

중앙집중형 풍력발전단지 제어관리시스템 전용 무효전력제어기 통신오류 보완에 관한 연구

정승민*

Adaptive Reactive Power Control for Communication Errors of Hierarchical Wind Farm Management Systems

Seungmin Jung*

Key Words : Wind farm management (풍력단지제어), Reactive power (무효전력), communication error (통신 오류), Adaptive control (적응 제어), Wind curtailment (풍력 제한)

ABSTRACT

Some controllers have been introduced in various studies to mitigate the negative effects of renewable sources. These have been modified to fit a formed solution in various ways. This paper deals with the voltage regulation of wind farms in voltage dip situations where communication failures occur. The aim is to discuss the modification of the online wind farm management system. To discuss modifications of the online wind farm management system, we focus on voltage regulation of wind farms when communication failures occur. The structure has been designed to respond to a voltage drop when the outer reference is absent due to communication errors. Since the loss reduction effect has been maintained in the designed case studies, it can be derived that the proposed method can respond to voltage drops, along with a used objective function.

1. 서론

신재생에너지의 계통연계 비중이 증가함에 따라, 국내 전력계통에 신규 연계가 예상되는 대규모 풍력발전 단지는 전력공급에 대한 변동성을 심화시킬 것으로 예상된다. 신재생에너지 비중이 증가할수록 고립계통 특성을 갖는 국내 전력계통에는 문제가 대두될 수 있

며, 이를 대비해 예측시스템이 포함된 관리시스템 활용이 지속적으로 요구되고 있다[1]. 이러한 관리시스템은 에너지저장장치(ESS)를 포함한 보상설비와 더불어 전력계통의 관리자가 능동적으로 제어하기 위한 기본적인 요소로 평가되고 있다[2].

풍력발전단지에서 활용되는 풍력발전단지 제어관리 시스템(이하 WFMS, wind farm management system)은 전체 출력을 관리할 뿐 아니라, 풍력터빈 각각의 상태감시에 활용된다. 따라서, 광대한 지역을 포괄하는 풍력발전단지는 실시간으로 수집되는 데이터를 지속적으로 관리할 수 있는 통신 구조가 요구된다. 이를 위해, 통신 용량의 향상과 무선통신 구조가 SCADA의 일반적인 요소로 고려되고 있다[3]. 또한, 복잡하고 방대한 데이터를 효과적으로 관리하고 예측하는 데 활용

* 한밭대학교 정보기술대학 전기공학과 (교신저자)
E-mail : seungminj@hanbat.ac.kr
DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.1.006>
Received : January 5, 2023 Revised : March 3, 2023
Accepted : March 3, 2023

하기 위한 연구가 계속되고 있으며, 이러한 노력은 풍력발전단지를 안정적으로 제어하려는 방법을 파생시키고 있다. 기존 연구[4]에서는 고급 데이터 구조를 기반으로 상당한 양의 정보를 얻고, 기계학습을 통해 예측된 유지보수를 수행하는 접근이 시도되었다. 이러한 노력은 일반적인 SCADA 구성에서, 전력계통의 응답성에 중점을 두어 보다 안정적인 관리방안을 마련하기 위한 진전으로 평가된다.

WFMS은 풍력터빈의 상태 모니터링, 통신 및 제어에 대한 독립된 신호 전달 체계가 필요하다. 이를 바탕으로 실시간 제어를 목표하게 되면, 제어 가능성과 효율성을 높일 수 있으나, 순간적인 장애나 지연으로 인한 대비가 요구된다[5]. 이와 관련하여, 수십 분 간격으로 수신되는 출력제한에 대한 응답은 선행연구에서 시뮬레이션한 바와 같이, 단기 통신 지연에 큰 영향을 받지 않는 것으로 평가된다[6]. 그러나 계통의 전압 상태에 직접적으로 의존하는 전압제어의 경우, 통신 오류로 인한 지연을 고려해야 한다[7]. [8]에서는 무효전력 보상으로 인한 통신 부담을 줄이기 위해 독립적 정류기 제어를 연구하였다. 전압제어의 안정성 향상에 관한 연구는, [9]에서 진행되었으며, 기존의 중앙 집중식 제어 대비, 개선된 응답을 도출하기 위한 응용을 추진하고 있다.

위 접근 방식은 미래 전력계통에서 풍력발전의 안정도 기여를 명시하는 IEEE 1547을 기반으로 한다[10]. 해당 기준에는 특히, 전압제어가 풍력발전의 각 전력변환장치의 무효전력 예비력을 고려해야 함을 언급하고 있다. 본 논문에서는 현행 무효전력 제어구조를 기반으로 통신장애 발생 시 대응에 필요한 조치를 도출하고 검증하고자 한다. 무효전력 제어를 위한 계층적 제어에서의 최적화 방식은, 통신장애에 취약함이 있다는데 초점을 맞추어 시뮬레이션 설계를 진행하였다. 정상상태에서의 최적화는 지속적으로 연구되었으나, 과도상태를 포함, 실제 운영 조건에서 통신장애 상황은 현재까지 고려되지 않았다. 여기서는, 선택된 목적함수를 기반으로 통신장애에 대비한 제어식을 구성하고 이를 각 터빈 제어기에 삽입, 통신장애 상황에서 터빈이 반응할 수 있도록 하여 실시간 상황에서 검증하고자 한다. 하드웨어 기반 검증은 WFMS와 터빈 간 신호 교환을 시뮬레이션하기 위해, 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS)를 사용하여 설계되었다. 해당 내용을 바탕으로, 향후 독립적 무효전력제어 알고리즘을 구성하여, 일반적인 WFMS에 탑재하는 방안에 관해 연구하고자 한다.

2. 제어구조

2.1 대상 통신장애

Fig. 1은 풍력발전단지에 기록된 통신오류 데이터를 나타낸다. 통신오류와 관련된 이벤트는 각 풍력터빈에서 개별적으로 측정되며, 평균 30건 이상의 오류가 기록된다. 전체 풍력발전단지를 대상으로, 15기 기준, 월 최소 1,000건의 통신오류가 기록되고, 일부는 3초 이상 지속되는 것으로 나타난다. 이러한 통신오류 상황에서 전압강하 발생 시, 일반적인 제어구조에 따르면, 기존의 지령을 유지하도록 설정되며, 비상시는 단일역률로 운전하도록 제어하는 방안이 활용된다.

본 논문에서는 중앙집중형 무효전력제어에 초점을 맞추어, WFMS가 개별 풍력터빈의 지령을 실시간으로 계산하여 입력하는 구조를 전제한다. 해당 구조에서 발생 될 수 있는 통신오류 시 목적함수 관리방안을 제시하고자 한다.

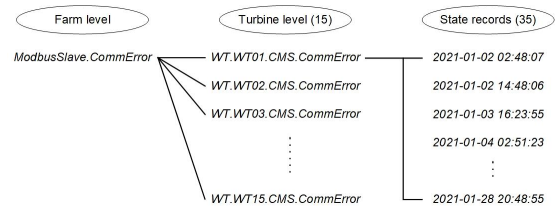


Fig 1. Measured data of communication errors

2.2 관리시스템 구조

본 논문에서 사용된 WFMS는 계통운영자(TSO, Transmission System Operator)에게 가용한 유·무효전력 값을 전달하고, 이를 제어에 활용하는 데 목적이 있다. 유효전력은 시간별 풍속 예측을 통해 예상되는 출력 가능량을 계통운영자에게 전달하고, 지정된 값 이상은 출력을 제한하는 기능을 제공한다. 설정된 유효전력 최대치는 가용한 무효전력 계산에 활용할 수 있으며, WFMS를 통해 계통운영자는 식 (1)에 의해 무효전력 가용량을 판단하고 계통 운영에 활용할 수 있다.

$$|Q_{\max}| = \sqrt{S_{pcs}^2 - P_{\max}^2} \quad (1)$$

여기서, Q_{\max} , S_{pcs} 는 풍력발전기의 무효전력 최대값과 컨버터 용량, P_{\max} 는 터빈의 정격 출력을 나타낸다.

WFMS를 활용하여 본 논문에서 검증하고자 하는 제어 방식과 개념은 Fig. 2와 같다. TSO는 전압제어를 위해 WFMS에 신호를 보내고, WFMS는 TSO의 신호를 기반으로 각 터빈의 유효전력 제한량과 무효전력 공급량을 결정한다. 활용되는 목적함수는 연계지점(이하 PCC, point of common coupling)에서 측정된 신호를 수신하는 closed-loop 컨트롤러의 형태로 설계된다. WFMS와 각 풍력발전기 사이에는 직접적인 통신연결이 존재하지만, 통신장애가 발생하면 풍력발전기는 기존에 입력된 지령을 추종하게 되고 계통 상황 반영이 불가능하다. 통신장애가 발생할 경우, 기존의 목적함수를 추종하면서, 계통 상황에 기여하는 제어가 진행될 수 있도록 알고리즘을 설계하고 검증을 진행하였다.

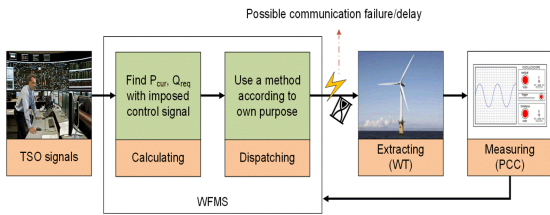


Fig. 2. Target control scheme of the proposed method.

2.3 HILS 구성

WFMS의 유효전력 제어는 분 단위로 TSO 명령에 응답하도록 설계된다. 유효전력에 대한 제어신호는 일반적으로 계통 안정성이나 효율성 문제보다 기계적 하중이나 후류 변화와 관련된 피치 제어에 주목한다. 따라서 유효전력 제어신호는 초 단위의 통신장애에 민감하지 않으며 별도의 보정기를 사용하여 보완하도록 설계

된다. 무효전력의 경우 PCC의 전압을 실시간으로 관리하기 위해서는 즉각적인 응답이 보장되어야 한다. 따라서 일시적인 통신장애에 대한 대응책이 필요하며 부과된 목적함수는 이를 고려하여 설계되어야 한다.

본 논문에서는 논의된 바와 같이, 무효전력 계층적 제어구조 안에서 WFMS에 의한 지령 관리를 고려한다. 무효전력 예비력은 TSO의 유효전력 지령을 사용하여 추정된다. 통신장애 상태에서 고려하기 위해 제안된 보정기법은 개별 풍력발전기 제어와 통합되어야 한다. 또한 신호를 처리하는 각 제어기는 검증을 위해 HILS 연구에서 독립적으로 구성되어야 한다.

Fig. 3은 본 논문에서 고려한 상황을 포함하여 HILS 구조에서의 데이터 흐름을 도시하고 있다. 가용 유효전력 파악을 위해, 중앙의 WFMS는 외부 후류 분석 프로그램과 연동하도록 설계된다. 장치의 각 포트는 Modbus 프로토콜을 통해 연결되어 HILS 구성을 형성하게 된다. 중앙집중형 제어구조에 따라, TSO의 유·무효전력 제어 지령이 각 풍력터빈에 할당되며, 본 논문의 주요 제어목표는 통신장애 발생 시 무효전력 지령을 수정하는 것이다. 이를 위해 별도의 컴퓨터에 독립된 제어 모듈을 구성하여 각 연결점(POC, point of connection)에서 측정 가능한 데이터를 수집한다. RTDS에서 제공하는 일반화된 모델과 측정값은 기본 데이터로 분류된다. Fig. 4에서 파란색으로 표시된 신호가 본 논문에서 주목하는 통신장애 영역이다.

2.4 무효전력 예비력

풍력발전기 모델은 무효전력 예비력과 관련하여 기기가 다른 범위를 가지게 된다. 본 논문에서 활용하

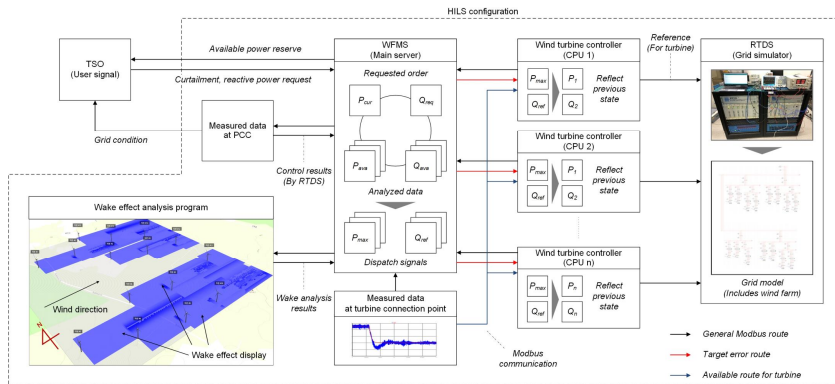


Fig. 3. Proposed hardware-in-the-loop simulation

는 모델은 상업용 풍력발전단지 구조를 반영하기 위해 HJWT 2000을 사용하였다[11]. 해당 이중 여자 유도 발전기는 식 (2)에 의해 무효전력 예비력이 산정된다.

$$Q_{res} = (\sqrt{1 - pf^2} / pf) \cdot P_G \quad (2)$$

여기서, Q_{res} 는 입력되는 역률에 따른 무효전력 가용량, pf 는 컨버터 제한치로 설정되는 역률 값, P_G 는 발전기 유효전력 출력을 나타낸다.

3. 통신오류 대비 제어기 보정

저전압 상황에서 WFMS는 설정된 기준을 충족하는데 필요한 무효전력량을 계산한다. 중앙집중형 전압제어 구조에 따라 전압 범위를 설정하는 경우, Q-V 기반 드롭 제어를 따르며, WFMS는 TSO 지령에 따라 모든 풍력발전기에 대한 무효전력 지령을 생성한다. TSO가 요구량(Q_{TSO})을 직접 결정하면, WFMS는 모든 풍력발전기와 선로 성분(Q_C)의 무효전력을 고려하여 식 (3)과 같이 추가로 정의하게 된다.

$$\Delta Q_{ord} = Q_{TSO} - \sum_l \sum_{n=1}^N Q_{G(l,n)} - Q_C \quad (3)$$

여기서 Q_{ord} 는 풍력발전단지의 무효전력 공급량이고 $Q_{G(l,n)}$ 은 어레이 1의 n번째 터빈에 대한 무효전력 지령이다. 추가로 정의된 지령은 풍력발전단지 소유자가 활용하는 할당(최적화) 방법에 따라 풍력발전기에 할당된다. 풍력발전단지에서 공급되는 무효전력은 PCC에서 측정되며 WFMS의 피드백 제어를 통해 보정된다. 그러나 통신장애가 발생하면 순간적인 전압강하 상태를 반영하기 어려울 수 있다. 해당 제어 상황을 검증에 반영하기 위해 본 논문에서는 [12]에서 언급한 상업용 풍력발전단지 구조를 고려한다. 해당 풍력단지에는 계층적 제어구조가 적용되었으며, 운영자를 위한 WFMS 모델이 활용되고 있다.

통신장애 시 기존의 목적함수를 추종하면서 무효전력을 공급하기 위해서는 단계별 제어대책이 마련되어야 한다. 첫째, 연결점의 전압변동을 인식하고 필요한 무효전력 공급량을 독립적으로 계산해야 한다. 또한, 도출된 소요량을 공급할 때, 개별 풍력발전기에서 공급 비율을 고려할 수 있도록 독립제어가 활성화되어야 한다. 해당 프로세스를 위해 각 풍력발전기의 컨트롤

러에 통신장애 감지 기능이 요구된다. 추가로 기존 WFMS의 목적함수에 따라 무효전력이 공급될 수 있도록 제어기 보정이 필요하다.

개별 목적함수는 풍력발전단지 운영자의 운영 목적에 따라 결정될 수 있으며, 전압관리, 최적화 등에 기반한 알고리즘을 바탕으로 설계된다. 본 논문에서는 대상 풍력발전단지에서 고려되는 무효전력 할당 방법을 전제로 노드 분석을 수행하였다. 대상 풍력발전단지는 참고문헌 [13]에 제시된 바와 같이, 손실 관련 목적함수를 사용한다. 본 논문에서는 기존 논문[14]에서 제시된 순서도에 따라, 방사형 구조의 풍력발전단지를 대상으로 손실제어 함수를 설계하여 무효전력제어 알고리즘을 입력하였다. 내부 케이블(r_{cab})에서 발생하는 손실(P_{Loss})을 (4)와 같이 계산하고, 선로 임피던스를 바탕으로 무효전력비례식을 설계하면 (5)와 같다. PCC에서 요구되는 무효전력량(Q_{req})을 선로 성분을 고려해 고정된 비율로써 나타내었으며, 이를 도시하면 Fig. 4와 같다.

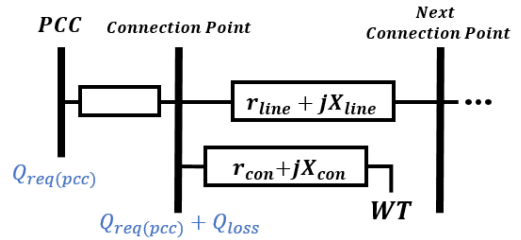


Fig. 4. Used reactive power allocation method

$$P_{Loss} = r_{cab} \cdot \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{r_{line}}}{\sqrt{r_{con}} + \sqrt{r_{line}}} \quad (5)$$

해당 목적함수로 설계된 풍력발전단지를 가정하여, 통신오류 발생 시, 기존의 무효전력 공급 비율을 유지하면서 전압변동에 대처하기 위한 추가적인 제어기를 설계하였다. [15]의 fast-decoupled 방법에 따라 부과된 전압 변화에 필요한 유효전력(P_n)과 무효전력(Q_n)은 다음 방정식으로 요약된다.

$$\Delta P_n = J_{P\delta} \Delta \delta + J_{PV} \frac{\Delta U}{U} \quad (6)$$

$$\Delta Q_n = J_{Q\delta} \Delta \delta + J_{QU} \frac{\Delta U}{U} \quad (7)$$

여기서 $J_{P\delta}$, J_{PU} , $J_{Q\delta}$, J_{QU} 는 연계되는 전력계통 시스템 변수를 나타낸다. 순간적인 계산을 위해, 단지 내의 전력변화를 무시하면, 통신오류 시 전압변동에 의한 무효전력제어 값을 자코비안을 활용해 선형화할 수 있다(식 (8), (9)).

$$\Delta Q_n = J_R \cdot \frac{\Delta U}{U} \quad (8)$$

$$J_R = J_{QU} - J_{Q\delta} \frac{J_{PU}}{J_{P\delta}} \quad (9)$$

개별 풍력터빈의 접속지점에 초점을 맞추어, 특정 연계지점에서 요구되는 무효전력량을 식 (10)과 같이 구성할 수 있다. 풍력터빈의 개별 제어기가 기존에 공급하고 있던 무효전력량은 설정된 목적함수에 의해 계산되었으므로, 기존의 비율을 유지하면서 무효전력을 공급할 수 있다면, 무효전력 공급의 목적성을 유지하면서 통신오류에 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\Delta Q_{G-n} = \eta_n \left(J_R \cdot \frac{\Delta U}{U} - \Delta Q_{n-n+1} \right) \quad (10)$$

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 통신장애 응답 알고리즘을 적용하기 위해, SCADA 데이터 접근이 가능한 풍력발전 단지를 바탕으로, RTDS를 이용하여 시뮬레이션을 구성하였다. Fig. 5는 대상 풍력발전단지를 그림으로 나타낸 것이다. [12] 풍력발전단지과 같은 RMU(Ring main unit)가 포함된 풍력발전기 분기 상황이 고려된 구조로, 풍력발전단지는 2장에서 언급된 HJWT Type 3 풍력발전기를 기반으로 15기가 설계되었으며, 각 2 MW 정격용량을 갖는다. 계통정보, 케이블 및 기타 요소에 대한 정보는 Table 1에 나타난다. 풍력발전단지 내 어레이 연결 거리는 Table 2에 나열되었다.

사례연구의 경우, 먼저 제어기의 유무 여부에 따라 응답 특성을 확인하기 위해, 통신장애가 없는 일반상황, 통신장애 발생 시 기존응답을 비교하기 위한 설계를 진행하였다. 다음으로 통신오류 발생 시, 기존 목적함수 추종 여부를 확인하기 위해, 통신오류를 부과하

고 전압 강하를 모의하였다. 해당 시퀀스는 Fig. 6과 같다. 무효전력 공급량 및 계통 전압의 변화는 RTDS 기반 HILS 모의를 통해 확인할 수 있다.

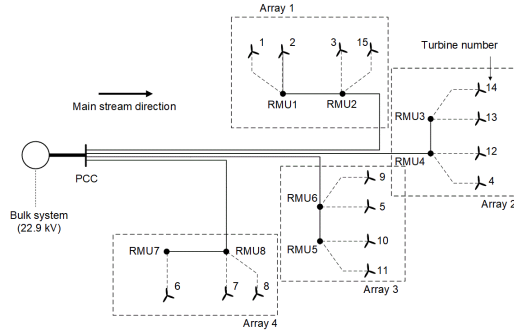


Fig. 5 Composed situation for case study

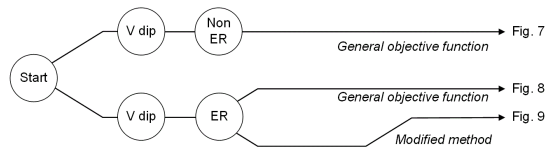


Fig. 6 Simulation sequence description

Table 1 Information for the simulation

Turbine model	HJWT 2000 - Type 3
CNCV, mm ²	200(Bulk), 60(Array)
Applied wind speed	10 m/s
Control mode	일반상황, 기존응답, 제안응답
Simulation duration	5 seconds

Table 2 Array distance

Array number	Section	Distance(m)
1	RMU1 - Turbine1	435
	RMU1 - Turbine2	141
	RMU2 - Turbine3	357
	RMU2 - Turbine15	270
2	RMU3 - Turbine13	507
	RMU3 - Turbine14	558
	RMU4 - Turbine4	203
	RMU4 - Turbine12	170
3	RMU6 - Turbine5	307
	RMU6 - Turbine9	170
	RMU5 - Turbine10	399
	RMU5 - Turbine11	743
4	RMU7 - Turbine6	566
	RMU8 - Turbine7	142
	RMU8 - Turbine8	210

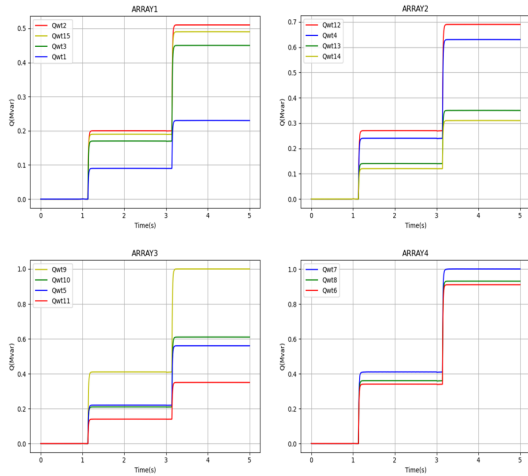


Fig. 7 General control without error

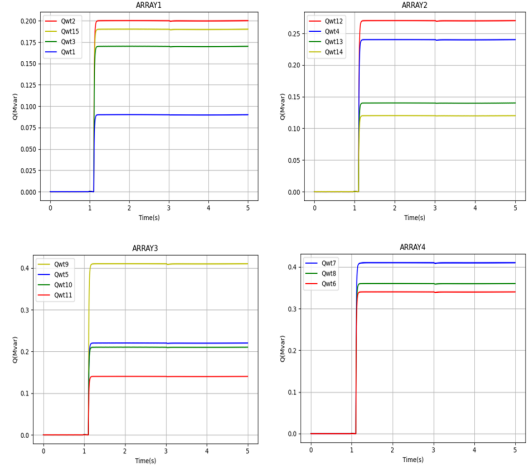


Fig. 8 General control with error

시뮬레이션 측정 시작 후, 1초 시점에서 3%의 전압 강하, 3초 시점에서 5%의 전압 강하를 순차적으로 입력하였다. 풍속의 경우 10ms를 주 방향으로 일괄적으로 입력하였으며, 후류 효과를 반영한 출력이 연계 지점으로 유입되도록 구성하였다. Fig 7, 8, 9는 모의된 사례연구에서 개별 풍력발전기의 무효전력 출력을 도시한다. Fig. 7에 도시된 바와 같이, 통신오류가 없는 상황에서는 발생한 전압 강하에 대해 응답이 원활하게 진행되며, 활용하는 목적함수에 따라 무효전력 할당이 원활하게 진행되는 것이 확인된다. 각 Array 별 풍력발전기 연계 거리에 따라 무효전력 공급량에 차이가 발생하며, 해당 차이는 활용하는 목적함수에 따른 결과로 확인된다.

Fig. 8의 경우, 동일한 시뮬레이션에서 통신장애를 입력했을 시 풍력발전기의 무효전력 공급량을 나타낸다. 전압 강하가 발생했음에도, 풍력터빈이 공급하는 무효전력량에 변화가 없는 것은, 통신 장애로 인해, WFMS의 지령이 전달되지 않기 때문이다. 동일 조건에서 제안된 보정기법을 각 풍력터빈에 입력하고 시뮬레이션을 진행한 결과가 Fig. 9에 나타난다. 해당 그래프에서 전압 강하 발생 시 능동적으로 지령이 수정되는 것을 확인할 수 있다. 수립된 지령은 기존의 목적함수에 의한 지령과 유사함이 확인되며, 목적함수를 준수하는 보정이 진행되었음을 확인할 수 있다.

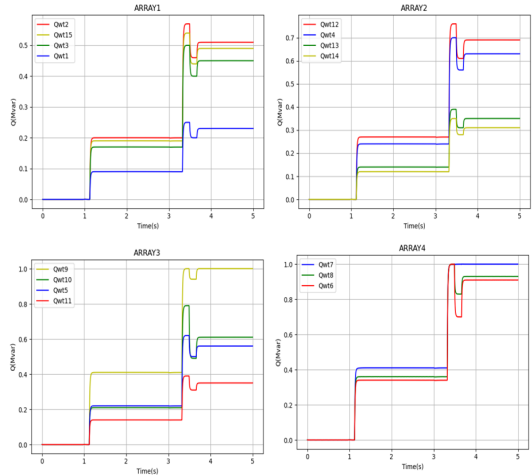


Fig. 9 Proposed control with error

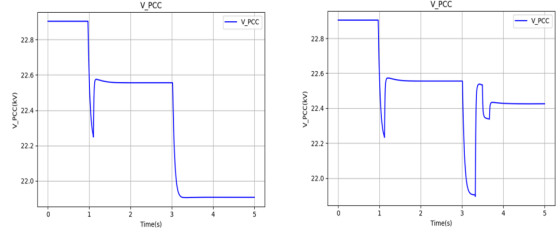


Fig. 10 Voltage recovery characteristic of case study

도출된 시뮬레이션 결과와 같이, 제안된 제어기에서는 통신오류 상황에서도, 전압 강하 인가 시, 개별적인 지령 신호 보정 및 응답을 수행하는 것을 확인할 수 있다. 통신장애 발생 시 전압회복에 대한 특성을 확인하기 위해 제안된 제어기 입력 전후의 그래프를 Fig 10에 도시하였다. 초기 안정화 단계 후 저전압 조건을 입력하면, 두 사례 모두 전압회복이 확인되나, 통신장애 발생 후, 두 번째 저전압 조건을 입력하면 차이가 발생한다. 특별한 대처가 진행되지 않으면, 저전압이 유지되며, 제안된 제어기에서는 일정 시간 동안 보정이 진행된 후에 전압이 안정 범위로 회복되는 것을 확인할 수 있다.

사례연구에서는 WFMS에서 직접적인 무효전력 지령이 할당될 수 없도록 통신 루트를 차단하는 형태로 통신장애를 모의하였으며, 해당 조건에서 개별 풍력발전기의 독립된 제어가 진행되었다. 풍력발전기 내부에서 저전압을 판단하고, 적정범위 회복을 위해 출력량을 조정하는 결과로 확인된다.

5. 결론

본 논문에서는 일반적인 풍력발전단지에서 활용되는 중앙집중형 제어구조를 활용하여, 개별 풍력터빈에 대한 제어가 원활하지 않은 통신오류 상황을 가정하여, 능동적으로 응답하는 방안을 고찰하였다. 현재 중앙집중형 무효전력 제어가 일반적인 최적화 방식에 기반, 초단위 SCADA 데이터를 활용하는 점에 주목하여 보완 방안을 설계하고, PD 제어와 특정 무효전력 제어기를 입력하여 검증을 진행하였다. 제안된 보정 방식의 주요 목적은, 일반적인 WFMS에서 활용되는 목적함수를 준수하는 조건에서 무효전력 지령 보정을 수행하는 것에 있다. 전력계통에서 무효전력공급의 중요성이 증가하는 점을 감안할 때, 무효전력 공급에 대한 안정성 개선 연구는 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단되며, 실제 전력변환장치의 부담을 고려하여 적절한 제어기 설계 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시한 분석을 바탕으로, 추후 연구에서 Raspberry pi 기반의 HILS 연동에 대한 방안을 도출하고자 한다.

참고문헌

- [1] Kim, B., Im, S., Choi, N., Lee, B., Park, B., Kang, S., Bae, J. (2021). Evaluating System Strength Considering the Interaction of Renewable Energy: Large-scale Offshore Wind Farm Connected in KEPCO Systems. *Journal of Wind Energy*, 12(4), 5-10.
- [2] Kim, J., Seok, J., Muljadi, E., and Kang, Y. C. (2016) AdaptiveQ-VScheme for the Voltage Control of a DFIG-Based Wind Power Plant. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5) 3586-3599.
- [3] Ahmed, M. A., Eltamaly, A. M., Alotaibi, M. A., Alolah, A. I., and Kim, Y. (2020) Wireless network architecture for cyber physical wind energy system. *IEEE Access*, 8, 40180 - 40197.
- [4] Wang, L., Zhang, Z., Xu, J., and Liu, R. (2016) Wind turbine blade breakage monitoring with deep auto encoders. *IEEE Trans. Smart Grid*, 9(4), 2824 - 2833.
- [5] Ullah, N. R., Bhattacharya, K., and Thiringer, T. (2009) Wind Farms as Reactive Power Ancillary Service Providers - Technical and Economic Issues. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 24, 661-672.
- [6] Zhang, X., Liu, D., Zhan, C., and Tse, C. K. (2017) Effects of cyber coupling on cascading failures in power systems. *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, 7(2), 228 - 238.
- [7] Xu, J., Liao, S., Jiang, H., Zhang, D., Sun, Y., Ke, D., Li, X., Yang, J., Peng, X., and Yao, L. (2021) A multi-time scale tie-line energy and reserve allocation model considering wind power uncertainties for multi-area systems. *CSEE J. Power and Energy Syst.*, 7(4), 677 - 687.
- [8] Revel, G., Leon, A. E., Alonso, D. M., and Moiola, J. L. (2014) Dynamics and stability analysis of a power system with a PMSG-based wind farm performing ancillary services. *IEEE Trans Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 61(7), 2182 - 2193.
- [9] Asadollah, S., Zhu, R., and Liserre, M. (2020) Analysis of voltage control strategies for wind farms. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 11(2) 1002 - 1012.
- [10] IEEE Standard for interconnection and interoperability

- of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces - amendment 1: To provide more flexibility for adoption of abnormal operating performance category III. IEEE Std. 1547-2018 (Revision of IEEE Std. 1547-2003), (2018) 1 - 138.
- [11] wind-turbine-models.com, Hanjin HJWT2000/87. Accessed: Aug. 24, 2020.
- [12] Shin, D., and Ko, K. (2019) Application of the nacelle transfer function by a nacelle-mounted light detection and ranging system to wind turbine power performance measurement. *Energies*, 12(6), 1087.
- [14] Yoo, D., Kang, S., Jang, G., Jung, S. (2022) Development of Reactive Power Allocation Method for Radial Structure Wind Farm Considering Multiple Connections. *Electronics*, 11, 2176.
- [15] Jung, S (2019) A Study on a Reflection Method of Wind Farm Cable Components for Reactive Power Allocation Process. *Journal of Wind Energy*, 10 (1), 14-19.
- [16] Aik, D. L. H., and Andersson, G. (2013) Analysis of voltage and power interactions in multi-infeed HVDC systems. *IEEE Trans. on Power Del.*, 28(2), 816 - 824.