

# 최소자승몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 풍력발전설비 투자계획

논 문
60-1-6

## Economic Assessment of a Wind Farm Project Using Least Square Monte-Carlo (LSMC) Simulation

김진아\* · 이종욱\*\* · 이재희\*\*\* · 주성관†  
(Jina Kim · Jong-Uk Lee · Jaehee Lee · Sung-Kwan Joo)

**Abstract** - The economic value of a wind farm project is influenced by various risk factors such as wind power output and electricity market price. In particular, there is uncertainty in the economic evaluation of a wind farm project due to uncertain wind power outputs, which are fluctuated by weather factors such as wind speed, and volatile electricity market prices. This paper presents a systematic method to assess the economic value and payback period of a wind farm project using Least Square Monte-Carlo (LSMC) simulation. Numerical example is presented to validate the effectiveness of the proposed economic assessment method for a wind farm project.

**Key Words** : Wind farm investment, Risk factor, LSMC (Least Square Monte-Carlo)

### 1. 서 론

풍력 에너지원은 짧은 시공기간과 태양광, 연료전지와 같은 신재생에너지원에 비해 높은 발전효율로 경제적 잠재 가치가 높게 평가되고 있으며 다수 국가에서 차세대 대체 에너지원으로 각광받고 있다. 그러나 풍력발전은 기존 발전설비에 비해 높은 초기고정비용이 소요되어 비용회수의 어려움이 있고, 풍속 및 풍향 등 자연조건에 민감한 풍력 에너지원의 불확실성으로 인해 안정적인 수입확보를 보장받지 못한다[1]. 또한 풍력발전 설비를 가동시키기 까지 규제와 허가 통가시간, 정책의 변화는 풍력발전설비의 운영시점을 불확실하게 만드는 요소이다. 풍력발전원의 이러한 불확실성은 설비투자의 결립들로 작용하고 있다.

발전설비투자에 내재된 수입의 불확실성을 고려하기 위해 다양한 설비투자계획 기법이 연구되고 있다[2]-[5]. 그 중에서 옵션이론은 많은 불확실 요소를 반영할 수 있어 활용 가능성이 높게 평가되고 있다. 옵션이론을 이용한 설비계획의 연구[6]는 투자비 회수시점이 최적의 설비투자시점으로 보고, 옵션이론을 이용해 최적 옵션행사 시점 결정 기법이 제시되었으며, [7]-[9]에서는 경영자의 유연성을 고려하기 위해 실물옵션을 적용한 전원설비의 다양한 경제적 가치 산출 방법이 제시되었다. 그러나 이러한 연구들은 시장가격의 불확실성을 고려하기 위한 것으로 풍력발전설비 투자에 직접 적용하기에는 어려움이 있다.

경제성 평가 방법으로는 다양한 방법이 있지만 확정적 투자 가치 산출 방법인 순현재가치법(Net Present Value, NPV), 내부수익률법(Internal Rate of Return, IRR)의 경우엔 불확실성을 반영하지 못한다는 단점이 있다. 또한 블랙-숄츠모형과 몬테카를로 시뮬레이션 방법은 수입의 불확실성이 고려된 옵션가치산정방법이지만 최적 행사규칙을 결정할 수 없다는 단점이 있다. 선행연구[10]에서는 최소자승 몬테카를로(Least Square Monte Carlo, LSMC) 기법을 적용하여 풍력발전설비의 투자 가치를 평가하였다. 본 논문에서는 운영시점, 출력 등 풍력발전에 내재된 다양한 불확실성을 고려할 수 있는 LSMC 방법을 활용하여 풍력발전설비의 투자 가치를 산정할 수 있는 방법을 제안한다. 또한 제안한 방법을 바탕으로 풍력발전설비의 투자 가치와 회수기간을 산정해 보고 풍력발전수입의 변동성에 따라 어떠한 변화를 보이는지를 분석해 본다.

### 2. 풍력발전설비 투자계획 문제의 정식화

풍력발전원이 기존발전원에 비해 경제성이 떨어지는 이유는 비교적 큰 초기투자비용과 더불어 불확실한 풍속 및 풍향 등에 따른 출력량으로 인해 일정한 수입 확보를 보장받지 못하고 있기 때문이다. 이로 인한 풍력발전설비의 경제적 취약성을 해결하기 위해 정부에서 발전차액제도를 통해 지원해주고 있으며 발전차액제도로 인한 수입은 신재생에너지이용 발전전력의 기준가격대비 계통한계가격(SMP)과의 차액을 지원함으로써 산정된다[11]. 하지만 최근 SMP가 기준가격을 상회하는 경우가 자주 발생됨에 따라 풍력발전사업자는 기준가격을 초과한 SMP에 의한 발전수입을 받는 상황이 증가하고 있다. 기준가격이 매년 2%씩 감소하고, SMP의 상승이 예상된다는 점을 감안하면, SMP의 변동성도 풍력발전수입의 불확실성에 기여할 수 있다. 따라서 본 논문

\* 준 회원 : 고려대 전기전자전파공학과 공학석사  
\*\* 준 회원 : 고려대 전기전자전파공학과 석사과정  
\*\*\* 정 회원 : 고려대 전기전자전파공학과 박사과정  
† 교신저자, 정회원 : 고려대 전기전자전파공학과 부교수·공학  
E-mail : skjoo@korea.ac.kr  
접수일자 : 2010년 6월 11일  
최종완료 : 2010년 11월 18일

은 풍력발전의 출력량과 SMP를 확률변수로 설정하고, 과거 데이터를 통해 변동성을 추정하여 확률모형에 적용한다.

확률변수의 과거 시간별 데이터를 이용해 일별 평균값을 구하여 데이터를 가공한 후, 일별기준 변동성을 추정한다. 다양한 변동성 추정모형 가운데, 과거데이터의 가중치를 부여하여 구하는 가장 기본적인 방법인 단순이동평균법(Simple Moving Average, SMA)을 적용한다.

단순이동평균법을 이용한 변동성 추정은 특정기간동안 수익률의 표준편차로 구할 수 있으며, 각 수익률의 관찰값들은 동일한 가중치가 부여된다. (t-1)일에 추정된 t일 기준 변동성을  $\sigma_t$ 라고 할 때 식 (1)로 나타낼 수 있다. 이때, N은 수익률 관찰값의 개수이고  $x_i$ 는 i-1일부터 i일까지의 풍력발전수입의 로그수익률,  $\bar{x}$ 는  $x_i$ 의 평균이다.

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{t-i} - \bar{x})^2} \quad (1)$$

풍력발전 수입으로 인한 미래현금흐름을 추정하기 위해 풍력발전 수입모델이 필요하다. 풍력발전 수입은 SMP로 정산한 전력판매수입과 발전차액제도로 인한 수입으로 구성된다. 기존 발전원과는 달리 날씨에 민감한 풍속데이터의 불확실성으로 인해 전력판매수입은 확률분포로 나타나게 된다. 또한 기준가격이 고정되어 있지만, SMP의 변동성을 고려한다면 발전차액제도로 인한 수입도 확률과정을 따른다고 볼 수 있다. 2009년도 풍력발전원의 기준가격 107.29원/kWh을 적용한 풍력발전 수입  $R(t)$ 은 식 (2)로 나타낼 수 있다. 여기서  $P_w$ 는 시간별 풍력발전출력량이고  $P_{ref}$ 는 기준가격이다.

$$R(t) = P_w \times \text{Max}(P_{ref}, SMP) \quad (2)$$

전력판매수입 이외에도 온실가스 배출권 판매로 인한 수입을 고려할 수 있으나, 국내에는 체계적인 절차가 정립되어 있지 않은 상황이므로 선택사항으로 수입모델링을 할 수 있다. 본 논문에서는 온실가스 배출권 판매로 인한 수입은 제외하고 전력판매수입만 고려한 투자결정기법을 제안한다.

### 3. LSMC를 이용한 풍력발전설비 투자계획

앞에서 제시한 풍력발전 수입모델을 토대로 옵션이론을 활용하여 최적의 풍력투자 시점 및 투자가치를 산정하는 기법을 제안한다.

#### 3.1 옵션이론

옵션이란 기초자산(기초주식)을 행사가격으로 만기시점에서 사거나 팔 수 있는 권리로 금융시장에서 다양한 형태의 현금흐름을 만들거나 위험관리 효과를 갖는 파생상품을 말한다. 옵션의 종류는 부여된 권리 내용에 따라 콜옵션과 풋옵션으로 구분되며, 권리행사 가능시점에 따라 유럽형 옵션과 미국형 옵션으로 분류된다. 옵션의 만기가치(payoff)는 옵션의 만기시점에서 기초주식의 가격수준에 따라 옵션이 갖게 되는 손익형태를 말하며, 옵션행사에 따른 손익은 만기주가와 행사가격의 관계에서 결정된다.

옵션이론은 어떤 프로젝트의 투자 또는 운영에 있어 경영

환경 변화에 부응하여 선택할 수 있는 대안의 특성을 고려할 수 있으며, 불확실한 요소가 내재된 미래현금흐름 예측의 신뢰도를 높일 수 있다는 점에서 많은 실증연구에서 활용되고 있다.

#### 3.2 수입의 확률과정

먼저 시변특성을 가진 수입의 불확실성을 반영하기 위해 확률모형을 결정해야 한다. 풍력발전수입 변화가 연속적이고, 양의 값을 갖는 점을 고려해 가장 일반적으로 사용되는 Geometric Brownian Motion (GBM)을 적용한다. 확률변수의 과거데이터를 이용해 평균변화율  $\mu$ 와 순간변동성  $\sigma$ 를 측정된 후, GBM모형에 대입한 미소구간의 연간수입은 식 (3)과 같다[12].

$$dR = \mu R dt + \sigma R dz \quad (3)$$

여기서  $dz$ 은 수입변화의 불확실성을 반영하는 것으로 위너과정을 의미하며 Monte-Carlo 방법을 활용하여 평균이 1이고 분산이  $dt$ 인 표준정규분포 하에서 난수를 생성한다.

수입이 0부터 양의 무한대를 갖는 로그정규분포를 따른다고 가정하는 경우, 연속시간인 GBM모형을 이산시간모형으로 전환하기 위해 자연로그를 취한 확률과정은 식 (4)와 같다[13].

$$R_{t+dt} = R_t \cdot \exp\left(\left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma\epsilon\sqrt{dt}\right), \epsilon \sim N(0,1) \quad (4)$$

시나리오의 개수는 Monte-Carlo 시뮬레이션 횟수에 의해 결정되며, 식 (5)를 통해 각 시나리오마다 총 수익을 계산한다.

$$TR_t = \int_t^{T+t} (R_t - O_t) \cdot e^{-rt} dt \quad t=1, \dots, T \quad (5)$$

옵션이론을 적용하여 발전기가 가동되는 기간 동안의 수입을 얻을 수 있다. 이때  $TR_t$ 는 총 수익이고  $O_t$ 는 유지보수비용,  $T$ 는 총 설비 평가기간이다. 금융시장에서 쓰이는 옵션이론을 대입해 보면, 총 수입  $TR$ 이 주가가 되고 투자비용  $I$ 는 행사가격이 된다. 미국형 콜옵션을 적용하여 t시점에서의 옵션 행사가치  $F(TR_t)$ 은 식 (6)과 같다.

$$F(TR_t) = \max(TR_t, 0) - I \quad (6)$$

수입추정이 forward 방식인데 비해, 옵션 행사가치는 backward 방식이므로 만기시점 T부터 t=1인 시점까지의 순서로 옵션 행사가치를 도출한다. 일반적인 옵션 행사가치 계산은 블랙-숄츠모형을 사용해 결정하지만, 본 논문에서는 회귀분석 모형을 사용해 행사여부를 판단하여 최적 투자시점을 결정한다.

식 (6)을 이용해 계산된 옵션 행사가치 중 옵션 행사 시 이익이 생기는 경우(In The Money, ITM)만 선택하여 행사 여부를 판단하게 된다. 행사여부 판단은 매 시점마다 행사가치  $F$ 와 보유가치  $V$ 의 비교를 통해서 결정된다. 먼저 만기 T시점의 행사가치에서 할인율을 적용하여 만기이전 시점인 T-1에서의 보유가치를 계산한다. T-1시점의 수입 R과 보유가치 V 간의 관계를 최소자승법을 이용해 회귀분석을 한다. 즉 T-1시점의 수입정보를 이용하여 보유가치를 예

측하고 여기에 stopping rule을 적용하여 행사여부를 결정하는 것이다. 최소사승법을 이용한 회귀모형 추정은 식 (7)을 최소화시키는 회귀계수를 구하면 되며, 이때  $p$ 는 ITM 상태인 시나리오의 개수이다[13].

$$\sum_{i=1}^p (V_i - \alpha - \beta_1 R_i - \beta_2 R_i^2) \quad (7)$$

회귀분석 시, Longstaff-Schwartz가 제안한 Laguerre Polynomials를 사용한다. 수입  $R$ 이 Markov Process를 따른다는 가정하에 Laguerre Polynomials는 아래 식 (8)과 같으며, 식 (7)에서  $R$  대신  $R$  차수에 해당하는  $L_n(R)$ 을 대입하여 회귀분석하면 된다[14].

추정된 회귀식에  $T-1$ 시점의 수입을 대입하면  $T-1$ 시점의 보유가치가 재계산된다. 재계산된 보유가치는  $T-1$ 시점의 행사가치와 비교하여 행사여부를 판단하게 된다. 만약 행사가치가 보유가치 보다 높으면 payoff는 행사가치가 되고, 반대의 경우 payoff는 0이 된다. 이런 과정을  $t$ 시점까지 반복하면, 매 시점마다 행사여부와 payoff가 도출된다. 시나리오 별 도출된  $t$ 시점의 payoff에 평균값을 취하면, 매 시점마다 payoff 평균값이 나온다. 시나리오 별로 결정된 payoff를 바탕으로 모두 현가화 시켜 얻어진 평균값이 최종 옵션가치가 된다.

$$L_0(R) = \exp(-R/2) \quad (8-a)$$

$$L_1(R) = \exp(-R/2)(1-R) \quad (8-b)$$

$$L_2(R) = \exp(-R/2)(1-2R+R^2/2) \quad (8-c)$$

$$L_n(R) = \exp(-R/2) \frac{e^R}{n!} \frac{d^n}{dR^n} (R^n e^{-R}) \quad (8-d)$$

#### 4. 사례연구

국내 풍력발전단지를 대상으로 2008년에 측정된 시간별 풍력발전출력량과 SMP 데이터를 확보하여 수입모델에 적용하였다. 평균수익률  $\mu$ 는 0.0001, 수입의 변동성  $\sigma$ 는 단순이동평균법을 이용해 추정한 일별기준 0.3과 0.20, 0.25, 0.35, 0.4인 경우를 분석하였다. 총 투자비는 1,650억 원이고, 초기 일별 수입은 7,500만원, 풍력발전설비의 운영시점은 1~7년, 시설용량은 2MW 50기로 총 100MW, 풍력터빈수명을 평가기간으로 보고 20년으로 가정하였다. 풍력발전단지의 유지보수 비용은 10\$/MW이고, 환율은 1,150₩/\$를 적용하였다. 할인율  $r$ 은 7.5%를 적용하여 5,000번의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 반복 수행하였다. 풍력발전단지 건설대안 내용은 표 1에 정리하였다.

먼저  $t=1$ 인 시점부터 만기시점  $T$ 까지 평가기간 동안의 누적수입  $TR_t$  을 구한다. 옵션의 행사가치는  $TR_t$ 에서 투자비용  $I$ 를 제외한 값으로 산출되며, 행사가치에 할인율을 적용한 보유가치  $V$ 와 동일 시점에서의 수입  $R$ 간의 회귀분석으로 Laguerre Polynomials법을 이용해 보유가치를 재계산한다. 각 시점에서의 행사가치와 재계산된 보유가치를 비교하면 payoff가 계산되고, 시점  $t$ 를 기준으로 해당 시나리오의 payoff 평균값을 구한다. 계산된 payoff값을 현가화시켜 얻어진 평균값이 풍력발전설비의 최적투자 가치이다. 표 2는 수입의 변동성에 따른 투자가치를 보여주고 있다.

표 1 풍력발전단지 건설대안

Table 1 Scenario for wind farm investment

총 투자비	1,650억원
시설용량	100MW (2MW, 50기)
설비수명	20년
일별초기수입	7,500만원
유지보수비용	10\$/MW
환율	1,150₩/\$
할인율	7.5%
평균수익률	0.0001
시뮬레이션 횟수	5,000번

표 2 변동성에 따른 풍력발전설비의 투자가치

Table 2 Value of investment on variation

	변동성	투자가치(억원)	회수기간(년)
CASE I	0.2	709.65	10.8
CASE II	0.25	740.42	11.5
CASE III	0.3	823.67	10.8
CASE IV	0.35	855.29	9.4
CASE V	0.4	910.57	9.2

상기 결과를 토대로 가정한 풍력발전단지 건설대안에서, 일별기준 변동성 0.3인 경우 풍력발전설비 총 투자가치는 823.67억 원이고 가동 이후 10.8년 이후 투자금액을 회수할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 1은 다양한 변동성에 따른 풍력발전설비 투자가치의 변화를 나타내고 있다. 변동성이 클수록 풍력발전설비의 투자가치가 증가하며 이때 투자가치는 변동성에 따라 약 709.65억 원~910.57억 원 규모라는 것

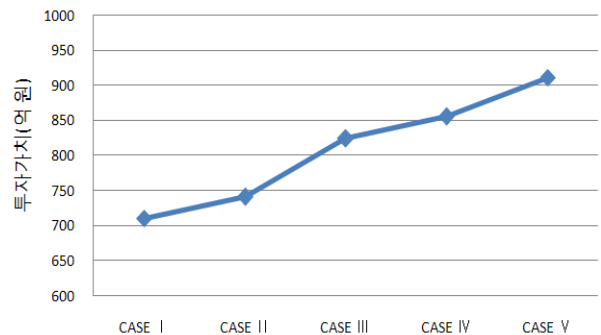


그림 1 풍력발전설비 투자가치의 변화

Fig. 1 Variation of value of investment

을 확인할 수 있었다. 그림 2는 서로 다른 변동성이 적용된 풍력발전설비 회수기간 변화를 나타낸 그래프이다. 변동성이 클수록 투자금을 더 빠른 기간 안에 회수할 수 있는 것을 확인할 수 있었으며, 변동성에 따라서 9.2년~11.5년 사이에 투자금을 회수할 수 있는 것으로 나타났다. 종합적으로 변동성이 높을수록 투자가치가 크고 회수기간이 빠른 것으로 나타났다.

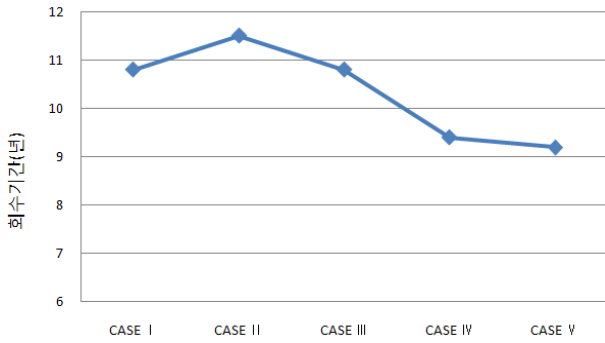


그림 2 풍력발전설비 회수기간의 변화  
Fig. 2 Variation of payback period

### 5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전설비 투자계획 기법과 정전의 경제성 과급효과 분석 기법을 제시하여 사례연구를 통해 제안 기법의 모의결과를 분석하였다. 먼저 풍력발전 출력과 시장 가격, 투자시점의 불확실성을 고려한 가치산정 방법으로 LSMC를 제안하였다. 확률모형을 이용하여 풍력발전수입을 예측하고, LSMC 방법을 통해 투자가와 회수기간을 도출하였다. 이는 풍력발전설비 투자 전 위험성 분석과 수익성 평가 자료로 활용될 수 있다. 향후 RPS제도가 반영된 환경 하에서 풍력발전설비의 경제성 평가를 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0077634).

#### 참 고 문 헌

[1] 조용권, “풍력발전의 부상과 시사점”, SERI 경제포커스, 제155호, 2007년.  
 [2] H. Zhou and Y. Hou, “Analytical Assessment of Wind Power Generation Asset in Restructured Electricity Industry”, UPEC, pp.1086-1092, 2007.  
 [3] A. Botterud, “Long-Term Planning in Restructured Power Systems”, NTNU, pp.49-110.  
 [4] A. Siddiqui, C. Marnay, “Distributed Generation Investment by a Microgrid Under Uncertainty”, U.S. Department of Energy, 2006.  
 [5] 하정우, 김수덕, “대관령 풍력단지의 풍력발전량 및 경제성 분석”, 에너지공학, 제 14권, 제 2호, pp.123-132, 2005년.  
 [6] H. Salazar and C. C. Liu, “Decision Analysis of Merchant Transmission Investment by Perpetual Options Theory”, IEEE Trans. On Power sys. Vol.22, No.3, pp.1194-1201, Aug. 2007.  
 [7] G. Kumbaroglu, R. Madlener, and M. Demirel, “A

Real Options Evaluation Model for the Diffusion Prospects of New Renewable Power Generation Technologies”, Energy Economics, Vol.30, pp.1882-1908, 2008.

[8] M. Mendez, “Real Options Valuations of a Wind Farm”, Univ. Autonoma de Madrid, Feb. 2009.  
 [9] A. Rodrigues and M. Armada, “The valuation of real options with the least squares monte carlo simulation method”, SSRN, Feb. 2006.  
 [10] 김진아, 이재희, 주성관, “최소자승 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용한 풍력발전설비 투자결정”, 대한전기학회 추계학술대회, 2009.  
 [11] 지식경제부, “신재생에너지이용 발전전력의 기준가격 지침”, 제 2009-297호, 2009년.  
 [12] 이준행, 이종식, “엑셀/VBA를 이용한 금융공학”, 경문사, pp.211-215, 2006년.  
 [13] 이경수 외 2명, “과생상품 Modeling I: MATLAB 활용”, 아진, pp.110-118, 2008년.  
 [14] F. A. Lngstaff and E. S. Schwartz, “Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach”, Review of Financial Studies, Vol. 14, No.1, pp.113-147, 2001.

#### 저 자 소 개

##### 김진아 (金珍娥)

2010년 고려대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(공학석사). 현재, 효성중공업 재직.

##### 이종욱 (李鐘旭)

2010년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 현재, 동 대학원 전기전자전파공학과 석사과정.

##### 이재희 (李才熙)

2009년 고려대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(공학석사). 현재, 동 대학원 전기전자전파공학과 박사과정.

##### 주성관 (朱成官)

2004년 University of Washington 전기공학과 졸업(공학박사). 2006년~현재, 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수.