예측이다. 따라서 예측하는 시점과 예측하는 날의 온도와 전력수요의 온도민감도가 필요하다. 제안된 방법에서는 예측하는 기간의 일별 온도를 예측하기 위해서 날씨파생상품에서 사용하는 확률론적 온도 모델링 기법을 사용한다. 온도의 경우 계절에 따른 평균으로 회귀하는 특성의 주기성과 장기 평균을 반영할 수 있는 수학적 모델이 필요하다. 아래의 수식은 온도의 주기성과 장기평균을 반영한 평균회귀과정(mean-reverting process)을 포함한 브라운 운동 (brown motion) 모형을 나타낸다[4][5].

$$\begin{aligned}
 T_d &= A \times Bt + C \sin(\omega d + \phi) \\
 \frac{dT_d^m}{dt} &= B + \omega C \cos(\omega d + \phi) \\
 dT_d &= \left\{ \frac{dT_d^m}{dt} + a(T_d^m - T_d) \right\} dt + \sigma_d dW_d
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 T_d 와 T_d^m 는 d 번째 날의 온도와 장기평균 온도값이며 $A, B, C, \alpha, \phi, \omega$ 는 모델 파라미터이다; σ_d 와 dW_d 는 온도

변동성과 위너프로세스를 의미한다.

온도민감도 계수를 추정하기 위해서 제안된 방법에서는 예측 시점 및 예측 기간과 동일한 기간의 1년 전 과거 데이터를 이용하여 선형회귀분석을 사용한다.

$$P_k^{max} = s_0 + s_1 T_k + \varepsilon_k \quad (2)$$

여기서 P_k^{max} 와 T_k 는 선택된 k 번째 과거 데이터의 최대전력수요와 온도를 의미한다; s_0 와 s_1 는 선형회귀모형의 상수와 전력수요의 온도민감도 계수이며 ε_k 는 평균이 0 인 오차항을 의미한다.

3.2 24 시간 전력수요예측

24 시간 전력수요예측을 위해 첫 번째로 예측 기간의 일별 최대전력수요를 3.1에서 예측된 일별 온도와 온도민감도를 이용하여 아래 수식과 같이 예측한다. 여기서 사용되는 기본 온도는 예측 시점에서의 온도를 의미한다.

$$\hat{P}_d^{max} = P_r^{max} + s_1(\hat{T}_d - T_r) \quad (3)$$

여기서 \hat{P}_d^{max} 와 \hat{T}_d 는 d 번째 날의 예측된 최대전력수요와 온도이며, T_r 과 P_r^{max} 는 예측 시점의 기본온도와 최대전력수요이다.

두 번째 단계에서는 예측기간과 동일한 기간의 1년 전 데이터 중 최대전력수요가 발생한 날의 데이터를 이용하여 그 날의 최대전력수요로 정규화된 24 시간 전력수요 패턴을 추정한다. 제안된 방법에서 사용된 24 시간 전력수요 패턴 수식은 다음과 같다.

$$P_t^{pu} = \frac{P_{p,t}}{P_p^{max}} \quad (4)$$

여기서 P_t^{pu} 는 일별 최대전력수요로 정규화된 t 시간의 정규화된 값이며, $P_{p,t}$ 와 P_p^{max} 는 예측 기간과 동일한 기간의 1년 전 데이터 중 최대전력수요가 발생한 날의 t 시간의 전력수요와 해당일의 최대전력수요이다.

일별 전력수요예측의 마지막 단계는 수식 (3)과 (4)를 이용하여 예측된 예측 기간의 일별 최대전력수요와 정규화된 전력수요 값을 이용하여 예측 기간의 일별 시간별 전력수요를 예측한다.

$$\hat{P}_{d,t} = \hat{P}_d^{max} \times P_t^{pu} \quad (5)$$

여기서 $\hat{P}_{d,t}$ 는 예측 기간 중 d 번째 날의 t 시간의 예측된 전력수요이다.

3.3 수요관리량 확률분포 추정

본 논문에서 제안된 방법에서는 몬테칼로 시뮬레이션 기법을 적용하여 확률론적인 전력수요예측을 수행하여 수요관리량 확률분포를 추정한다. 수요관리가 적용될 기간에 필요한 수요관리량은 예측된 시간대별 전력수요와 수요관리 기준값과의 차를 이용해서 계산된다. 수요관리 프로그램 설계를 위해서 추정해야 할 수요관리량으로는 아래 수식과 같이 수요관리가 진행될 기간 동안 수요관리가 필요한 날 수, 필요한 총 시간, 필요한 총량이 있다. 수요관리 필요 일수와 시간은 단위계단함수(unit step function)을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} D_{day} &= \sum_d U\{\max(\hat{P}_d^{max} - D_{ref}, 0)\} \\ D_{hour} &= \sum_d \sum_t U\{\max(\hat{P}_{d,t} - D_{ref}, 0)\} \\ D_{capacity} &= \sum_d \sum_t \max(\hat{P}_{d,t} - D_{ref}, 0) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 D_{day} , D_{hour} , $D_{capacity}$ 는 각각 수요관리 필요 일수, 시간, 총량을 의미하며 D_{ref} 와 \hat{P}_d^{max} 는 수요관리 기준값과 예측 기간 중 d 번째 날의 최대전력수요이다.

제안된 방법에서는 앞서 설명된 3.1의 온도 모델링을 이용하여 예측할 기간의 일별 온도를 예측한 후 3.2에 소개된 방법으로 일별 전력수요예측을 진행한다. 또한 수식 (6)에 의해 예측된 기간에 필요한 수요관리량을 계산한다. 본 논문에서는 위의 수요관리량 계산 과정에 몬테칼로 시뮬레이션을 적용하여 필요한 수요관리량의 확률분포를 추정한다. 제안된 방법에서 사용하는 확률분포는 정규분포이다.

4. 사례연구

사례연구에서는 3장에서 제안된 방법을 적용하여 2013년 하계 피크기간인 7월 ~ 8월 62일간의 일별 전력수요예측 및 필요한 수요관리량의 확률분포를 추정한다. 예측에 사용된 전력수요와 온도 데이터는 한국전력거래소와 기상청으로부터 제공받았다. 최대전력수요를 예측할 때 사용한 온도 데이터는 최저온도이며 이는 전력수요와 기상요소간의 상관분석을 통해 선정하였다. 예측 시점은 2013년 6월 1일로 하였으며 과거데이터는 예측 시점 이전 데이터만을 사용하였다.

온도 데이터 경우 예측 시점으로부터 과거 20 년의 데이터를 이용하여 확률론적 온도 모형을 모델링하였다. 그림 2는 제안된 온도 모델을 통해 만들어 낸 2013년 7월 ~ 8월 62일간의 온도 패턴과 실제 온도를 보여준다. 본 논문에서 제안된 방법은 수요관리량의 확률분포를 추정하기 위해 10,000 개의 온도패턴을 생성한 몬테칼로 시뮬레이션을 수행한다. 그림에서는 보여주는 10,000 개의 온도 패턴(회색실선)과 실제온도(검정실선)를 동시에 보여주며 이는 제안된 몬테칼로 시뮬레이션이 확률적으로 발생할 수 있는 모든 온도 영역을 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 3은 1개의 온도 패턴에 대한 제안된 방법으로 예측한 최대전력수요를 보여준다. 그림에서 보여주는 일별 최대전력수요는 생성된 온도 패턴에 온도 민감도를 이용하여 보정한 결과이다.

사례연구에서 사용된 24시간 전력수요 패턴은 그림 4와 같다. 24 시간 전력수요 패턴은 수요관리량 추정을 위한 예측기간과 동일한 기간의 1년 전 데이터 중 최대전력수요가 발생한 날의 24시간 전력수요 데이터를 이용하여 해당일의 최대전력수요를 이용하여 수식 (4)를 이용한 정규화된 값이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 하계기간 전력수요 패턴의 경우 11시와 15시에 가장 높은 전력수요를 보인다.

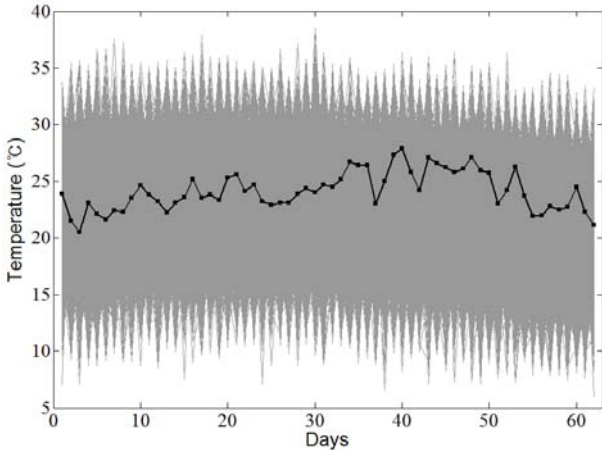


그림 2 온도 패턴의 몬테칼로 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Stochastic temperature path using Monte-carlo simulation and actual temperature path

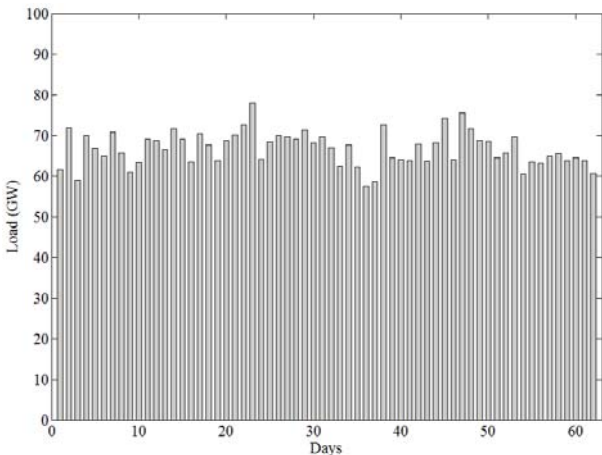


그림 3 최대전력수요 예측 결과
Fig. 3 Results of peak load forecasting

수요관리 기준값의 경우 예측기간과 동일한 기간의 1년 전 데이터 중 최대전력수요를 기준으로 설정하며 사례연구에서는 아래의 수식을 이용한다.

$$D_{ref} = \lambda \times P_{y-1}^{max} \quad (7)$$

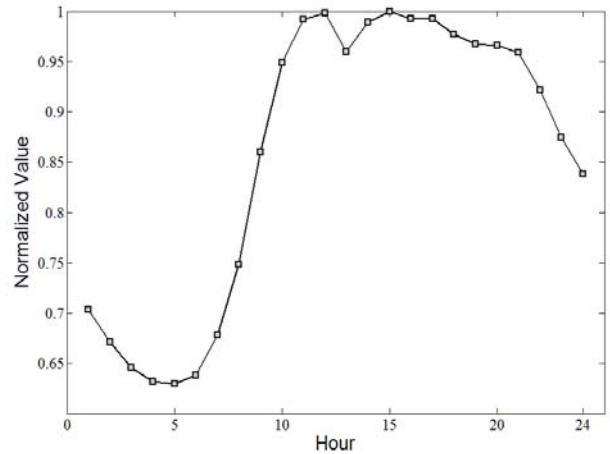


그림 4 24시간 전력수요 정규화 패턴
Fig. 4 Normalized 24 hourly load pattern

여기서 λ 는 수요관리 기준값 계수이며, P_{y-1}^{max} 는 예측기간과 동일한 기간의 1년 전 데이터 중 최대전력수요를 의미한다.

표 1에서는 수요관리 기준값 계수에 따라 제안된 방법으로 추정된 수요관리량의 기댓값과 실제값을 비교하였다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 추정된 수요관리량 중 총량의 경우 추정값이 실제값과 유사함을 보여주는 것을 확인할 수 있다

추정된 수요관리량의 신뢰구간을 넓힐수록 필요한 수요관리량이 많아지는 것을 표 2에서 확인할 수 있는데 이것은 모든 온도가 발생할 경우를 대비하는 것이기 때문이다. 이와 같이 제안된 방법은 수요관리 프로그램을 설계하는 방향에 따라 수요관리량을 설정할 수 있는 확률론적 방법을 제공한다.

표 1 수요관리량 비교

Table 1 Comparison of estimated the required day, hour and total capacity for DSM program

수요 관리량	$\lambda = 97\%$ (72,062 MW)		$\lambda = 98\%$ (72,805 MW)	
	실제값	제안된 방법	실제값	제안된 방법
일수 (day)	9	6.56	7	3.17
시간 (hour)	51	27.83	33	12.35
총량 (MW)	48,366	48,077	16,632	18,615

제안된 방법에서 사용하는 데이터에는 과거의 수요관리 이력이 남아 있으며 제안된 방법의 검증에 위해 사용된 데이터에도 수요관리 이력이 있는 데이터를 사용했다. 이로 인해 제안된 수요관리량 추정 방법은 정확성을 저해할 잠재적 요소를 가지고 있다. 이러한 부분에 대해서는 수요관리 실적 데이터 분석을 통해

표 2 신뢰수준별 수요관리량 추정

Table 2 Estimated results depending on confidence level

수요 관리량	$\lambda = 97 \% (72,062 \text{ MW})$		
	평균값	95 % 신뢰수준	99 % 신뢰수준
일수 (day)	6.55	11.25	12.73
시간 (hour)	27.78	55.93	64.83
총량 (MW)	48,038	120,040	142,820

제안된 방법에 과거 데이터 선택 부분을 강화해서 알고리즘 내에서 데이터의 이상치를 제거하거나 보정하는 방법을 제안된 방법에 적용하면 수요관리량 추정의 정확성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 수요관리 프로그램의 효율적 운영을 위한 수요관리량 추정을 위해 확률론적 온도모델링과 온도민감도를 이용한 전력수요예측과 몬테칼로 시뮬레이션을 적용한 수요관리 프로그램 계획 방법을 제안하였다. 사례연구에서는 제안된 방법을 이용하여 수요관리 프로그램이 적용될 기간의 전력수요를 예측하고 수요관리 기준값과 비교를 통해 필요한 수요관리량인 수요관리 일수, 시간, 총량에 대한 확률분포를 추정하였으며 2013년 하계 피크기간 데이터와 비교하여 제안된 방법을 검증하였다. 향후 보다 현실적인 수요관리량 추정을 위해 수요관리 기준값 설정 방법에 대한연구와 과거 데이터에서 이상치 처리 방법에 대한 연구를 진행하여 제안된 방법을 개선할 예정이다.

References

- [1] Loughran, David S. and Jonathan Kulick, "Demand-side management and energy efficiency in the United States," The Energy Journal, vol. 25, no. 1, pp.19-43, 2004.
- [2] P. Samadi, H. Mohseniab-Rad, R. Schober, and V. Wong, "Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1170-1180, 2012.
- [3] Power demand management portal - <https://www.kdrm.or.kr>
- [4] W.K. Härdle, B. López-Cabrera, and M. Ritter, "Forecast based pricing of weather derivatives," SFB 649 Discussion Paper Series 2012, 2012.
- [5] M. Mraoua and D. Bari, "Temperature stochastic modeling and weather derivatives pricing: empirical study with Moroccan data," Africa Statistika, vol. 2, no. 1, pp. 22-43, 2007.

저 자 소 개



위 영 민(Young-Min Wi)

1980년 4월 7일생. 2013년 고려대학교 전기 전자전파공학과 졸업(박사). 2013~2014년 한국전기연구원 근무. 2014~현재 광주대학교 전기전자공학과 조교수.