

## 신재생에너지 보급확대에 따른 국내전력시장 운영방안

이재걸\*, 남수철, 신정훈, 김태균  
 대전 전력연구원

### The improvement in operating rules of Cost Based Pool(CBP) considering the increasing Renewable Energy Capacity

Jae-gul Lee\*, Su-chul Nam, Jeong-hoon Shin, Tae-kyun Kim  
 KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)

**Abstract** - As the construction of renewable energy generators is on the rise and gets bigger in size, researchers pay more and more attention to the impact of such facilities on the power market as well as on the stability of power grid system. In Korea, while studies on the latter, including calculating the marginal capacity of renewable energy generators, is being made, those on the former has not yet been performed. As such, this paper analyses the impact of a big renewable energy generators on the price and transaction cost of domestic power market and proposes ideas to minimize such influence by applying the technology of forecasting renewable energy.

#### 1. 서 론

전 세계적으로 고유가 및 지구온난화가 심각한 문제로 인식되면서 신 재생에너지에 대한 관심이 높아졌고 북미 및 유럽을 중심으로 활발하게 보급되고 있다. 우리나라의 경우에는 원유의 전량을 수입에 의존하고 있는 실정이고 추후 수년 이내에 이산화탄소 배출 저감의 의무가 부가될 것으로 예상되고 있어 신 재생에너지 보급 및 확대에 대한 많은 노력을 기울이고 있는데 제2차 국가에너지 기본계획에서는 신 재생에너지의 비중을 5%까지 확대 보급하는 목표를 세우고 있다. 특히 풍력발전의 경우 강원도와 영남지역 그리고 제주지역을 중심으로 현재 159MW의 설비가 운영되고 있으며, 연간 246GWh의 발전을 하고 있다. 또한 제2차 신 재생에너지 기술개발 보급기본계획에서 2012까지 총 2,250MW의 풍력발전설비를 보급하는 것을 목표로 하고 있다.

이러한 신 재생에너지의 보급 및 확대의 효과를 극대화시키기 위해서는 계통 운영은 물론 전력시장 운영에 있어서도 신 재생에너지의 특성을 반영할 수 있는 장치의 마련이 필요로 된다. 그러나 현재 국내에서 운영되고 있는 변동비반영시장(CBP, Cost Based Pool)에서는 신 재생에너지의 출력변동특성을 제대로 고려하고 있지 못하며, 이로 인해서 제약발전비용이 증가되고 있어 신 재생에너지의 보급에 대한 사회적 편익이 감소되고 있다. 즉, 풍력자원이나 태양광 에너지 등을 이용한 신 재생에너지 발전원의 출력은 기후조건에 따라서 그 출력이 크게 변화하는 특성을 가지고 있는데 현재 운영되고 있는 CBP시장에서는 하루 전에 계통한계가격(SMP, System Marginal Price)을 결정하면서 신 재생에너지 발전원의 출력을 단순히 전주 동일요일의 동일시간대의 출력으로 가정하고 있기 때문에 예측에 대한 오차가 매우 크게 발생되어 시장가격의 왜곡을 가져오고 있으며, 이로 인하여 제약발전비용이 증가되는 문제가 발생되고 있고 추후 신 재생에너지의 보급이 확대될 경우 그 영향은 더욱 커질 것으로 예상된다.

본 논문에서는 신 재생에너지에 대한 출력변동특성을 반영하여 전력시장을 운영할 수 있는 방법으로 거론되고 있는 방법 중 풍력발전에 대한 출력예보기술을 전력시장운영에 적용할 수 있는 방법을 제시하고 이 방법의 적용 시 기대할 수 있는 효과로서 시장가격왜곡 경감 및 제약발전비용 저감에 대하여 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 신 재생에너지의 도입현황 및 전망

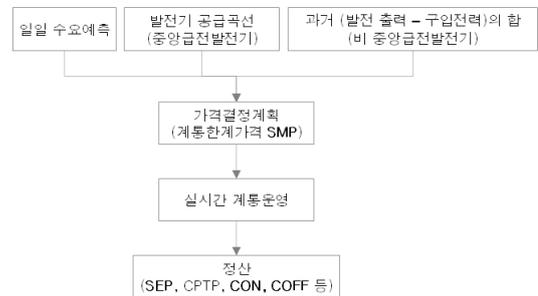
국내의 신 재생에너지 보급 목표는 제2차 국가에너지 기본계획에서 총 에너지소비량의 5%까지 확대 보급하는 목표를 세우고 있다. 특히 풍력발전의 경우 2012까지 총 2,250MW의 풍력발전설비를 보급하는 것을 목표로 하고 있고 '06년도 현재 영남과 강원도 그리고 제주도 지역을 중심으로 159MW의 설비가 운영되

고 있으며 발전량으로는 246GWh를 기록하였다. 풍력자원이 풍부한 제주도를 중심으로 해상풍력발전(Off-shore wind farm) 프로젝트가 추진되고 있으며 향후 해상풍력발전을 중심으로 한 대규모 풍력발전단지가 조성될 수 있는 것으로 전망되고 있다.

##### 2.2 전력시장에서 신 재생에너지의 영향

신 재생에너지의 규모가 전체 전력계통에서 차지하는 비중이 증가하고 있으며 또한 단위용량이 증대됨에 따라서 신 재생에너지가 전력계통 전체 전력시장에 미치는 영향도 증가하고 있어 이에 대한 대책수립이 중요한 이슈로 부각되고 있다.[2-3] 이는 신 재생에너지 발전원이 가지고 있는 출력변동특성을 기존 전력계통 운영 및 시장운영환경이 적절하게 고려할 수 없기 때문이다. 최근의 연구결과들을 살펴보면, 계통운영 측면에서 신 재생에너지의 공급비율이 증가될 수록 계통 운영예비력(Operation Reserve Power)의 추가적인 확보를 위한 비용이 발생되며[4] 전력시장의 운영에 있어서는 전력시장 가격의 왜곡이나 추가적인 거래비용이 발생하는 것으로 보고되고 있다. [3]

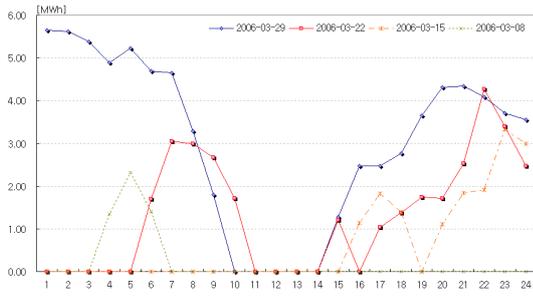
우리나라의 전력시장은 발전부문의 CBP시장으로써 하루 전 (Day-ahead)시장의 형태로 운영되고 있다. CBP시장에서는 중앙급전 발전기들을 대상으로 거래가 이루어지고 있고 비 중앙급전 발전기(신/재생에너지 포함)의 경우 시장운영에 별도로 반영하고 있다.



[Fig 3] 현재 CBP시장의 운영절차

전력시장의 운영 단계에서 가격결정계획을 살펴보면, 우선 거래일 하루 전에 거래일에 대한 시간대별 수요를 예측하고 발전기 기동정지계획(Unit Commitment)을 수립하는데 이 계획상에서 기동이 결정된 발전기들을 대상으로 발전기 입시발전가격(IGP)을 산정하여 그 순서대로 공급곡선을 결정한다. 이렇게 결정된 수요량과 공급곡선을 이용하여 SMP를 결정하게 되는데[5] 이러한 절차에서 신 재생에너지와 같은 비 중앙급전발전기들의 출력은 한 개의 대표발전기로 최근 같은 요일 같은 거래시간대의 발전량을 반영하여 고려 때문에 신 재생에너지 발전원의 계통기여도가 커지는 경우 적절하지 발전출력이 가격결정계획에 반영됨으로 SMP가 왜곡될 수 있으며 가격결정계획에 포함되었던 발전 출력들이 실제 계통운영 시 발전하지 못하거나 반대로 가격결정계획에 포함되지 않았던 발전출력들이 실제 계통운영 시 발전하게 되는 경우가 증가되어 제약비용(CON<sup>1)</sup>, COFF<sup>2)</sup>의 증가를 초래하는 원인이 된다.

1) CON : 제약발전비용(Constraint On)으로써 가격결정계획 시 포함되지 않은 발전력이 실제 급전 시 예측오차 또는 계통제약에 의하여 발전하는 경우 지급되는 정산금.  
 2) COFF : 제약비발전비용(Constraint Off)으로써 가격결정계획 시 포함된 발전력이 실제 급전 시 예측오차 또는 계통제약에 의하여 발전하지 못하는 경우 지급되는 정산금.



[Fig 4] 2006년 3월 수요일 출력실적 (한경풍력)

위의 그림은 '06년도 3월 제주도 한경풍력발전소의 동일 요일 동일 시간대의 발전출력을 비교 한 것인데, 매우 상이한 출력특성을 보여주고 있다. 즉 현재 CBP시장 운영에서 풍력발전 등 신재생에너지의 발전출력이 크게 왜곡되어 반영되고 있음을 보여주는 결과이다.

### 2.3 신 재생에너지의 특성을 고려한 전력시장 운영방법

본 논문에서는 신 재생에너지 중 풍력발전에 대한 특성을 고려할 수 있는 방법을 제안하고 그 영향을 분석하였다. 현재 풍력자원에 대한 예보를 비롯하여 풍력발전단지별 발전량 예보기술이 개발되고 있으며, 해외 연구사례로는 유럽연합의 경우 7개국 공동프로젝트인 ANEMOS를 2002년 10월부터 4년간 수행하면서 최대 48시간 선형예측에 대한 기술과 예측시스템의 On-line통합 운영기술의 개발에 박차를 가하고 있는데 이 기술은 세계 최고 수준으로 평가받고 있다. 국내의 경우에도 연구가 상당수준 진행이 되고 있으며, 추후 전력시장의 운영에 적용할 수 있는 정도의 예보기술이 개발될 수 있을 것으로 전망되고 있다.

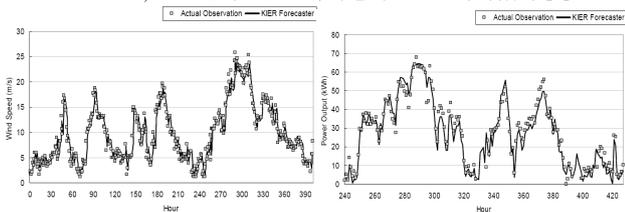
#### 2.3.1 풍력발전량 예보기술의 개요

풍력발전량 예측시스템의 핵심기술은 풍력발전기가 설치된 위치와 높이에서의 풍속을 정확하게 예측하는 것으로 크게 다음과 같은 두 가지 모형으로 나누어 볼 수 있다.[7]

(1) 통계적 모형 (Statistical Model) : 다양한 통계기법을 이용, 풍속을 예측

(2) 물리모형 (Physical Model) : 중규모 기상변화에 따라 국지적인 바람 장 변동을 고려하는 기상물리학적 예보모형, 6~8시간 이후의 장기간 예측에 적합

국내의 경우에도 풍력발전량 예보기술에 대한 연구가 진행되고 있는데, 국내의 경우 실제 풍력발전단지의 기상관측 자료가 부족하기 때문에 인근 기상관측소의 장기간 관측 자료를 이용한 추정-상관-예측방법을 적용하고 있으며 본 방법을 이용하여 제주도의 월령단지에 대한 적용사례가 보고된 바 있다. 이 적용 사례 결과에서 예보결과는 80% 신뢰구간에서 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)가 15% 이내인 것으로 나타났다.[7]

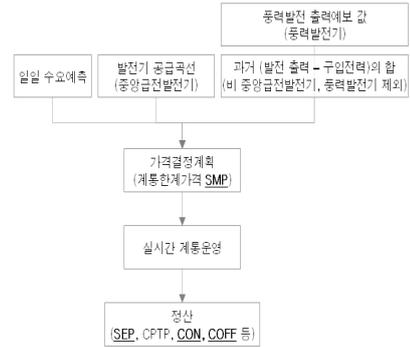


(a) 풍속의 비교결과 (b) 발전기 출력의 비교결과

[Fig 5] 월령 풍력단지의 풍속 및 발전기 출력의 예보 결과 및 실제 출력 비교

#### 2.3.2 전력시장운영의 기술적응

본 논문에서는 전술된 신 재생에너지 발전원의 출력변동특성을 고려할 수 있는 CBP시장운영 방법을 제안하였다. 여기에서 제안하고자 하는 방법은 가격결정계획 시 풍력발전 출력예보 결과를 반영하는 것으로써 아래의 그림을 이용하여 설명하면, 현재 운영되고 있는 시장운영규칙(그림1)에서 가격결정계획 시 비중앙급전 발전기를 취급하는 방식을 수정한 것으로 비중앙급전발전기 중 풍력발전기는 각 단지별로 한 개의 대표발전기를 가정하고 단지별 풍력발전 출력예보 결과를 적용하는 것이다.



[Fig 6] 제안된 운영절차 수정안

본 연구에서 제안한 풍력발전 출력예보 기술적용 방식은 풍력발전의 출력 예보치를 과거 발전실적을 대신하여 적용하는 것으로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_{Noncen} = \sum_{i=1}^{Noncen} P_{i,d,t_d} \rightarrow P'_{Noncen} = \sum_{i=1, i \neq wind}^{Noncen} P_{i,d,t_d} + \sum_{i=1, i = wind}^{Noncen} F_{i,t} \quad (1)$$

여기에서, Pnoncen : 대표 비 중앙급전발전기 출력 [MW]

P<sub>i,d,t<sub>d</sub></sub> : 발전기i의 최근 동일 요일, 동일 거래시간대의 거래량 - 구입전력량 [MW]

F<sub>i,t</sub> : 풍력발전단지의 예보 출력 [MW]

Noncen : 비 중앙급전 발전단지 개수 [개]

wind : 풍력발전단지의 일련번호

d : 최근 동일 요일인 날짜

td : d일의 동일 거래시간

식의 좌측부분이 기존의 비 중앙급전 대표발전기 출력을 산정하는 방식이며, 우측부분이 논문에서 제안된 방식인데 이 식을 살펴보면 풍력을 제외한 다 종류의 발전기 출력은 기존의 방식과 동일하게 합하지만 풍력발전단지의 출력은 각 시간대별 예보치를 사용하는 것이다.

만일 이러한 시장운영규칙 개선이 이루어지지 않은 상태에서 대규모 풍력발전단지가 건설이 되어 계통의 기여도가 높아질 경우 풍력발전의 출력특성을 반영하지 못한 과거 풍력발전의 출력을 적용함으로써 시장가격에 왜곡을 가져올 수 있으며, 제약비용의 증가도 발생되기 때문에 이러한 시장 운영규칙의 개선은 반드시 필요하다. 본 논문에서는 사례연구를 통하여 이러한 제도개선을 통한 가격왜곡 및 비용감소 효과를 분석하였다.

또한 풍력발전기 이외의 태양광발전과 같은 신 재생에너지원의 발전출력의 예측기술이 개발될 경우 이에 대한 적용도 가능하다.

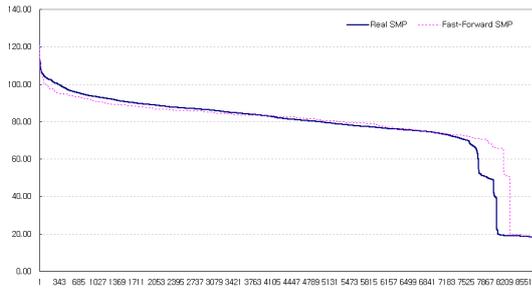
### 3. 사례연구

본 논문의 사례연구에서는 제안된 시장운영기술에 대한 정량적인 영향분석을 수행하였으며, 이를 위해서 전력시장을 모의할 수 있는 시장 분석모델로써 미국의 EPRI에서 개발한 Fast-Forward를 사용하였는데 이 모델은 중장기 전력시장분석을 위하여 개발된 것으로써 국내 전력시장을 개념적으로 모의할 수 있고 입력변수들의 변동성(Volatility)을 반영한 시뮬레이션이 가능한 특징을 가지고 있다.[8]

사례연구에서는 국내전력시장의 모의를 위하여 구성된 시장모델링에 대한 검증과 제안된 시장운영기술에 대한 SMP 및 제약발전비용의 영향분석을 수행한다.

#### 3.1 국내전력시장의 모델링 및 검증

본 사례연구를 위해서 '06년도 국내 전력시장을 모델링 하였는데 여기에 사용된 자료는 한국전력공사의 전력거래지원시스템의 DB를 활용하였다. 시장분석모델의 정확도에 대한 검증을 위해서 2006년도 SMP산정결과(실적)와 Fast-Forward를 이용한 SMP모의 결과를 비교하였는데 그 결과 9.03%의 평균오차를 보였으며, SMP Duration Curve의 비교결과는 아래의 그림5와 같이 산정되었다. 이러한 차이가 발생한 이유는 CBP시장에서 SMP에 포함되는 발전기 기동비용이나 무부하 비용을 Fast-Forward 모델에서는 반영할 수 없기 때문이다. 하지만 본 연구에서는 제안된 운영기술의 적용에 따른 변화를 살펴보는 것이기 때문에 이러한 오차는 무시하였다.

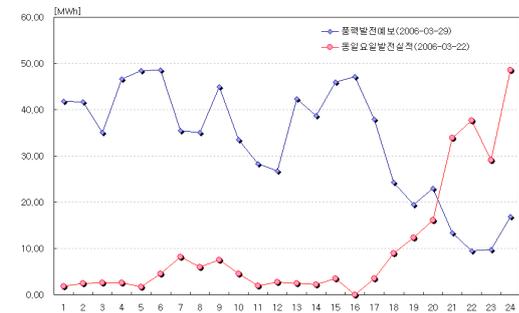


[Fig 7] 실제 SMP( '06)와 FF에서 모의결과 비교

### 3.2 제안된 시장운영기술에 대한 영향분석

본 논문에서 제안된 CBP시장 운영기술을 적용하는 경우에 대한 영향을 분석하기 위해서 '06년 특정일을 대상으로 개선 전/후의 SMP를 산정하여 그 차이를 비교하고 제약발전비용(CON, COFF)의 변화를 살펴보았다. 이를 위해서 본 사례분석에서는 국내에서 운영되고 있는 풍력발전단지 중 5개를 선정하고 이들 발전기들의 과거 동일 요일, 동일 거래시간대의 발전량 데이터(2006년 3월 22일)를 이용하여 현재 운영되고 있는 전력시장을 모의하였으며, 풍력발전 예보의 오차가 없는 것으로 가정하고 특정일(2006년 3월 29일)의 풍력단지 발전실적을 예보 값으로 가정하여 제안된 방식의 시장운영을 모의하였다. 그리고 이 결과들의 차이로써 시장가격의 차이와 제약비용의 차이를 산정하고 그 결과를 분석하였다. 단, 본 사례연구에서 제안된 방식의 영향을 확실하게 살펴보기 위하여 풍력발전기들의 설비용량을 10배로 적용하였다.

아래의 그림6은 특정일(2006년 3월 29일)의 가격결정계획 시 적용된 두 가지 풍력발전출력을 보여주고 있다. 붉은색의 그래프가 기존의 가격결정방식에서 사용하고 있는 것으로써 전주 동일요일 동일시간대의 발전출력이고, 푸른색의 그래프는 본 연구에서 제안한 시장운영방식에서 사용하는 발전단지별 발전출력 예보결과를 보여주고 있다.



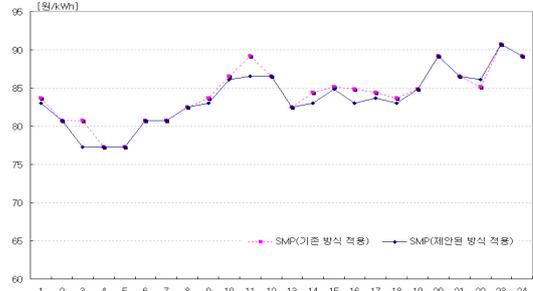
[Fig 8] 사례연구에 사용된 예보자료 및 과거 동일 요일에 대한 발전실적 (5개 풍력발전단지 자료)

### 3.3 분석결과

본 연구에서 제안한 시장운영방식의 적용 시 예상되는 영향을 분석한 결과, SMP의 산정결과는 아래의 그림7과 같은데, 붉은색 그래프가 기존의 시장운영 방식에서 산정된 SMP이고 푸른색 그래프가 제안된 시장운영 방식으로 산정된 SMP이다. 제안된 방식의 적용 전과 후의 풍력발전 출력예측 오차와 SMP의 변화량간의 관계를 살펴본 결과 그림8과 같이 풍력발전의 출력차이(출력예보-과거출력)가 양의 방향으로 발생될 경우 SMP는 낮아지며, 반대로 출력차이가 음의 방향으로 발생될 경우 SMP는 높아지는 것을 관찰 할 수 있었다. 즉, 풍력발전의 예보결과에 따라서 SMP는 증가 또는 감소할 수 있는 것이다. 그러나 SMP의 변화 폭은 시간대별 발전원 구성 및 계통 총 예측수요 등의 변수에 따라서 결정되기 때문에 풍력발전 출력예측 오차와 크게 상관관계를 가지지 않는 것으로 나타났다.

제약비용의 경우, 가격결정계획 시와 실제 계통운영 시 각 발전기의 출력계획과 계량실적의 차이에 따라서 발생되는데, 본 연구에서는 풍력발전의 출력차이가 모두 제약비용으로 반영된다는 것을 전제로 산정하였다. 즉, 풍력발전 출력예측오차가 양의 방향(+)으로 발생된 경우 기존의 가격결정계획에 포함되어 있던 발전전력들이 실제발전 시 제외되어 COFF가 발생되고, 반대로 출력의 차이가 음의 방향(-)으로 발생되는 경우 기존 가격결정계획에 포함되어 있지 않던 발전력이 실제발전 시 포함되어 CON이 발

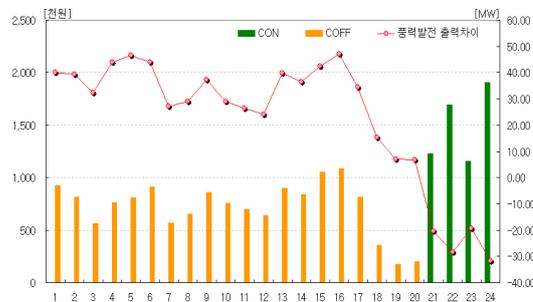
생되는 것이다. CON의 경우 SMP와 해당발전기의 변동비 중에 작은 값을 선택하여 정산토록 하고 있으며, COFF의 경우 SMP와 변동비의 차이로 정산하고 있기 때문에 본 연구에서는 풍력발전기로 인해서 제약발전 및 제약비발전을 하는 발전기를 단일 발전기로 생각하고 그 발전기의 변동비를 60원으로 가정하였는데 이때 산정된 총 제약비용은 20,350천원(CON 5,983천원, COFF 14,368천원)이며 시간대별 산정결과와 풍력발전기 출력의 차이는 아래 그림9와 같은 관계를 가진다.



[Fig 9] 특정일에 대한 SMP모의 결과 비교



[Fig 10] 풍력발전 출력예보기술 적용 시 영향분석



[Fig 11] 제약비용(CON,COFF)산정 결과

## 4. 결론

전 세계적으로 신/재생에너지의 도입이 활발하게 진행되고 있으며, 그 보급의 확대 속도는 더욱 빨라질 것으로 전망되어지고 있다. 국내의 경우에도 정부차원에서 신 재생에너지 개발에 대한 기술개발과 투자가 증가하고 있고 보급도 점차적으로 증가 할 것으로 전망되고 있다. 그러나 신 재생에너지의 도입에 있어서 전력계통 및 전력시장운영 측면에서 사전에 시스템적인 대비가 되어있지 않는다면 비효율적인 운영은 물론 불필요한 사회적 비용의 증가가 발생할 것이고 이러한 사실은 다양한 선행연구들에서 시사하고 있다.[2,3,4]

이에 본 논문에서는 우리나라의 전력시장 운영에 있어서 대규모 신 재생에너지 발전원의 도입 시 적절한 운영방안 제시하였고 특히 풍력발전 예보기술의 적용을 통한 실질적인 시장운영방안을 제안하였다. 이 제안된 방안은 현재 연구 및 개발되고 있는 풍력발전 및 기타 신 재생에너지의 출력예보 기술이 일정수준 이상의 정확성과 신뢰성이 보장되는 경우 매우 유용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 논문의 사례연구에서는 이러한 시장운영 기술의 적용에 따른 전력시장가격(SMP)의 왜곡 저하 및 제약비

용(CON, COFF)의 감소효과를 정량적으로 분석하였는데 그 결과, 풍력발전 예보기술을 적용한 경우 SMP가 왜곡되는 정도를 최소화 할 수 있었으며, 예측오차를 최소화함으로써 제약발전비용을 저감 시킬 수 있었다. 물론 수요예측오차나 자기계약 등과 같은 제약비용을 발생시키는 요소들과의 상관관계를 분석하는 것이 필요로 되나, 본 논문에서는 현재 CBP시장에서 비 중앙발전기로서 신 재생에너지원을 취급함으로써 발생할 수 있는 시장가격의 왜곡과 제약비용의 최소화를 위한 개선방안을 제시하고자 하였다.

본 논문에서 제안된 시장운영 기술은 추후 대규모 신 재생에너지 발전단지가 건설될 경우 매우 유용하게 적용될 수 있는 기술이며, 이를 위해서는 현재 진행 중에 있는 풍력발전을 비롯한 신 재생에너지원 발전 출력예보 기술의 신뢰성과 정확성을 높일 수 있는 추가적인 연구가 필요로 되고, 또한 일정규모 이상의 신 재생에너지 발전단지에 의무적인 출력예보시스템의 설치가 이루어질 필요가 있다. 그리고 전력시장 참여자들의 공감대 형성을 통한 시장운영제도 개편이 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Wind energy development, 2006, BTM Consult Aps
- [2] Soens, J, "Impact of Wind Energy in a Future Power Grid, Katholieke University Leuven, Belgium, Pd.D. Dissertation, 2005
- [3] H. Holttinen, "Optimal electricity market for wind power", Energy Policy 33, 2005
- [4] Ronan Doherty, "System Operation with a Significant wind power penetration", IEEE power tech, Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE
- [5] 전력거래소, "전력시장운영규칙", 2006.01
- [6] PJM, "<http://www.pjm.com/services/courses/downloads/20050711-pjm-101-wind-gen-present.pdf>"
- [7] 김현구, "월령단지 풍력발전 예보모형 개발에 관한 연구", 한국태양에너지학회 논문집 vol.26, No.2, 2006
- [8] EPRI, "Fast-Forward 2.1 User's Guide", 2004.8