

# 대규모 풍력발전 계통 연계시 주요 송전망 제약예측시스템 개발에 관한 연구

(A Study on the Development of Critical Transmission Operating Constraint Prediction  
(CTOCP) System With High Wind Power Penetration)

허진\*

(Jin Hur)

## Abstract

Globally, wind power development is experiencing dramatic growth and wind power penetration levels are increasing. Wind generation is highly variable in time and space and it doesn't guarantee the system reliability and secure system operation. As wind power capacity becomes a significant portion of total generation capacity, the reliability assessment for wind power are therefore needed. At present, this operational reliability assessment is focusing on a generation adequacy perspective and does not consider transmission reliability issues. In this paper, we propose the critical transmission operating constraint prediction(CTOCP) system with high wind power penetration to enhance transmission reliability.

Key Words : Wind Power, Critical Transmission Operating Constraint Prediction, System Reliability

## 1. 서론

신재생에너지원(Renewable energy resources) 중  
에서 풍력 발전(Wind generating resource)이 다른 에  
너지원에 비해서 성장속도가 가파르게 증가하고 있으  
며, 대규모 풍력발전이 전력시스템에 연계되고 운영될  
것으로 예상된다. 풍력 발전은 기존의 화석연료를 이  
용한 발전과 매우 다른 특성을 가지고 있으며, 변동성

전원(Variable generation)으로 효율적 계통연계를 위  
한 철저한 대비가 필요한 실정이다[1-3]. 우리나라는  
아직 전체 발전량을 기준으로 풍력 발전이 차지하는  
비율이 미미하지만, 향후 대규모 해상풍력 단지 조성  
과 스마트그리드(SmartGrid) 환경변화에 따라 중소규  
모의 풍력발전이 계통에 연계되면 계통 운영 및 계획  
에 있어 기존에 경험하지 못한 다양한 문제가 대두될  
것으로 예상된다.

신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio  
Standard)에 의해 2022년까지 신재생에너지가 총 발  
전량의 10%, 6차 전력수급계획에 의해 신재생에너지  
설비가 2027년까지 32GW까지 확대되는 등 향후 신  
재생에너지 설비가 확대될 전망이다. 신재생에너지

\* Main author : Assistant Professor, Department of  
Energy Grid, Sangmyung University  
Tel : 02-781-7576, Fax : 02-2287-0097  
E-mail : jinhur@smu.ac.kr  
Received : October 10, 2014  
Accepted : November 10, 2014

는 기존 발전설비와는 달리 시간과 공간의 환경제약으로 출력 간헐성이 존재하므로 계통 연계시 계통의 신뢰도 및 안전도를 보장하지는 않는다. 풍력발전 용량이 전체 발전원 구성에 큰 비중을 차지함에 따라 풍력발전원에 대한 신뢰도 평가가 필요하며, 단기 계통운영 측면에서 신재생설비 출력 예측방안 및 장기 계획 측면에서 설비의 공급신뢰도 분석 방안이 검토되고 있다.

공급신뢰도를 산정하는 대표적인 방법으로 ELCC (Effective Load Carrying Capacity)가 검토되고 있다[4]. 신재생에너지 설비의 ELCC를 계산하여 국내 신재생에너지 설비의 용량가치를 평가하며 ELCC는 계통에서 신재생에너지 설비 투입되기 전후에 같은 적정 신뢰도 수준을 만족하는 범위에서 증대 가능한 부하량으로 정의된다. 신재생에너지 설비의 ELCC 계산을 위해서는 피크수요와 전원 구성에 따른 전력 계통의 신뢰도 기준을 반복적으로 계산하여야 하고, 신재생에너지 설비 예측에 따른 계통 신뢰도 기준을 다시 계산이 필요하기 때문에 많은 데이터와 계산량을 요구된다. 신재생에너지 설비의 ELCC는 계통의 신뢰도를 유지하는 수준에서 신재생에너지 설비의 공급능력을 평가하기 때문에, 신재생에너지 설비의 투입 전후 계통 신뢰도가 유지된다는 가정이 중요하고, 공급지장기대값 산정은 계통의 공급지장확률(Loss of Load Probability, LOLP)과 시간의 곱으로 계산한다. 현재 신뢰도 평가는 발전원의 적정도(공급신뢰도) 집중되어 있고 풍력 발전원 연계에 따른 송전망 신뢰도 평가는 고려되고 있지 않다.

미국 캘리포니아 ISO의 경우 송전망 예측(Critical Operating Constraint Forecast, COCF) 프로그램 [5] 개발을 추진하고 있고, ERCOT의 경우 주요 선로의 운영 제약(operating constraints)을 예측하고 위험도(Risk metric)를 분석할 수 있는 시스템 개발을 검토하고 있다. 이를 위해 풍력발전 투입에 따른 운영 제약 예측 및 위험 관리 시스템(Forecast and risk metrics around critical operating constraints) 개발을 추진하고 있으며, 시스템 구축을 위해 예측된 풍력발전 투입 모델링(Wind power penetration

modeling) 개발을 진행하고 있다. 하지만 아직 국내에서는 풍력발전 계통 연계시 주요 송전 선로의 예측 프로그램 개발 관련 연구가 수행되지 않고 있다.

본 논문에서는 대규모 풍력전원이 계통에 투입될 때 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS) 응용 프로그램에 적용될 수 있는 송전망 제약 예측 시스템을 제안한다. 송전망 제약 예측 시스템은 하루 전(Day Ahead) 계통데이터를 EMS 시스템으로부터 파라미터를 받아 조류 방향 및 분배를 담당하는 민감도계수(Shift Factor)를 이용하여 조류변동성을 예측한다. 풍력발전 예측은 기존의 시계열기반의 예측방법이 아닌 풍력발전의 공간적 특성을 고려한 공간보간법[3-4]을 이용한 확률기반의 크리깅(Kriging Techniques) 방법을 제안하였다. 송전망 제약예측시스템은 풍력발전원의 계통연계를 통해 주요 송전선로(Critical Transmission Lines)의 열용량한계를 예측하고 이를 바탕으로 긴급 상황에 대처할 수 있는 정보를 시스템 운영자(System operator)에게 사전에 제공하는 기능을 제공한다. 본 논문에서 제안하는 송전망 제약예측시스템을 해외에서 개발한 기존 시스템과 비교하면, EMS 시스템 응용 프로그램에 신속한 처리를 위해 감도계수(Shift Factor, PTDF) 파라미터를 적용하였고 공간법 기반의 풍력 예측시스템을 추가하여 개선된 송전망 제약예측시스템을 제안한다.

## 2. 본 론

### 2.1 송전망 제약 예측 시스템(CTOCP)

대규모 풍력전원의 계통 투입과 불확실성의 증가에 따라 계통운영 입장에서 선로조류의 예측이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 단기(short term/next several hours)적으로 분석 및 예측하고 이를 바탕으로 긴급 상황에 대처할 수 있는 정보를 시스템 운영자(System operator)에게 사전에 제공할 수 있어야 한다. 캘리포니아 ISO는 주요선로에 대한 예측시스템을 EPRI와 함께 연구 개발을 완료

하여 시스템 적용을 검토하고 있다[5]. 캘리포니아 ISO의 예측 시스템을 분석하여 개선된 송전망 제약 예측 시스템(Advanced Critical Operating Constraint Forecast, COCF)을 그림 1과 같이 제안하였다. 개선된 COCF 시스템은 신속한 선로조류를 예측하기 위해 민감도계수(Shift Factor, PTDF)를 적용하고 확률기반(Kriging Technique)의 풍력발전 출력예측 기능을 추가하였다. 주요 선로의 전력조류를 예측하기 위해 다음의 사항을 입력으로 한다.

- 전력조류계산 정보
- 수요(현재 및 하루 전 예측) 정보
- 발전원(현재 및 하루 전 예측) 정보
- 주요 송전선로 및 민감도 계수 정보
- 풍력발전예측 정보

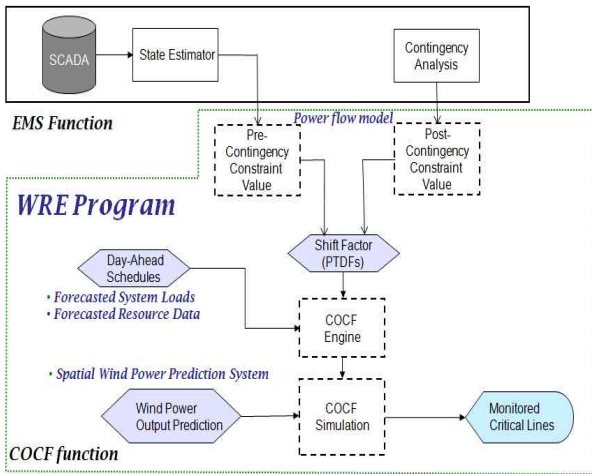


그림 1. 송전망 제약 예측 시스템 설계  
Fig. 1. Design of the CTOCP System

캘리포니아 ISO의 COCF 프로그램은 주요 송전선로의 예측 조류량을 산정하기 전력조류방정식 식 (1)~(2)로부터 식 (3)과 같은 자코비언(Jacobian) 행렬을 계산하여 식 (4)와 같이 예측 조류량을 산정하였다.

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_{Line}(t) = P_{Line}(t0) + \begin{bmatrix} \frac{\partial F1}{\partial \delta} & \frac{\partial F1}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $P_{Line}(t0)$ 는 초기 조류량,  $F1$ 은 선로조류의 감도행렬(sensitivity matrix)을 나타낸다. 선로조류의 감도행렬을 산정하기 위해 많은 연산과정 및 메모리가 필요하다. 또한 그림 1에서 볼 수 있듯 기존의 COCF 시스템은 SCADA 시스템과 EMS 응용프로그램으로 연계되어 실시간 운영에 적용될 예정이지만 풍력 발전원 같은 변동성 전원(Variable Generation Resource)의 연계를 포함하고 있지 않다.

본 논문에서 제시하는 송전망 예측 시스템은 캘리포니아 ISO의 COCF 모델을 참고하여 예측조류를 산정할 때 선로 조류 감도 및 자코비언(Jacobian) 행렬을 대신해서 식 (5)와 같이 민감도계수(Shift Factor)를 제안한다. 민감도 계수(Shift Factor)는 EMS로부터 PTDF(Power Transfer Distribution Factor,  $\hat{C}$ ) 값을 받아 선로 예측값에 적용하였다. 수정된 COCF 모델에서는 유효전력을 대상으로 하기 때문에 식 (5)는 식 (6)과 같이 간략화할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Line}(t) &= P_{Line}(t0) + \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \\ &= P_{Line}(t0) + \hat{C} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_{Line}(t) = P_{Line}(t_0) + \hat{C} \begin{bmatrix} \Delta P(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 2는 개선된 COCF 알고리즘 순서도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯 EMS로부터 PTFDF를 받아 COCF 수행 연산 방정식을 구성한다. 풍력발전의 출력특성을 COCF 해석에 응용하기 위해 SPS(Spatial wind power output Prediction System)를 개발하였다. 기존의 시계열 분석과 다르게 풍력발전원의 공간 특성을 고려한 공간정보 모델링을 통해 풍력발전 출력 예측을 수행하고 COCF 해석을 수행한다. SPS 시스템에 세부사항은 2.2절에서 기술한다.

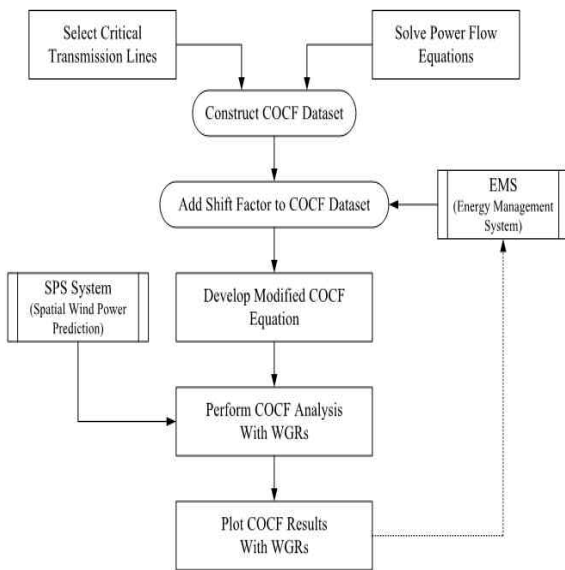


그림 2. 수정된 COCF 산정 순서도  
Fig. 2. Flow Chart of the Modified COCF Process

## 2.2 풍력발전 출력 예측 시스템(SPS) 개발

풍력발전은 기존 발전설비와 달리 시간(time)과 공간(space)의 환경제약으로 출력 간헐성이 존재하므로 불확실성을 고려한 계통 계획시 풍력발전의 예측은 매우 중요하다. 기존의 풍력발전 예측은 시계열 기반의 통계적 분석(ARMA/ARIMA) 또는 과거 이력데이터를 이용한 패턴분석으로 예측을 하였지만 상당한

예측오차 발생하기 때문에 시계열예측을 개선할 수 있는 공간예측 기법 개발이 필요하다.

그림 3에 확률기반의 공간보간법 개념도를 나타내었다. 공간보간법은 식 (7)에서 볼 수 있는 기존 측정 데이터(Measured data)를 이용하여 목적데이터(Target data,  $Z(s_0)$ )를 공간모델링을 통하여 weighting factor( $w_i$ )를 산정한다. 공간보간법은 기존의 이력데이터가 필요 없으며, 확률 기반 수학적 모델링이다[6-8]. 확률기반의 공간보간법을 적용한 풍력발전 출력 예측 시스템(Spatial wind power output Prediction System, SPS)를 개발하여 송전망 제약 예측 시스템에 적용하였다.

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i(s_0) \times Z(s_i) \quad (7)$$

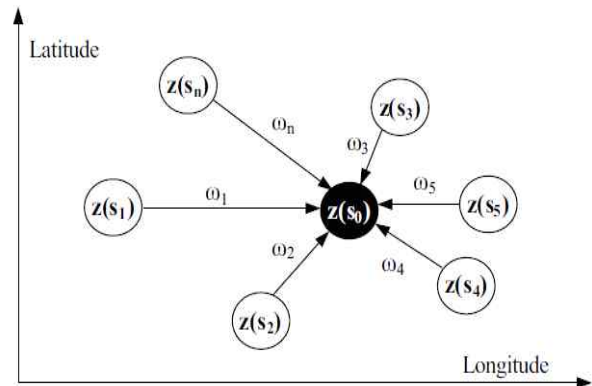


그림 3. 확률기반의 공간보간법(크리깅) 개념도  
Fig. 3. Concept Diagram of Kriging Techniques

그림 4에 텍사스 McCamey 지역의 풍력단지 구성도를 나타낸다. 2009년 9월 10개 풍력발전원의 측정 데이터를 기반으로 크리깅 기법을 이용한 풍력발전 예측 시스템(SPS)으로 신규 풍력발전원의 출력을 예측하여 사례연구(2.4절)에서 COCF 유효성을 검증한다.

공간보간법 기반의 풍력발전 예측 시스템을 이용한 풍력발전 출력예측(Sampled Power Output)을 그림 5에 나타내었고 사용된 데이터는 2009년 Texas McCamey area의 10개 풍력발전 단지로부터 측정된

대규모 풍력발전 계통 연계시 주요 송전망 제약예측시스템 개발에 관한 연구

풍력발전 출력값(measured power output)을 이용하였다.

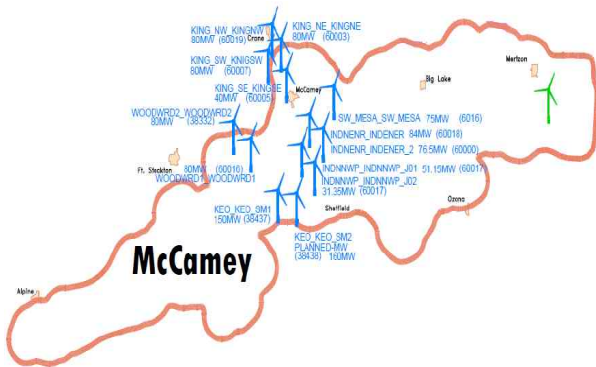


그림 4. Texas McCamey 지역 풍력단지 구성도  
Fig. 4. Wind Farms of McCamey area in Texas

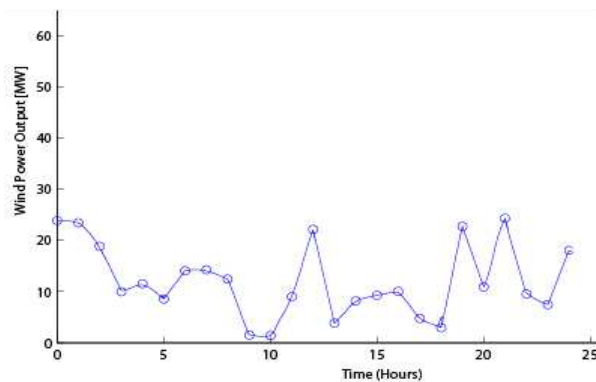


그림 5. SPS 시스템을 이용한 풍력발전 출력  
Fig. 5. Wind Power Output through the SPS system

### 2.3 송전망 제약 예측 프로그램 개발

대규모 풍력 발전원의 계통 연계시 주요 송전선로의 제약 용량을 예측하기 위해 송전제약 예측 프로그램(Wind Reliability Enhancement, WRE) 프로그램을 개발하였다. WRE 프로그램의 주요 모듈과 프로그램 디자인을 그림 6에 나타내었다. 주요 모듈로는 전력조류계산 모듈, 하루 전 스케줄(Day Ahead Schedule) 모듈, COCF 실행 및 결과 도식화 모듈로 구성되어 있다.

WRE 프로그램의 기본사양을 표 1에 요약하였다.

윈도우 시스템을 기반으로 하며, 닷넷 환경에서 프로그램에 구동한다. 입력 데이터베이스는 Access DB를 사용한다. 프로그램 구현을 위해 MMI(Man Machine Interface) 인터페이스는 Visual Basic .NET을 이용하였고 COCF 연산 프로세스 및 구동 알고리즘은 Visual C# .NET으로 구현하였다.

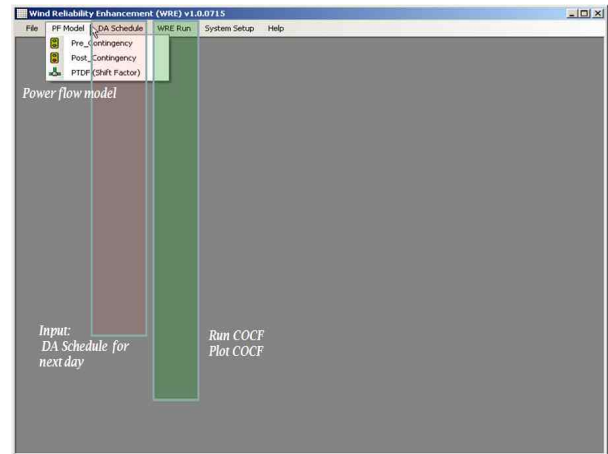


그림 6. Win Reliability Enhancement 프로그램 주요 모듈  
Fig. 6. Main Modules of WRE Program

표 1. Win Reliability Enhancement 프로그램 사양  
Table 1. Specifications of WRE Program

WRE Program	Specifications
Operating System	Windows 32/64 bit System (Windows 7 higher)
Input Database	Microsoft Access DB (MS Access 2003 higher)
Platform	MS .NET Framework
Development Language	Visual Basic .NET (MMI) Visual C# (Algorithm)

그림 7에 WRE 프로그램의 입출력 개념도를 나타내었다. 그림 1에서 기술한대로 EMS function과 COCF function을 중심으로 입력데이터를 구성한다. 입력데이터 종류별로 CSV(Common-Separated Value) 구성된 후 Access DB로 구성하여 WRE 프로그램의 COCF 연산엔진으로 입력된다. COCF 연산 후 제약을 위반한 선로 및 예측 조류량을 출력한다.

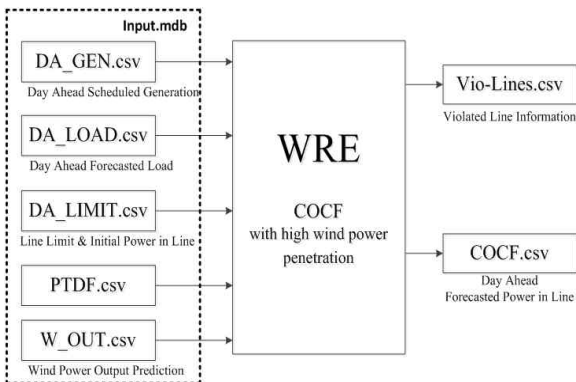


그림 7. Win Reliability Enhancement 프로그램 입출력  
Fig. 7. Input-Output Interface of WRE program

## 2.4 사례연구

대규모 풍력 발전원의 계통연계를 모의하기 텍사스 지역의 McCamey 풍력단지에서 9모선 계통의 등가 모델링하여 COCF 분석 모의를 수행하였고 그림 8에 McCamey 지역에 3기 9모선 계통도를 나타내었다.

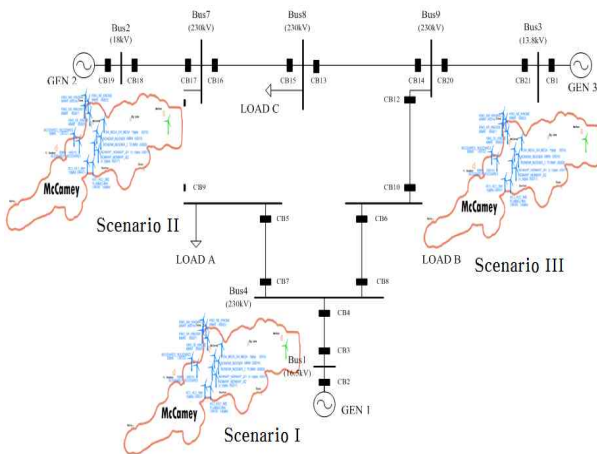


그림 8. McCamey 지역의 3기 9모선 계통 시스템  
Fig. 8. 3-Machine 9-Bus Power System in McCamey area

WRE 프로그램의 적정성을 검토하기 위해 모선 2, 3, 4에 설비용량 50MW 풍력발전원 연계를 검토하였다. 출력변동 특성은 확률기반의 공간보간법을 이용하여 그림 5에 제시된 예측된 풍력발전의 출력변

동 특성을 적용하였다. 송전망제약을 검토할 주요 선로로 6개 선로(L5-4, L6-4, L7-5, L9-6, L7-8, L8-9)를 선정하였고 선로의 열용량제약은 250 MW로 가정하였다.

그림 9는 풍력발전원이 연계가 되기 전 정상상태(Base Case) 조류상태를 나타내며, 그림에서 볼 수 있는 선로제약을 위반한 선로는 없다.

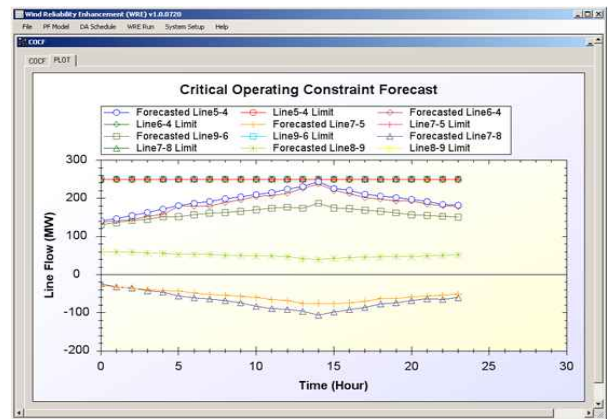


그림 9. 정상상태 송전망 조류 분포  
Fig. 9. Transmission Line Flows in Base Case

그림 10은 풍력발전원이 모선 4에 연계된 사례를 나타낸다. L5-4이 2h~9h 사이에 선로제약 위반이 WRE를 통해 분석되어 주요 선로(Critical Operating Line) 제약 위반 예측 사항이 운영자에게 통보된다.

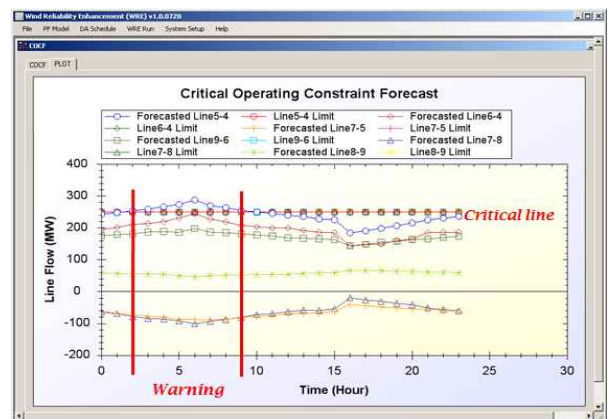


그림 10. 4번 모선에 풍력발전원이 연계된 경우(시나리오 I)  
Fig. 10. Scenario I : Wind Generation Resources connected bus 5

그림 11은 풍력발전원이 모선 2에 연계된 사례를 나타낸다. L6-4이 4h~8h 사이에 선로제약 위반이 WRE를 통해 분석되어 주요 선로(Critical Operating Line) 제약 위반 예측 사항이 운영자에게 통보된다.

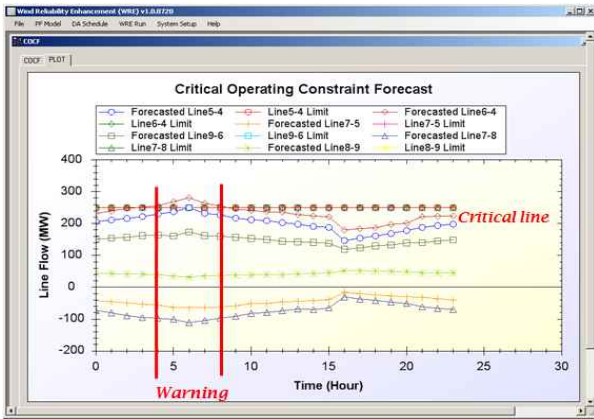


그림 11. 2번 모선에 풍력발전원이 연계된 경우 (시나리오 II)

Fig. 11. Scenario II : Wind Generation Resources connected bus 2

그림 12는 풍력발전원이 모선 3에 연계된 사례를 나타낸다. 앞선 사례와 달리 풍력발전원이 모선 3에 연계된 경우, 선로제약 위반 예측사항이 발생하지 않았다.

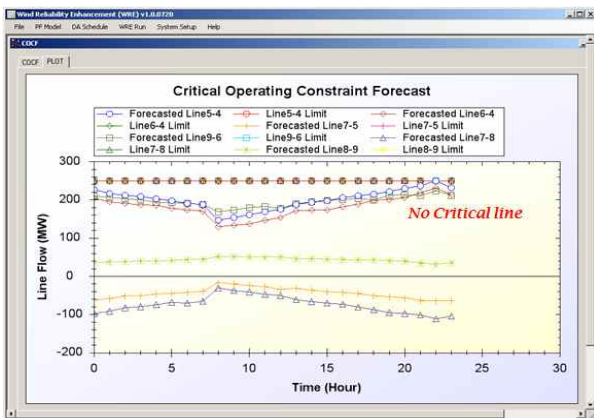


그림 12. 3번 모선에 풍력발전원이 연계된 경우 (시나리오 III)

Fig. 12. Scenario III : Wind Generation Resources connected bus 3

사례연구 결과를 살펴보면 풍력발전단지가 모선 2

와 3에 연계된 경우 선로 L5-4와 L6-4에 제약 위반이 발생하였고 반면, 모선 3에 풍력발전원이 연계된 경우 제약이 발생하지 않았다. 대규모 풍력발전 연계에 따라 하루 전 제약 위반을 탐색하여 계통운영자에게 송전망 제약 예측 사항을 제공하여 계통의 효율성 및 안전성을 제고할 수 있다.

### 3. 결론

풍력발전 용량이 전체 발전원 구성에 큰 비중을 차지함에 따라 풍력발전원에 대한 신뢰도 평가가 필요하다. 현재 신뢰도 평가는 공급신뢰도에 집중되어 있고 풍력 발전원 연계에 따른 송전망 신뢰도 평가는 고려되고 있지 않다.

본 논문에서는 대규모 풍력발전원의 계통 연계시 주요 송전선로의 운영 상태를 예측(COCF)하는 시스템을 제안하였다. COCF 프로그램은 EMS로부터 계통 데이터(전력계통모델 및 PTDF), 하루 전(Day Ahead) 계통부하 및 발전원 정보, 그리고 SPS 시스템으로부터 풍력발전 출력예측을 받아 COCF 엔진을 구성하여 해석을 수행한다. 개발한 WRE 프로그램은 텍사스 McCamey 지역의 풍력단지의 실측데이터를 기반으로 풍력발전원의 출력을 예측하고 9 모선 시스템에 적용하여 타당성을 검토하였다.

향후, WRE 프로그램은 EMS 응용프로그램(Application Software)으로 활용될 수 있고 대규모 풍력발전의 계통연계를 대비하기 위해 현재 운영 계획 중인 K-EMS(한국형 에너지관리시스템)에 적용 가능할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2013년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

*This research was supported by a 2013 Research Grant from Sangmyung University.*

#### References

[1] K. Orwig and B. Karlson, "Wind energy 101," in 4th

- international conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources, December 2010.
- [2] A. Botterud, J. Wang, V. Miranda, and R. J. Bessa, "Wind power forecasting in U.S. electricity markets," *The Electricity Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 71-82, April 2010.
- [3] L. Xie, P. Carvalho, L. Ferreira, J. Liu, B. Krogh, N. Popli, and M. Ilic and, "Wind integration in power systems: Operational challenges and possible solutions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 214-232, Jan 2011.
- [4] D'Annunzio, C. and Santoso, S., "Noniterative Method to Approximate the Effective Load Carrying Capability of a Wind Plant", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.23, no.2, pp.544-550, June 2008.
- [5] S. Lee and L. Min, "Critical Operating Constraints and Probabilistic Congestion Forecast", *EPRI*, September 2008.
- [6] A. L. Rogers, J. W. Rogers, and J. F. Manwell, "Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, no. 3, pp. 243-264, 2005.
- [7] Y. Gao and R. Billinton, "Adequacy assessment of generating systems containing wind power considering wind speed correlation," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 3, no. 2, pp. 217-226, 2009.
- [8] R. Garka and I. Kruminienė, "Spatial analysis and prediction of curonian lagoon data with gstat," *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 9, no. 1, pp. 39-50, 2004.

### ◇ 저자소개 ◇



#### 허진 (許眞)

1973년 4월 27일생. 1997년 고려대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 University of Texas(Austin) 졸업(박사). 현재 상명대학교 에너지그리드학과 조교수.