

풍력발전단지 관리 · 분석 시스템의 Real-Time Simulator 도입을 위한 계통모델 연동방안 연구

(A Study About Grid Impose Method On Real-Time Simulator For Wind-Farm
Management System)

정승민* · 유연태 · 김현욱 · 장길수**

(Seungmin Jung · Yeuntae Yoo · Hyun-Wook Kim · Gilsoo Jang)

Abstract

Owing to the variability of large-scaled wind power system, the development of wind farm management technologies and related compensation methods have been receiving attention. To provide an accurate and reliable output power, certain wind farm adopts a specified management system including a wind prediction model and grid expectation solutions for considering grid condition. Those technologies are focused on improving the reliability and stability issues of wind farms, which can affect not only nearby system devices but also a voltage condition of utility grid. Therefore, to adapt the develop management system, an expectation process about voltage condition of Point of Common Coupling should be integrated in operating system for responding system requirements in real-time basis. This paper introduce a grid imposing method for a real-time based wind farm management system. The expected power can be transferred to the power flow section and the required quantity about reactive power can be calculated through the proposed system. For the verification process, the gauss-seidel method is introduced in the Matlab/Simulink for analysing power flow condition. The entire simulation process was designed to interwork with PSCAD for verifying real power system condition.

Key Words : Wind Farm Management System, Real Time Simulator, Voltage Regulation,
Power Flow Analysis, System Monitoring

* Main author : Ph.D. Candidate, School of
Electrical Engineering, Korea University
** Corresponding author : Professor, School of
Electrical Engineering, Korea University
Tel : 02-3290-3675, Fax : 02-3290-3692
E-mail : gjang@korea.ac.kr
Received : 2015. 3. 30
Accepted : 2015. 5. 14

1. 서 론

신재생에너지원의 변동성에 주목하여 다양한 제어 기법과 보상방안이 연구되고 있으며, 특정 시스템에 한정하지 않고 기계 · 전기 · 예측시스템 등 다수의 분야를 통합하여 제어 개선 효과를 극대화하고자 하는

연구가 진행되고 있다[1]. 해당 연구는 소규모 풍력시스템에 실증적으로 도입되고 있으며, 대규모 풍력발전단지 개발사업과 연계하여 제어시스템 구성 및 도입, 다양한 풍력발전기와 응동 위한 범용성 확대 등 개발 범위가 확대되고 있다. 특히 풍력발전단지를 효과적으로 관리하기 위한 다양한 제어기법이 소개되고 있고, 효과적인 예측을 위해 후류효과와 같은 기계적 특성을 바탕으로 풍력발전단지 제어시스템 구성이 진행되고 있다[2]. 이러한 풍력발전단지 제어시스템에서는 예측된 풍속과 측정된 연계지점(PCC)의 전압을 바탕으로 유효전력과 무효전력관리를 수행하며 다양한 최적화 과정을 도입함으로써 그 효과성을 입증하고 있다[3-4]. 이러한 풍력발전단지 제어시스템 안에서 발생한 유효전력/무효전력 지령치가 계통에 미치는 영향을 사전에 판단하기 위해서는 전력계통 모의 시뮬레이터와 같은 해석 툴로 계통에 미치는 영향을 판단해야 하지만, 이러한 풍력발전단지 제어관리 시스템은 일반적으로 컴퓨터 코드 기반으로 구성되어 있어 타 전력계통 해석 시뮬레이터와 연동이 쉽지 않고 연동과정에서도 계산속도 및 통신문제 등 현실적으로 고려해야 할 사항이 있다[5].

특히 실시간으로 계통의 상황을 반영해야 하는 관리 시스템은 전력의 지령 값에 따른 전압 변동을 사전에 예측할 수 있는 과정이 포함되어야 하며 해당 과정은 과도적인 특성을 일정 부분 반영할 수 있도록 구성되어야 계통의 순간적인 변화에 능동적으로 대처할 수 있다.

일반적인 풍력발전 실시간 관리 시스템은 Real Time Simulator (RTS)로 구성되며 해당 시스템은 코드기반의 시스템으로 계통 상태 등의 정보를 반영하여 전압 상태 예측을 수행하기 위한 전력 계통 해석 과정을 포함하도록 구성할 수 있다. 하지만 계통의 과도 특성을 반영하기 위해서는 시스템 특성을 고려한 전달 함수를 포함해야 하며, 이는 PSCAD와 같은 EMTDC 시뮬레이터를 통해 구성/검증되어야 한다. 또한 구성된 해석시스템의 전압 변동은 전력 해석 툴을 이용해 비교·검증되어야 한다.

본 논문에서는 일반적으로 수행되는 조류계산을 바탕으로 PSCAD를 이용, 풍력발전기 지령 및 전압 변

동의 전달 함수를 구성하였다. 해당 과정을 통해, 풍력발전단지 제어 시스템의 RTS에서 효과적으로 계통영향을 모의할 수 있도록 코드를 구성하고, 계통 응답 및 전압 변동 특성을 PSCAD와 비교분석하고자 한다. 구성된 시스템 동작 특성이 적절히 반영되는지 확인하고 RTS에 삽입·검증 과정을 진행하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전단지 제어 시스템

풍력발전의 경우, 기상에 영향을 많이 받고 운영자의 요구에 쉽게 응답하기 어렵기 때문에, 최근 대용량 풍력발전단지를 효율적으로 운영하고자 기상정보 및 예측시스템을 활용하여 계통운영자에게 신뢰성 있는 출력 가능량을 전달하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 대용량 풍력발전단지의 경우, 각 풍력발전기의 뒷단에서 발생하는 후류 효과를 고려하여 다음 열에서의 풍속변동을 보다 정확히 예측하는 출력 예측시스템이 연구되고 있다. 나아가서 계통운영자의 지령 이상의 풍력발전출력은 자체적인 제어 시스템을 통해 제한함으로써, 계통에 보다 안정적인 전력 공급을 제공할 수 있도록 풍력발전단지 제어 능력을 확대하는 연구가 진행되고 있다[6].

2.1.1 풍력발전기 모델링

본 논문에서는 전기적 시스템의 특성 해석이 용이한 PSCAD를 활용하여 풍력발전단지를 구성하고자 한다. PSCAD로 출력 특성과 전력흐름을 확인하기 위해 각 기계적 특성과 제어부를 Averaged model로 구성하여 다수의 풍력발전시스템을 구성하였다[7-8].

그림 1은 본 논문에서 구성된 개별 풍력발전기 모델을 나타낸다. 풍력발전기는 풍속과 로터 블레이드의 상관관계에 의해 발전되고 바람으로 인해 회전하는 로터 축이 기어박스를 거쳐서 발전기 축과 연결되어 발전을 한다. Rotor-side convertor(RSC, 발전기 측 컨버터)의 전기적 토크 제어를 통해 Maximum power point tracking(MPPT, 최대 전력 출력 곡선)를 추종하고, 정격 출력 이상의 풍속이나 유효전력 출력 시 피

치제어를 수행하게 된다. 바람이 풍력발전기 앞면의 블레이드 면적을 지날 때 풍속으로부터 얻을 수 있는 터빈의 출력을 나타내면 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 공기밀도, r 는 블레이드의 반지름, v 는 풍속, C_p 는 출력 계수, λ 는 주속비, β 는 피치각을 의미한다.

풍력터빈의 출력 계수(C_p)는 주속비와 피치각에 따라 나타낼 수 있다. 출력 계수가 최대치가 되기 위해 풍력 터빈 최대출력제어를 수행해야 하며 본 논문에서는 시뮬레이션 내부에 Look-up table을 구성하여 블레이드 모델링을 수행하였다. 블레이드 내부의 주속비를 회전속도와 풍속의 비율로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\lambda = \frac{r\omega_b}{v} \quad (2)$$

여기서 ω_b 는 블레이드의 회전속도이다.

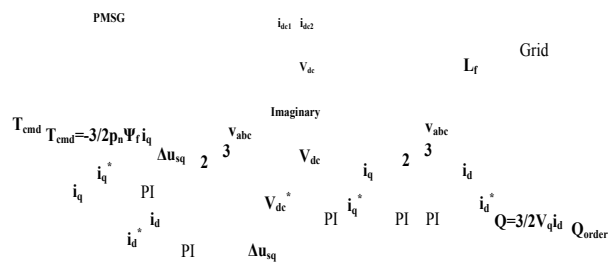


그림 1. Converter 모델 개념도
Fig. 1. Concept of the averaged converter

PMSG 풍력발전기의 컨버터는 RSC, Grid Side Converter(GSC, 계통 측 컨버터) 및 DC 부분으로 구분된다. RSC와 GSC는 각각 이상 전압원으로 3상을 구성하고 연계부분인 DC 전압은 수학적 계산을 통하여 산출된다. RSC는 전기적 토크를 제어해야 하므로 d-q변환과정을 거쳐, d축 전류성분을 0으로 하면

식 (3)과 같이 q축 성분 전류에 비례하도록 구성할 수 있다. P_n 은 영구자석의 극수이고 ψ_f 는 영구자석의 자속의 크기이다.

$$- \frac{3}{2} P_n \psi_f i_q \quad (3)$$

GSC는 DC 전압 레벨의 크기와 무효전력을 입력으로 제어하며, d-q변환을 수행하면 d축 전압은 0이 되므로 무효전력은 식 (4)와 같이 정리된다.

$$Q = - \frac{3}{2} V_q i_d \quad (4)$$

DC 전압은 이상 전압원을 이용하여 구상하였기 때문에 가상의 커패시터를 가정하고, RSC와 GSC에서의 전력에서 각각 DC 전압을 나누어 전류를 계산하고, 이를 활용하여 다음 State의 DC전압을 계산해두면 계산식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{c(t+1)} = \frac{1}{C} \left(\frac{P_{RSC}}{V_{dc}(t)} - \frac{P_{GSC}}{V_{dc}(t)} \right) dt \quad (5)$$

여기서 C는 커패시터 값이다.

2.1.2 풍력발전단지 구성

풍력발전단지는 삼성중공업에서 개발 중인 7MW급 PMSG 풍력발전기를 이용하여 구성되었으며, 실제 시스템의 단지 구성 정보(Layout)를 바탕으로 검증과정을 위해 모의 시스템을 구성하였다. 그림 2는 구성하고자 하는 풍력발전단지의 Layout을 나타낸다.

본 논문에서는 유/무효전력 출력 제어 시 풍력발전단지 내부의 전압 변동 검증과정을 바탕으로, 구성된 RTS 전용 예측시스템의 유효성을 확인하고자 한다. 따라서 전체 풍력발전단지를 고려한 검증과정은 불필요하며, 그림 1에 표시된 11기의 풍력발전기로 하나의 단지를 구성하고, 시스템 사양인 7.5MVA급 컨버터를 이용하여 지정한 출력 값에서의 PCC전압을 PSCAD를 이용하여 측정, 결과를 비교 분석하고자 한다.

풍력발전단지와 연계될 전력계통을 PSCAD 내부에

구성하기 위해서 등가 모델을 사용하였다. 일반적으로 전력계통 해석에서 등가 모선을 구성할 때 사용하는 Short Circuit Ratio (SCR, 단락비)를 이용하여 풍력발전단지 연계모선을 구성하였다.

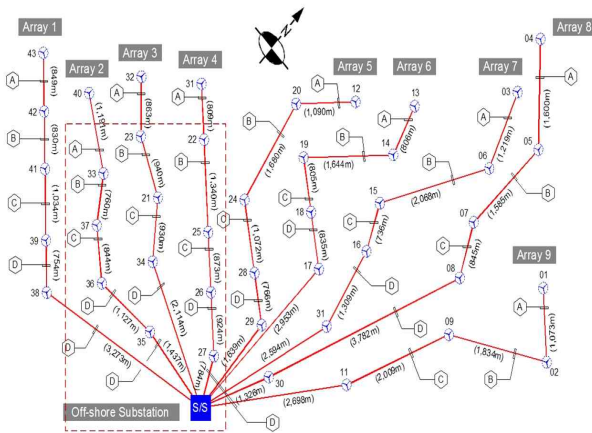


그림 2. 풍력발전단지 모의 시스템 Layout
Fig. 2. System layout of target wind farm

2.1.3 전력조류계산

전기에너지를 소비하는 부하에서의 필요량을 바탕으로, 에너지의 공급과 전력계통을 통한 전력의 흐름을 해석하는 일련의 과정을 전력조류해석(Powerflow analysis, Loadflow analysis)이라 정의한다. 전력조류의 해석은 전력계통의 설계 단계에서부터 설비의 추가, 계통계획, 진단 등의 여러 목적에 기반하여 수행된다. 특히 신재생에너지 연계의 목적에서, 전력조류해석은 기존 계통에 대한 추가 분산전원의 효과를 검증하고, 이에 따른 계통의 영향을 해석하는 계통 관리의 측면과, 설비의 용량 및 신뢰성 등을 고려하여 추가 분산전원의 사양을 검토하는 설비 사양 결정의 측면에서 매우 중요하다[9].

RTS와의 연계를 위한 계통정보 구성과 이를 검증하기 위해 PSCAD와의 안정화된 전압 비교과정을 수행하고자 가우스-자이델법을 이용한 전압해석을 채택하였다. 실제 Layout을 기반으로 제시된 계통정보를 바탕으로 고정된 유효전력과 무효전력을 이용, 풍력발전기의 연계지점과 단지의 연계지점(PCC)의 전압 비교과정을 수행하고자 한다.

2.2 전압해석 시스템 구성

2.2.1 RTS를 위한 계통 구성

구성하고자 하는 RTS 시스템은, C-code 기반의 컴퓨팅 시스템이다. 구성된 RTS를 검증하기 위해서 유효전력/무효전력 출력에 따른 계통 영향을 확인해야 하지만, 컴퓨팅 시스템 안에 계통정보를 삽입하기 위해서는 추가적인 과정이 필요하다. 또한 구성된 계통 정보가 실제 계통과 같이 응답하는지 확인하기 위해 검증과정이 요구된다. RTS 시스템에 계통정보를 반영하여 풍력발전기 출력에 의한 전압 변동을 확인하고자 외부 Layout 정보 입력과 동시에 Y-bus 매트릭스가 구성될 수 있도록 시스템을 구현하였다.

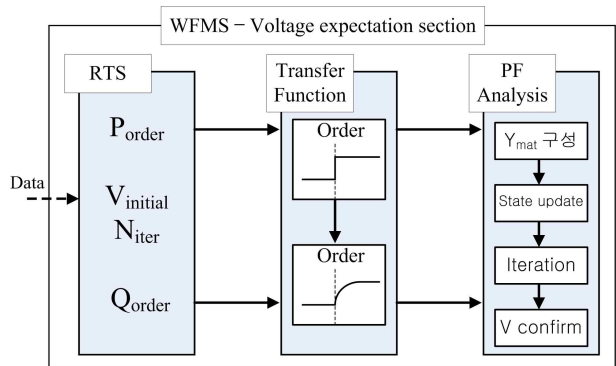


그림 3. 구현된 RTS 전압 예측 과정
Fig. 3. Composed voltage expectation process in RTS

그림 3은 WFMS에 제안된 전압 예측 방안을 논문에서 구현한 과정을 나타낸 것이다. 일반적인 전력조류계산 과정을 수행하게 되면, C 코드기반의 RTS는 불연속적인 변화를 출력으로 나타내게 되며, 이러한 출력을 보정하지 않으면 순간적인 변화에 적절하게 대처하지 못하고 오류를 발생시킬 가능성이 높다. 특히 전압의 경우 출력 변화를 고려하여 비례적분제어 등을 수행하기 때문에 실제 시스템에 기반한 전달함수를 구성하여 전압 예측시스템을 구성할 경우, 시스템 안정성을 향상시킬 수 있다. PSCAD를 이용해 실제 시스템의 풍력발전기 유효전력 출력 특성을 반영하여 전력조류계산을 수행함으로써 해당 부분 보완

을 수행하였다.

그림 4은 Y-bus 매트릭스를 Layout에 따라 입력할 수 있도록 구성한 시스템을 나타낸다. 제시된 풍력발전단지의 Layout의 정보입력은 크게 두 부분으로 나뉜다. 선로의 두께를 고려한 선로정수 입력과정과, 해당 선로정보를 바탕으로 풍력발전기 거리를 고려하여 어드미턴스 성분을 산정하는 과정이다. 구성된 Y-Bus 매트릭스는 RTS와 연동될 수 있는 구조로, PSCAD의 검증과정을 거쳐 RTS에 입력하도록 진행하였다. 외부입력 정보로는 선로정수, 풍력발전단지 전기적 거리가 있으며, 해당 정보는 Table 형식으로 구성되어 시스템에 입력된다.

실제 RTS 시스템에서는 유효전력/무효전력 지령에 의한 PCC에서의 전압 변동을 예측해야 한다. 구성된 Y 매트릭스와 등가 모델의 저항 및 리액턴스 성분, 전압을 기본 성분으로 하여 출력 지령 값을 고정하고 풍력발전기 앞단 및 PCC 지점의 전압을 식 (6)의 가우스 법을 이용하여 예측하였다.

$$1 \begin{pmatrix} S_i^* \\ Y_{ii} \setminus V_i^* - \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik} V_k \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 i는 bus 번호를 나타낸다.

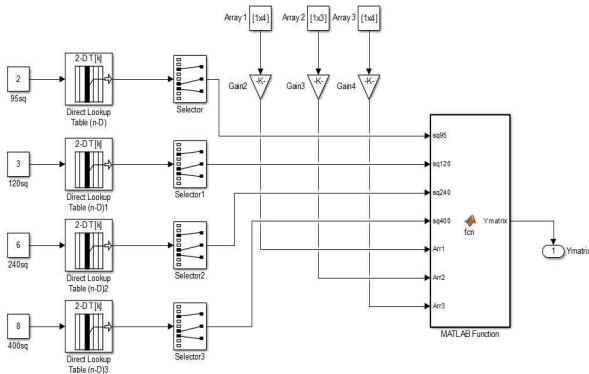


그림 4. 선로 고려한 Y-bus 매트릭스 구성
Fig. 4. Y-bus matrix configuration

그림 5는 구성된 Y 매트릭스를 이용하여 전력조류 계산을 수행하는 RTS 연산과정을 나타낸다. 유효전력의 경우 실시간으로 각 풍력발전기에서 출력되는

정보가 입력되며, 무효전력은 자체적인 할당과정을 통해 입력된다. 해당 무효전력 입력 값에 의한 전압 변동을 확인하고자 각 시스템 정보를 이용해 이터레이션 과정을 수행하면 수렴된 전압은 PCC를 포함한 각 지점에 대해서 나타나게 되며, RTS는 해당 전압 값을 바탕으로 무효전력 할당의 유효성 및 적절성을 검증할 수 있다.

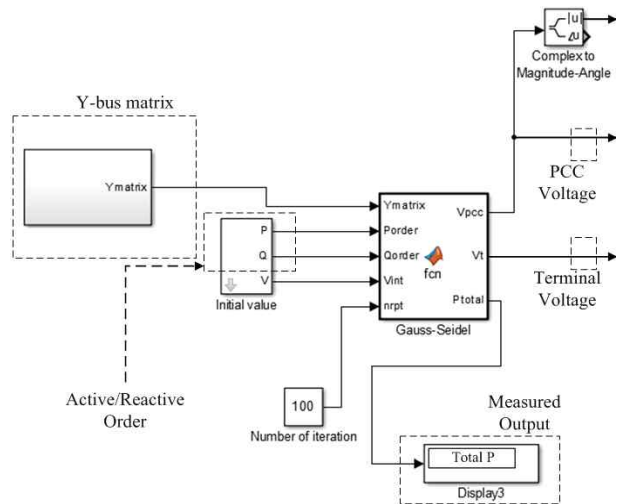


그림 5. RTS 내부 전력조류계산 수행 구성도
Fig. 5. Power flow process in RTS

2.2.2 과도 특성 구현

RTS에 풍력발전단지의 출력 특성을 구현된 방법으로 도입하게 되면, 지령 값이 변함과 동시에 불연속적인(Discrete) 변화가 발생하게 된다. 실시간으로 계통과 전압 변동을 고려해야 하는 시스템에서 과도현상에 의한 변화와 지령에 의한 discrete 변화에 의한 차이는 계산 과정에서의 오류를 발생시킬 수 있다. 지령 값에 의한 discrete 변화 안에 과도 특성을 구현하여 하나의 지령에 의한 변화를 다수의 step으로 분리함으로써, 전압 예측과정을 개선하고자 한다.

구현된 시스템에 내장된 전력조류 계산 과정을 RTS와 같이 시간에 따른 결과 출력 형태로 수정하고, 지령 값에 의한 변동과정을 PSCAD로 구현된 풍력발전기를 이용하여 전달함수를 구현·삽입하였다. 그림 6는 풍력발전기 모델의 전달함수를 이용하여 기존 RTS 시스템에 무효전력 할당 수치 변동을 세

분화한 그래프이다. RTS의 150msec 계산 주기 안에서 응답 특성을 반영하기 위해 1pole의 전달함수를 구현하였다. 기존에는 지령이 할당됨과 동시에 변동 구간 없이 지령 값에 의해 전압 변동을 예측하였으나, 해당 구간 변동을 전달함수를 이용해 세분화함으로서 전압 변동에 대한 현실적인 예측을 수행할 수 있다. 해당 전달함수는 조류계산에 요구되는 각 발전기에 삽입되며, 본 논문에서는 sampling time을 15msec로 지정하였다.

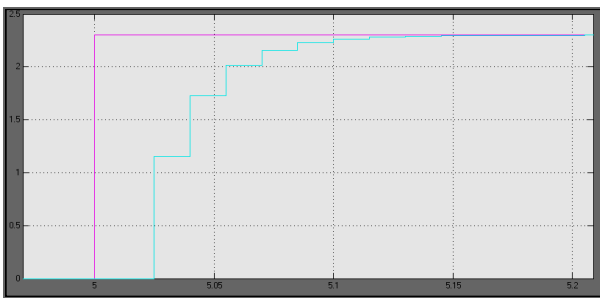


그림 6. 전달함수를 이용한 무효전력 지령/변동 출력
Fig. 6. Reactive output with composed transfer function

2.3 모의 시스템 설계

2.3.1 PSCAD 시스템 구성

본 논문에서는 연구수행 중인 7MW급 PMSG 풍력 발전시스템 설계를 바탕으로 11기의 풍력발전단지시스템을 PSCAD로 모의하여 RTS 시스템과의 연동방안을 시험해 보고자한다.

풍력발전용 PCS와 RTS를 연계하여 무효전력 제어 과정을 공유하도록 시스템을 구성하였다. 해당 시스템을 바탕으로 풍속이 낮을 때, 출력량이 정격용량 이하로 예상되는 PCS 이용률을 극대화할 수 있을 것으로 예상되며, 풍력발전단지와 연계되는 PCC 연계기점의 전압변동에 대한 관리를 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

7MW의 PMSG모델에 대한 정보는 표 1과 같다. 풍력발전단지를 구성하는 내부 선로는 33kV급 교류 케이블로 구성되며, PCC 지점에서 멀어질수록 그 두께가 감소하게 된다. 외부 선로의 경우 220kV급 교류 케이블

로 구성되며 풍력단지 거리 및 각 케이블에 관련된 사항은 표 2, 3과 같다.

표 1. 시뮬레이션에 이용된 PMSG 모델 정보
Table 1. Rated information of designated PMSG model

정격용량	7.0MW
로터 직경	80m
정격 풍속	13m/s
정격 전압	0.69kV
정격 전류	2.0kA
gear ratio	1:100

표 2. 시뮬레이션에 이용된 케이블 정보
Table 2. Cable information of simulation system

전압 (kV)	SIZE (SQMM)	허용전류 (A)	R (Ω/km)	L (mH/km)	C (μF/km)
33	95	291	0.193	0.42	0.17
	120	330	0.153	0.41	0.18
	240	470	0.0754	0.36	0.23
	400	627	0.047	0.34	0.28
220	1,000	1,100	0.0176	0.3	0.24

표 3. 풍력발전단지 Layout 거리 정보
Table 3. Distance information of designed wind farm

Array	직선 거리 (m)				터빈 개수
	PCC-WT ₁	WT ₁ -WT ₂	WT ₂ -WT ₃	WT ₃ -WT ₄	
1	784	924	873	1,340	4
2	2,214	930	940		3
3	1,437	1,127	844	760	4

표 4. 사례연구에 입력된 유·무효전력 변동 추가 정보
Table 4. Active/reactive power variation in case studies

모의 시간	3sec	초기 TSO 지령			
SCR, X/R	15	P	7	Q	0
WT 전압	33kV	1초 TSO 지령			
PCC 전압	220kV	P	7	Q	2.3
풍력 개수	11	2초 TSO 지령			
풍력 용량	77MW	P	5	Q	2.3

풍력터빈의 무효전력 제어는 설정 값을 바탕으로 역률제어가 수행되며, 출력되는 유효전력량을 기준으로 순시제어가 진행된다. 유효전력의 최대·최소 설정 값은 예측된 정보를 바탕으로 계산된 TSO 지령에 기반을 두어 지정된다.

PCS 용량을 초과하는 출력량에 대해서는 구성된 풍력발전기의 피치제어를 통해 제어되도록 설정하였다.

2.3.2 사례 연구

PSCAD로 구성된 풍력발전단지 시스템을 바탕으로 전력제어를 수행하고 동일한 전력제어를 RTS 구현용 Code-based 시스템에 입력·비교 과정을 수행하였다. 상기된 풍력발전단지 Layout 정보를 입력하고, SCR, 기본 임피던스 값을 동일하게 설정하여 두 시스템 사이의 모의 상황이 유사하도록 구성하였다. RTS에서 과도 상황에 보다 적절히 응답할 수 있도록 구성된 전력 제어 Transfer 입력 과정을 PSCAD 내부에 도입하였다.

시뮬레이션은 각 풍력발전기에 정격 유효전력을 입력하고 1초 후 무효전력 지령을 각 풍력발전기에 동일하게 입력하는 과정과, 다시 1초 후에 각 풍력발전기의 유효전력을 감소시키는 과정을 포함하였다. 유·무효전력 변동에 따른 풍력발전단지 연계지점과 각 풍력발전기의 전압 변동을 두 시스템을 이용해 비교함으로써 구성될 RTS의 전압 예측 유효성을 검증할 수 있다. 구성된 시뮬레이션 상황을 수치로 정리하면 표 4와 같다.

2.3.3 사례 분석

두 시스템의 비교를 위해서 풍력발전단지의 연계지점과 각 풍력발전 연계 지점의 전압 변동 그래프를 출력하였다. 그림 7은 PSCAD에서 측정된 풍력발전단지 연계지점의 전압 변동 그래프이다. PSCAD의 경우, 모든 전력 시스템의 특성이 반영된 시스템으로 해당 시스템 안에서의 전압 변동과 구성될 RTS용 전압 예측 과정이 오차범위 안에서 유효하다면, RTS 예측 시스템의 적절성이 인정될 수 있다. 그림 8의 경우 해당 예측 시스템을 MATLAB/Simulink를 이용해 구성하

여 전압 변동을 확인한 것으로, PSCAD와 동일한 데이터/입력을 바탕으로 PCC에서의 전압을 측정하는 것이다. 두 시스템에서의 전압 변동은 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 해당 수렴 값은 그래프에서 나타난 바와 같이 소수점 셋째 자리까지 일치하는 것을 확인할 수 있다. 코드를 이용하여 구성된 시뮬레이션의 전압 변동 또한 PSCAD와 유사하게 구현되는 것을 확인할 수 있으며, RTS를 이용한 전압 변동 예측 시 과도 상태를 예측할 수 있도록 구성되었음을 확인할 수 있다. 해당 시뮬레이션 결과를 통해, 구성된 예측 과정이 적절하게 수행되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 9~14의 그래프의 경우 해당 전압 비교 과정을 풍력발전시스템의 각 Array에 대하여 수행한 것으로 각 지점에서의 전압 예측 과정의 유효성도 동시에 확인하고자 하였다. 각 Array의 풍력발전 시스템은 PCC에서의 거리가 멀수록 전압 변동 폭이 증가하며, 이는 두 시스템에서 동일하게 나타난다.

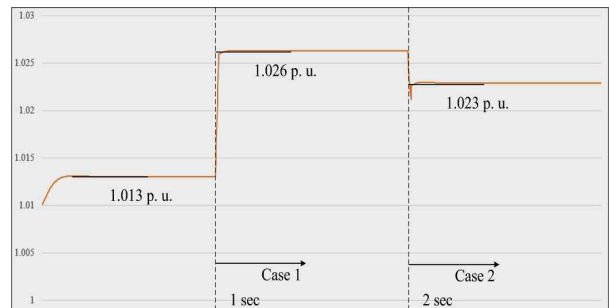


그림 7. PSCAD에서의 PCC 전압 변동 그래프
Fig. 7. Voltage fluctuation curve in PSCAD

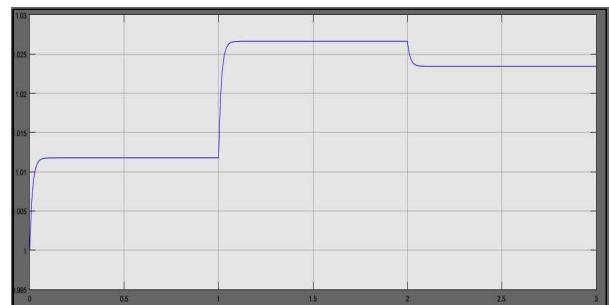


그림 8. MATLAB에서의 PCC 전압 변동 그래프
Fig. 8. Voltage fluctuation curve in MATLAB

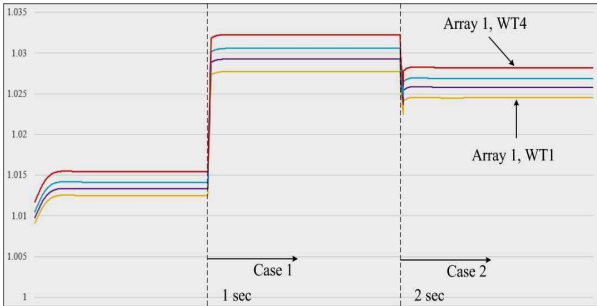


그림 9. PSCAD에서의 Array 1 전압 변동 그래프
Fig. 9. Voltage fluctuation curve at array 1 in PSCAD

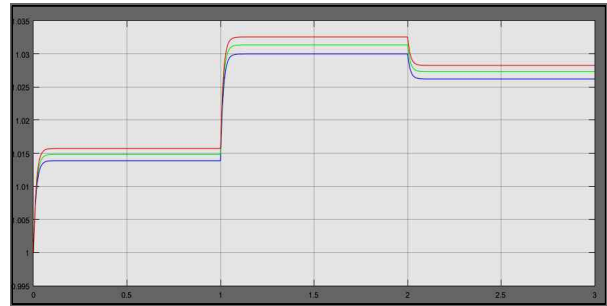


그림 12. MATLAB에서의 Array 2 전압 변동 그래프
Fig. 12. Voltage fluctuation curve at array 2 in MATLAB

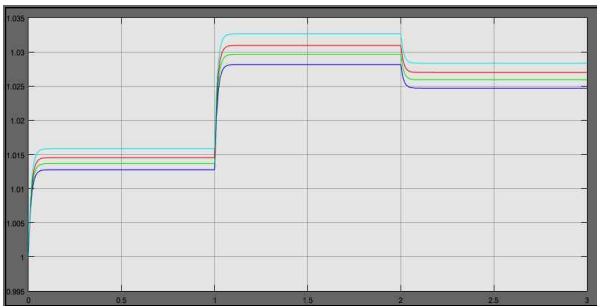


그림 10. MATLAB에서의 Array 1 전압 변동 그래프
Fig. 10. Voltage fluctuation curve at array 1 in MATLAB

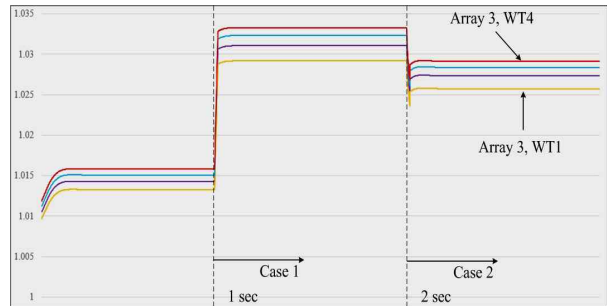


그림 13. PSCAD에서의 Array3 전압 변동 그래프
Fig. 13. Voltage fluctuation curve at array 3 in PSCAD

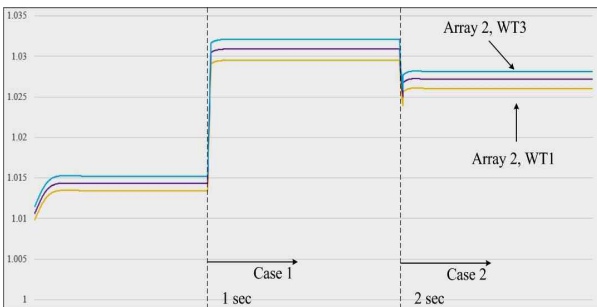


그림 11. PSCAD에서의 Array 2 전압 변동 그래프
Fig. 11. Voltage fluctuation curve at array 2 in PSCAD

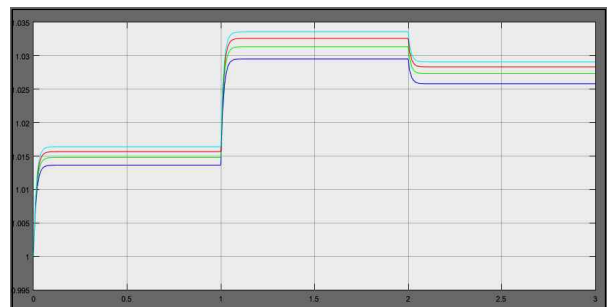


그림 14. MATLAB에서의 Array3 전압 변동 그래프
Fig. 14. Voltage fluctuation curve at array 3 in MATLAB

계통에서의 전압 변동은, 저항성분과 리액턴스 성분에 의해 발생되며, 유/무효전력 출력에 따른 전압 변동은 계통의 구성 성분이 적절히 반영되었는지 확인할 수 있는 지표가 될 수 있다. PSCAD에서 풍력발전의 무효전력 출력을 역률 0.95 제어에 근접한

2.3MVAR로 설정한 결과 전압이 유효전력 출력 제어에 비해 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 RTS 도입용 코드를 이용한 MATLAB 시뮬레이션에서도 동일하게 나타난다. 2초에서, 유효전력 출력을 2MW 감소시켰을 시의 전압 변동은 일정 부분의 과도

구간을 제외하면 유사하게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

MATLAB 시뮬레이션의 경우, 그림에서 나타난 바와 같이 풍력발전의 유/무효전력 출력에 의한 전압 변동이 일정한 과도 특성을 가지고 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 PSCAD를 응용한 전달함수를 기반으로 구성하였으므로, RTS를 위한 검증시스템에서 풍력발전단지의 과도적 특성을 반영할 수 있는 요건이 될 수 있다. PSCAD에서 구성된 모델의 세부 특성(순간 전압 강하, 출력 급감발)을 추가적으로 도입함으로써 RTS의 유효성을 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결 론

본 논문에서는 연구되고 있는 풍력발전단지 관리시스템 개발과정에 필요한 코드 기반 계통상황 모의에 주목하여, 풍력발전단지 연계지점 및 각 접속지점의 전압 변동을 RTS 상에서 예측하고 이를 기반으로 유/무효전력 지령을 입력할 수 있도록 계통 상황 모의 시스템을 코드로 구성, Simulink를 이용해 PSCAD와 비교하였다. RTS에서는 실시간으로 계통과 응답해야 하지만, 지령에 따른 계통 영향을 사전에 모의하는 과정이 필요하며, 이를 통해 안정적인 풍력발전단지 제어 시스템을 구축할 수 있다. 구성된 전달 함수는 1pole로 구성되어 단순화된 과도 해석을 수행할 수 있다. 시스템 진동 등을 세부적으로 반영하기 위해서는 다수의 Pole을 도입하여 전달함수를 구현해야 하지만, 실시간 제어 시스템인 RTS에서 Multi-Pole 전달함수 도입은 1Pole 해석이 선행되고, 전체 시스템 크기 및 하드웨어 응답속도 등을 고려하여 수행되어야 한다. 본 논문에서 구성된 전압 예측 과정은, 단순 전력조류 해석 뿐 아니라, 검증된 과도해석 툴인 PSCAD를 응용하여 유/무효전력 출력 특성을 코드에 도입함으로써, 주 목적인 전압 예측 과정 시 발생할 수 있는 과도 상태의 전압 예측 및 오차 과정을 줄일 수 있도록 구성하였다. 해당 결과를 바탕으로 응답 속도를 분석하여 추가 Pole 구성, 과도 해석 범위 확대를 수행할 수 있다.

풍력발전의 유/무효전력 출력을 구간 별로 다르게 입력하여, 해당 변화에 따른 전압 변동을 두 시스템에서 확인·비교하였다. 구성된 시뮬레이션은 실제 풍력발전단지 시스템과 유사하게 구성되었으며, 각 연계 구간의 Cable 정보와 그에 따른 전압 변동 특성 변화도 반영되었다. PCC와 각 지점의 전압 변동은 두 시스템이 유사한 결과를 보이며, RTS 도입 시 전압 예측이 적절히 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구임.
(20123010020100), (20131020000100)

References

- [1] A. Kusiak, H. Zheng, Z. Song, "Short-Term Prediction of Wind Farm Power: A Data Mining Approach," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, Issue 1, pp. 125-136, Mar. 2009.
- [2] G. Sideratos, N. D. Hatzigiorgiou, "An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, Issue 1, pp. 258-265, Feb. 2007.
- [3] N. R. Ullah, K. Bhattacharya, T. Thiringer, "Wind Farms as Reactive Power Ancillary Service Providers—Technical and Economic Issues," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, Issue 3, pp. 661-672, Sep. 2009.
- [4] R. J. Barthelmie, K. S. Hansen, S. C. Pryor, "Meteorological Controls on Wind Turbine Wakes," *Proc. of the IEEE*, vol. 101, Issue 4, pp. 1010-1019, Apr. 2013.
- [5] S. M. Mueen, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, "A Variable Speed Wind Turbine Control Strategy to Meet Wind Farm Grid Code Requirements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, Issue 1, pp. 331-340, Feb. 2010.
- [6] F. Koch, M. Gresch, F. Shewarega, I. Erlich, U. Bachmann, "Consideration of wind farm wake effect in power system dynamic simulation," *IEEE Power Tech*, pp. 1-7, 2005.
- [7] N. M. A. Freire, J. O. Estima, A. J. Marques Cardoso, "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 60, Issue 9, pp. 3957-3967, Sep. 2013.
- [8] M. G. Molina, A. G. Sanchez, A. M. R. Lede, "Dynamic modeling of wind farms with variable-speed direct-driven PMSG wind turbines," *Transm. and Distrib. Conf. and Exp.*, pp. 816-823, Nov. 2010.
- [9] K. Balamurugan and D. Srinivasan, "Review of power flow studies on distribution network with distributed generation," *Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 411 - 417. 2011.

◇ 저자소개 ◇



정승민 (鄭丞珉)

1986년 10월 12일생. 2010년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 ~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



유연태 (柳然太)

1991년 2월 8일생. 2013년 고려대 전기 전자전파공학부 졸업. 2013년 ~현재 동 대학원 전기전자전파공학과 석박사통합 과정.



김현욱 (金賢煜)

1988년 7월 25일생. 2012년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 ~현재 동 대학원 전기전자전파공학과 석박사 통합과정.



장길수 (張吉洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 美. Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업 (박사). 현재 고려대 전기전자전파공학과 교수.