

회전자 속도에 따라 변동하는 풍력발전단지 주파수 편차 루프 제어 연구

이창민^{1),3)*} · 최현준²⁾ · 박지훈²⁾ · 김성환^{4)*}

Control of the Wind Power Plant Frequency Variance Loop with Respect to Rotor Speed

Chang Min Lee^{1),3)*} · Hyen jun Choi²⁾ · Ji Hoon Park²⁾ · Seong Hwan Kim^{4)*}

Received 9 May 2024 Revised 19 June 2024 Accepted 20 June 2024 Published online 24 June 2024

ABSTRACT To ensure the frequency stability of wind power generation, we analyzed the existing technology and proposed a method for changing the gain value with respect to the rotor speed by adding the MPPT reference value and output reference value that reflect the system frequency. The MPPT control and output were compared and calculated for performance verification. Subsequently, the application of the proposed algorithm led to an increased output when compared with that of the existing control method.

Key words MPPT(최대 출력 추정 제어), DFIG(이중여자유도발전기), RocoF(주파수변화율), Wind power generation(풍력발전기)

Nomenclature

P_{ref} : output reference value

P_{MPPT} : output reference value of the maximum output control loop

ΔP : output reference value of frequency deviation loop

$K_a(\omega_r)$: gain calculated differently depending on the speed of the rotor

K : control gain of rocof loop

Δf : frequency deviation

f_{sys} : system frequency

f_{nom} : rated frequency

R : Control gain of the frequency variation loop

$f_{c.min}, f_{c.max}$: frequency-controlled dead-band (0.02 Hz)

ω_r : the rotational speed of the entire body

1) Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Mokpo National University

2) Ph.D. Senior Researcher, Department of Wind Power Industry, Green Energy Institute

3) Senior Researcher, Department of Wind Power Industry, Green Energy Institute

4) Professor, Department of Electrical Engineering, Mokpo National University

*Co-Corresponding authors: sksms242@gei.re.kr (CML)

Tel: +82-61-288-1094 Fax: +82-61-288-1080

shkim@mokpo.ac.kr (SHK)

Tel: +82-61-450-2753 Fax: +82-61-450-2750

Subscript

OD : over - deceleration

MPPT : maximum power point tracking

DFIG : doubly - fed induction generator

ROCOF : rate of change of frequency

1. 서론

지구온난화로 인한 이상기후 현상이 발생하고 있는데 우리나라도 최근 30년 사이 높은 화석연료 비중과 제조업 중심의 산업구조로 인하여 평균 온도가 1.4°C 상승하며 온난화 문제가 심해지고 있다.^[1] 이러한 지구온난화 문제를 해소하는 방법으로 신재생에너지 활용이 대두되고 있으며, 전 세계적으로 온실가스 배출을 줄이고 재생에너지 비중을 높이려는 정책을 추진하고있다.^[2,3]

우리나라는 재생에너지 3020 정책을 시작으로 2022년에 ‘2050 탄소중립녹색성장위원회’를 발족하였고 원전과 신재생에너지의 조화를 통한 에너지믹스 재정립 전략 목표 중 하나로 정하여 탄소중립 실현을 위해 전력공급 계획에서 풍력발전을 주목하였다.^[4]

풍력발전은 바람 등 외부조건에 따라 출력이 변동하며 이는 수용률 증가에 따라 주파수 제어의 주된 어려움으로 대두되며 풍력발전의 수용률이 높은 전력계통은 가변속 풍력발전기의 최대출력제어 기능으로 인하여 동기발전기뿐만 이루어진 전력계통보다 시스템 관성이 작아진다.^[5,6]

풍속이 심하게 연속성으로 변동되면 풍력발전기의 출력도 심하게 변동되어 주파수를 허용 범위내로 유지하기 어렵다.^[7~9] 그러므로 풍력발전 수용률이 높을 때 주파수를 허용범위 내로 유지하기 위하여 발전기의 출력 평활화가 필요하다.

참고문헌^[10]에 기존 가변속 풍력발전기 최대출력추종(MPPT) 운전을 통해 개별 풍력발전기 출력을 최대로 하기 위한 제어가 제안되었다. 이는 각 풍속에 대한 최적의 회전자 속도로 풍력발전기를 제어하는데 이는 계통 주파수와 무관한 운전으로 계통 주파수 제어에 대한 기여도 없으며 계통 신뢰도를 저하 시키는 문제점이 있다.

제어 루프 게인 조정을 통한 풍력발전기 관성제어 기술은 출력 증가량을 생성하여 풍력발전기의 출력을 조정하며 다양한 조합의 고정 게인(상수)을 사용하여 기여도 비교를 하였으며, ROCOF 방법의 게인 조정하는 방법과 병용 방법의 두 게인을 조정하는 방법들이 제안되었으나 루프의 게인을 제어하는 방법에서 작은 게인을 사용할 경우 관성제어의 기여도는 낮지만, 안정적인 제어 수행 가능하고, 큰 게인을 사용할 경우에는 관성제어의 기여도는 높지만, 과도

한 운동에너지 방출의 위험이 있다.^[11~13]

회전자 운동에너지 기반 관성제어 연구로 ROCOF와 주파수 편차의 병용 방법을 사용하는 기술로 회전자의 초기 운동에너지에 비례한 고정 게인(R_i , K_i)을 생성하고, 초기 운동에너지 보유 정도에 따라 관성제어의 기여도 조정하는 방법이 있으며 이 방법은 고정 게인 사용으로 인해 계통과 풍황 조건에 따라 과도한 운동에너지 방출의 위험이 존재한다.^[14]

$$K_i = K_0 (\omega_i^2 - \omega_{\min}^2) \quad (1)$$

$$R_i = R_0 \frac{\Delta E_{\max}}{\Delta E_i} = R_0 \frac{(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)}{(\omega_i^2 - \omega_{\min}^2)} \quad (2)$$

이로 인해 풍력발전의 계통 안정성 확보를 위해 주파수 제어 기능을 갖는 제어 기술을 분석하고 풍력발전단지 출력 기준값을 MPPT 루프를 이용한 기준값과 계통 주파수를 반영한 출력 기준값을 더하여 산정하는 기술을 개발한 후 게인 값을 회전자 속도에 따라 변동하는 방법이 제안되었다.^[15]

게인에 기반한 주파수 편차 루프를 이용한 가변속 풍력발전기 주파수 제어를 통하여 기존의 MPPT 제어와 비교하여 최적의 게인 값을 통한 주파수 제어 성능을 향상 시키고자 하며, 제안한 방식의 성능을 검증하기 위해 EMTP-RV를 활용해 풍력발전단지를 모의하여 제안한 방식의 성능을 검증하였다.

검증된 제어 알고리즘을 반영하여 제주에 위치한 동북 풍력발전단지의 풍속 측정 데이터를 바탕으로 실증시험을 진행하였고 기존의 MPPT 제어와 비교 분석하였다.

2. 회전자 속도에 따라 변동하는 풍력발전단지 주파수 편차 루프 제어

회전자 속도에 따른 제안 알고리즘을 개발하기 위하여 풍력발전기 운전 상태와 계통 주파수를 반영한 출력 기준값 산정 기술을 개발하기 위하여 기존 방법에서의 요구 사항이 OD 방식을 만족하면서, 주파수 제어 성능을 향상 시키기 위해 제안한 방법에 요구되는 설계 요구 사항이 있다.

2.1 OD 방지 만족을 위한 설계 요구 사항

OD 발생 시 발전기의 보호를 위해 루프의 작동을 중지시켜야 하는데, 이때 발전기의 출력이 급감하여 전력 시스템의 2차 외란이 발생하여 동기기의 주파수가 감소하게 되므로 주파수 제어에 악영향을 끼치게 된다. 회전자 속도가 낮은 경우에는 OD를 방지하기 위해 주파수 편차 루프의 게인이 작은 값을 가져야 하고, 회전자 속도가 높은 경우에는 주파수 제어 성능을 향상 시키기 위해 주파수 편차 루프의 게인이 큰 값을 가져야 한다.

기존 방법의 경우 회전자 속도에 무관하게 일정한 값을 가졌지만, 제안한 방법에서는 회전자 속도에 따라 단조 증가하는 게인을 요구한다.

주파수 편차가 크기 때문에 주파수 편차 루프에 의해 계산 되어지는 기준값이 큰 값을 가져 풍력발전기의 출력 기준값에 영향을 주게 된다.

Power smoothing의 경우 주파수 편차가 작기 때문에 고정 게인을 사용하는 기존 방법의 경우 주파수 편차에 의한 기준값이 작아 최대 출력제어 루프에 의한 기준값보다 작게 되어 Power smoothing 효과가 작다.

Fig. 1과 같이 제안한 방법에서는 회전자 속도가 높은 구간에서는 주파수 편차 루프의 기준값이 MPPT 제어와 비교하여 큰 값을 가지도록 게인을 산정해야하며, 회전자 속도가 낮은 구간에서는 OD를 방지하기 위해 주파수 편차 루프의 기준값이 P_{MPPT} 와 비교하여 크지 않은 값을 가지도록 게인을 산정해야 한다. 따라서 주파수 편차 루프의 기준값을 산정하는데 MPPT를 고려해야 한다.

제안한 방법도 기존 방법과 같이 주파수 편차 루프를 이용하였으며, 주파수 편차 루프의 게인을 회전자 속도에 따라 변동하도록 하는 방법과 Fig. 2와 같이 풍력발전단지 주파수 제어 알고리즘 블록도에 나타난 바와 같이 회전자 속도에 따라 게인이 변동하는 방법을 제안하며 제안한 알고리즘은 식 (3), (4)와 같다.

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P \tag{3}$$

$$\Delta P = \begin{cases} -K_a(\omega_r)(\Delta f - f_{c,max}), & \text{for } f_{c,max} \leq \Delta f \\ 0, & \text{for } -f_{c,min} \leq \Delta f < f_{c,max} \\ -K_a(\omega_r)(\Delta f + f_{c,min}), & \text{for } \Delta f \leq -f_{c,min} \end{cases} \tag{4}$$

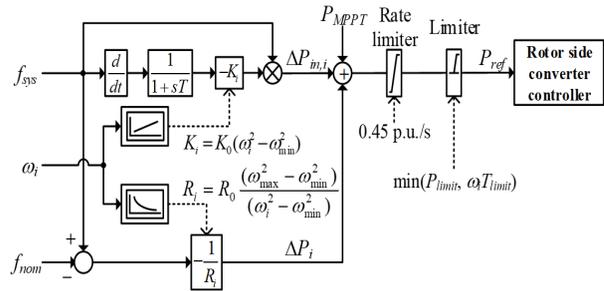


Fig. 1. A block diagram of the output control algorithm of a wind farm based on rotor speed

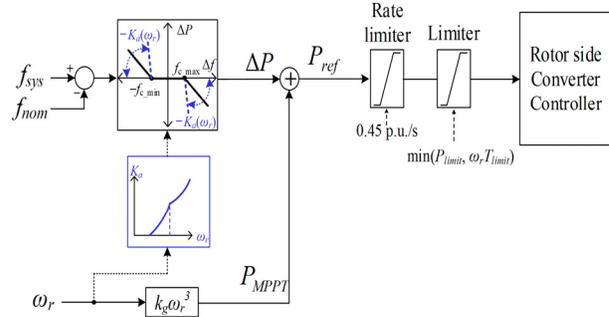


Fig. 2. Wind farm frequency control algorithm block diagram

2.2 $\Delta P/P_{MPPT}$ 가 풍력발전기의 모든 회전자 속도에서 큰 값을 가지는 경우와 작은 값을 가지는 경우

2.2.1 $\Delta P/P_{MPPT}$ 가 큰 값을 가지는 경우

풍력발전기의 주파수 제어에 대한 기여도는 최대 전력 제어와 비교하여 커지게 된다. 풍력발전기의 출력의 경우 주파수 편차가 양수인 경우에는 최대출력 제어와 비교하여 상대적으로 많이 작게 되며, 주파수 편차가 음수인 경우에는 최대출력 제어에 비해 상대적으로 크게 된다.

2.2.2 $\Delta P/P_{MPPT}$ 가 작은 값을 가지는 경우

풍력발전기의 주파수 제어에 대한 기여도는 최대출력 제어와 비교하여 크지 않다. 풍력발전기의 출력 변동 폭 또한 최대출력 제어에 비해 크지 않게 된다.

2.3 풍력발전기의 회전자 속도가 낮아지는 경우와 증가하는 경우

2.3.1 회전자 속도가 낮아지는 경우

주파수 편차가 양수일 때 에너지를 흡수하는 능력은 크지만, 주파수 편차가 음수일 때는 OD를 방지하기 위해 에

너지를 방출하는 능력이 작다.

이에 따라 회전자 속도가 낮은 구간에서는 $\Delta P/P_{MPPT}$ 는 작은 값을 가져야 한다.

2.3.2 회전자 속도가 증가하는 경우

주파수 편차가 음수일 때 에너지를 방출하는 능력은 크지만, 주파수 편차가 양수일 때는 회전자의 최대 한계 속도 때문에 에너지를 흡수하는 능력이 작다. 하지만 이 단점은 피치 제어를 사용하여 극복 가능하며, 이에 따라 회전자 속도가 높은 구간에서는 $\Delta P/P_{MPPT}$ 가 큰 값을 가질 수 있다.

2.4 회전자 속도에 따라 변동하는 주파수 편차 루프의 게인 상정 시 $\Delta P/P_{MPPT}$ 를 이용하는 방법

주파수 제어 성능 향상 및 에너지 손실 등을 고려하여 최적의 함수 제하였고, 한 점 (ω_1, z) 결정, 본 연구에서는 0.9, 0.5로 하였으며 이는 임의의 값이다.

이 값의 의미는 회전자 속도가 0.9 pu일 때 P_{MPPT} 의 50%를 주파수 편차 루프의 기준값으로 한다는 의미이다.

풍력발전기의 OD를 방지하기 위해 0.7, 0은 필히 지나야 한다. 본 연구에서는 ω_1, z 와 0.7, 0 두 점 사이는 직선으로 정하였고, 회전자 속도가 ω_1 보다 큰 영역에서는 0.5 상수 값으로 하여, 주파수 편차 루프의 기준값을 P_{MPPT} 의 50%가 되도록 정하였다.

제안한 방법과 기존 방법, adaptive gain 방법의 주파수 제어 성능 비교하기 위해 $\Delta P/P_{MPPT}$ 함수를 나타내었고 기존 방법의 경우 게인을 25와 이보다 4배 큰 100인 결과를 Fig. 3을 통하여 나타내었다.

그래프에서 보는 것과 같이 기존 방법의 경우 회전자 속도가 낮은 구간에서 큰 비를 가지므로 해서 OD가 발생할 가능성이 높으며, 전자 속도가 높은 구간에서는 비가 작아 주파수 제어 성능이 낮다. Adaptive gain의 경우에는 회전자 속도가 낮은 구간에서는 비가 작아져 풍력발전기의 OD를 방지할 수 있으며, 회전자 속도가 높아질수록 비가 커져 주파수 제어 성능이 개선되었고, 제안한 방법과 adaptive gain과 비교해 보면 전체적으로 비가 크기 때문에 제안한 방법이 adaptive gain 방법 보다 주파수 제어 성능이 뛰어나다.

이와 같이 $\Delta P/P_{MPPT}$ 평면에서 주파수 제어 성능 및 에너지 손실을 고려하여 함수가 결정이 되면, 주파수 편차 루프의 게인을 구할 수 있다.

주파수 편차 루프의 게인은 $\Delta P/P_{MPPT}$ 함수에 P_{MPPT} 의 기준값 산정 수식인 k_g 와 ω_r 의 3승의 곱하여 구할 수 있으며, 본 연구에서는 회전자 속도가 ω_1 보다 작은 구간은 직선의 방정식에 곱하고, 회전자 속도가 ω_1 보다 큰 구간에서는 상수에 곱하여 구한다. Fig. 4와 같이 주파수 편차 루프의 게인 그래프를 나타내었다.

제안한 방법은 주파수 편차 루프의 게인을 회전자 속도에 따라 변동하도록 하는 방법을 제안하였으며, $\Delta P/P_{MPPT}$ 를 이용하여 Power smoothing의 성능 향상이 가능하며, 결과적으로 얻은 게인 함수는 회전자 속도에 대해 단조 증가 형태를 가지고 있어, Inertial control의 성능 개선이 가능하다. 주파수 제어 루프 게인은 아래의 식 (5), (6)을 이용해 산정 가능하다.

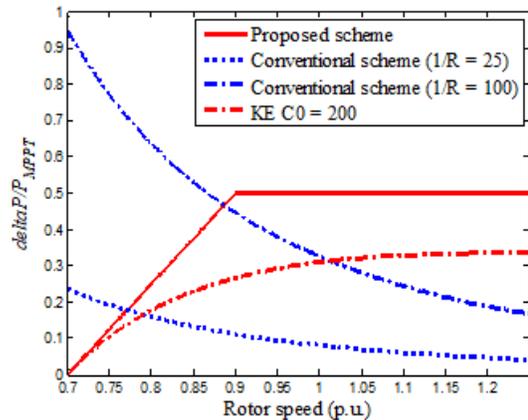


Fig. 3. Comparison for performance analysis of the proposed algorithm (Existing method, adaptive gain, $\Delta P/P_{MPPT}$)

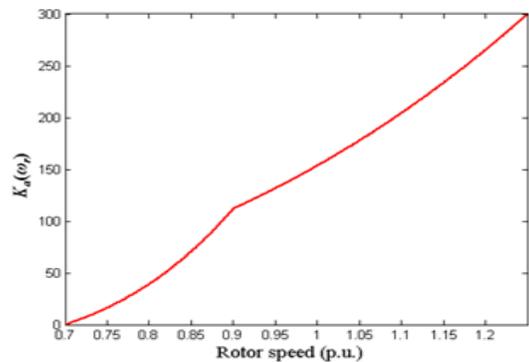


Fig. 4. Frequency control loop gain calculation results graph

$$\text{For } \omega_r < \omega_1, K_a(\omega_r) = \frac{k_g}{0.1/f_{nom}} \frac{z}{\omega_1 - 0.7} (\omega_r - 0.7) \omega_r^3 \quad (5)$$

$$\text{For } \omega_r \geq \omega_1, K_a(\omega_r) = \frac{k_g z}{0.1/f_{nom}} \omega_r^3 \quad (6)$$

3. 시뮬레이션을 활용한 주파수제어 기술 검증

3.1 제안 알고리즘 검증을 위한 주파수 변동 모의

주파수 변동 모의를 위해 같이 국내 저주파수 부하차단 관련 규정을 분석하였고 Table 1과 같이 육지계통과 제주 계통에서 저주파수 발생 시 주파수별 차단부하 비율을 나타내었다.^[16]

이는 계통 주파수의 회복을 최대한 빠르게 회복하기 위한 조치이며 제안한 주파수 제어 알고리즘 성능 검증을 위한 주파수 하락을 모의하기 위하여 동기 발전기 탈락을 수행하였으며 풍력발전단지 제어를 제주계통의 차단 비율을 고려하여 주파수 최저점을 59.2 Hz보다 높게 되도록 주파수 변동을 모의하였다.

Table 1. System protection procedures

Blocking steps	Land power system			Jeju power system		
	Frequency [Hz]	Operation time	Cutoff load [%]	Frequency [Hz]	Operation time	Cutoff load [%]
1	59.0	6cycle	6	59.2	10cycle	10
2	58.8	6cycle	6	59.0	10cycle	10
3	58.6	6cycle	6	58.6	10cycle	10
4	58.4	6cycle	6	58.4	6cycle	10
5	58.2	6cycle	6	58.0	6cycle	7
6	58.0	6cycle	5	57.6	6cycle	5
Back up	59.0	12sec	4	-	-	-
Total	-	-	39	-	-	52

3.2 단수 풍력발전단지의 알고리즘 모의 및 분석

본 논문에 배경이 되는 제주 동북 풍력 발전단지 사양을 반영하여 풍력발전단지를 모델링 적용하여 성능을 검증 하였고 발전기 모델은 이중여자형 유도발전기(DFIG) 모델이다.^[17]

제안한 알고리즘 성능 검증을 위해 MPPT 제어와 출력을 비교하였고 실제 동북 풍력 발전단지의 발전기 별 다양한 설치 위치를 고려하여 주풍향인 북서 방향의 앞쪽의

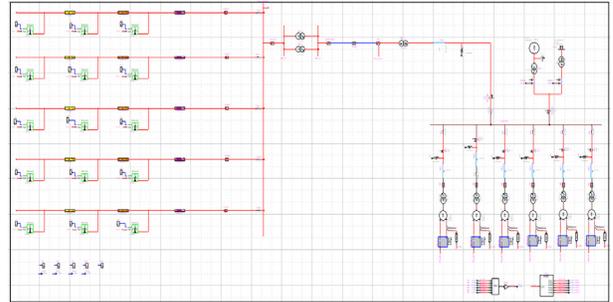


Fig. 5. Single wind farm circuit diagram

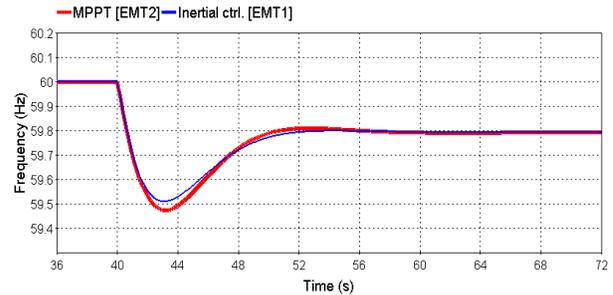


Fig. 6. System frequency

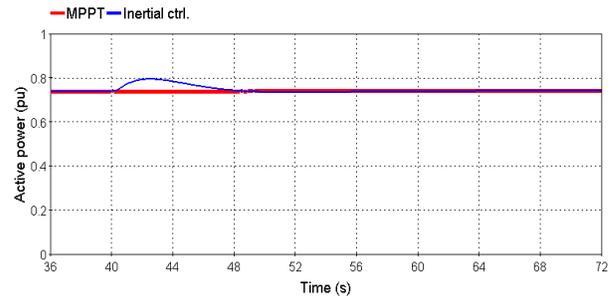


Fig. 7. Active power for wind generator

Table 2. MPPT Control and proposed control output comparison

	MPPT	Inertial control
Lowest frequency point (Hz)	59.47 (@43.20s)	59.51 (@43.20s)
Farm maximum power (pu)	0.74	0.79 (@42.55s)
DFIG1 Maximum output (pu)	1.00	1.07 (@42.05s)
DFIG1 lowest rotor speed (pu)	1.25	1.22 (@48.25s)
DFIG9 Maximum output (pu)	0.40	0.42 (@42.70s)
DFIG9 lowest rotor speed (pu)	0.92	0.91 (@48.80s)

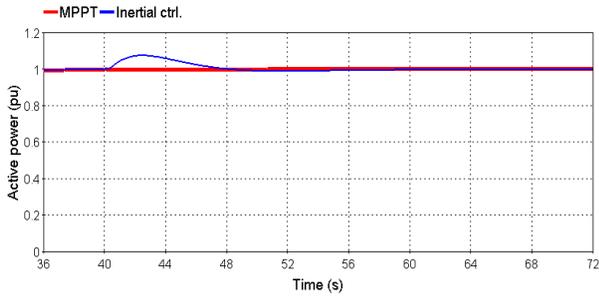


Fig. 8. DFIG1 Active power

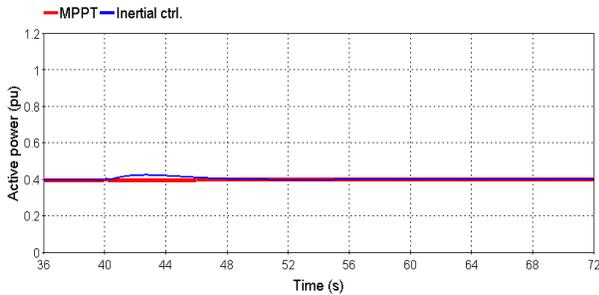


Fig. 9. DFIG9 Active power

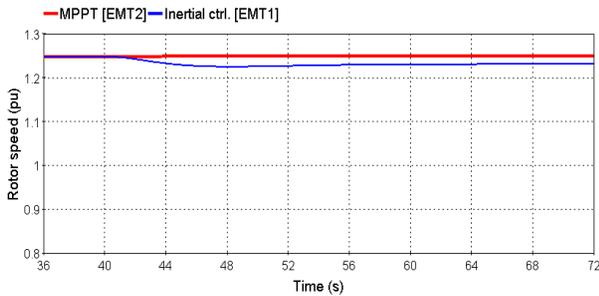


Fig. 10. DFIG1 Rotator speed

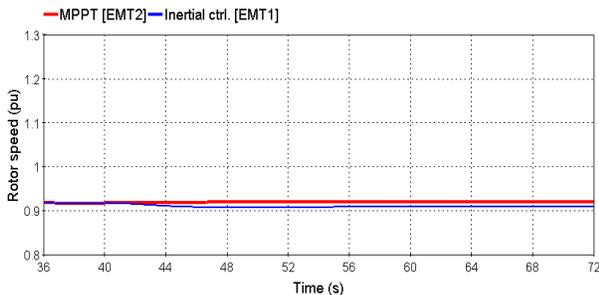


Fig. 11. DFIG9 Rotator speed

DFIG1과 후미의 DFIG9를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 6~11의 그래프를 비교하면 기존 제어 방식인 MPPT 경우 Table 2와 같이 0.74 pu를 출력하였지만 제안한 알고리즘은 0.79 pu를 출력하여 식 (7)을 이용하여 비교산출

한 결과 기존 제어방식인 MPPT 보다 제안한 알고리즘을 적용할 경우 출력량이 6.75% 이상 증가하였다.

$$P = \frac{\text{제안한 알고리즘} - \text{기존 제어방식}}{\text{기존 제어방식}} = \frac{P_{Inertial} - P_{MPPT}}{P_{MPPT}} \times 100 = \frac{0.79 - 0.74}{0.74} \times 100 = 6.75\% \quad (7)$$

3.3 복수 풍력발전단지의 알고리즘 모의 및 분석

복수 풍력발전단지를 고려한 주파수 제어 기술은 각 풍력발전단지의 주파수 제어 기여도를 분석하여 제어 알고리즘의 적용이 필요하다. 계통 주파수 하락 시 각 풍력발전단지 내 풍력발전기 회전자 속도를 기반으로 풍력발전단지별 출력 가능한 발전량을 산정하였다.

풍력발전단지 1의 출력 가능 발전량(PWPP1available), 풍력발전단지 2의 출력 가능 발전량(PWPP2available)을 지정하였고 복수 풍력발전단지의 출력 가능한 총 발전량을 식 (8)과 같이 산정하였다.

$$P_{totalavailable} = PWPP1available + PWPP2available \quad (8)$$

계통 주파수 하락에 따른 전력계통에서 요구하는 전력량 ($P_{systemrequire}$)을 각 풍력발전단지에 복수 풍력발전단지의 출력 가능 총 발전량의 비로 할당하여 풍력발전단지 1과 풍력발전단지 2의 출력 기준값을 식 (9), (10)과 같이 산정하여 출력 제어 수행하였다.

$$P_{WPP1}^{out} = P_{system}^{require} \times P_{WPP1}^{available} / P_{total}^{available} \quad (9)$$

$$P_{WPP2}^{out} = P_{system}^{require} \times P_{WPP2}^{available} / P_{total}^{available} \quad (10)$$

Fig. 12와 같이 입력풍속이 10 m/s와 7 m/s 인 풍력발전단지를 설계하여 제안한 알고리즘 성능을 검증 하였다.

Fig. 13과 같이 동기발전기의 탈락으로 인해 계통주파수가 하락하였으나 제안한 방법으로 MPPT 제어보다 약 0.05 Hz 상승함을 확인할 수 있다.

Fig. 14와 같이 풍력발전단지 출력에서도 기존 제어의 경우 주파수 변동 시에도 일정한 출력을 유지하는 데 비해

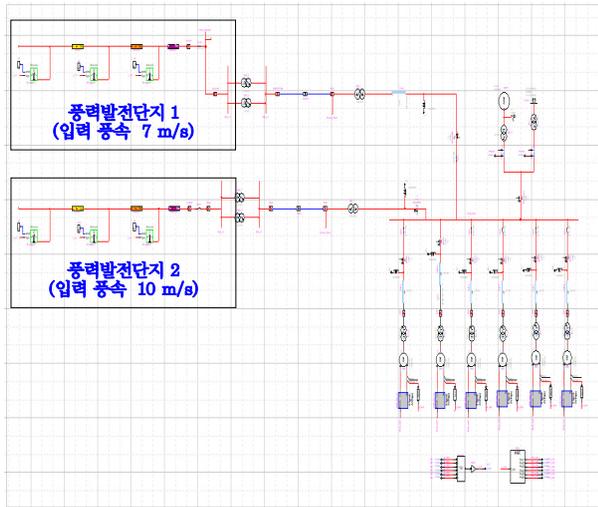


Fig. 12. Multiple wind farm circuit diagram

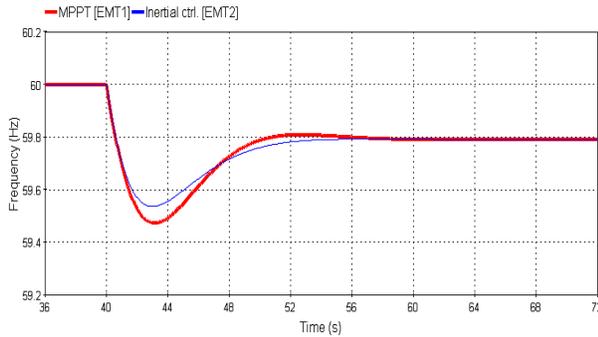


Fig. 13. System frequency

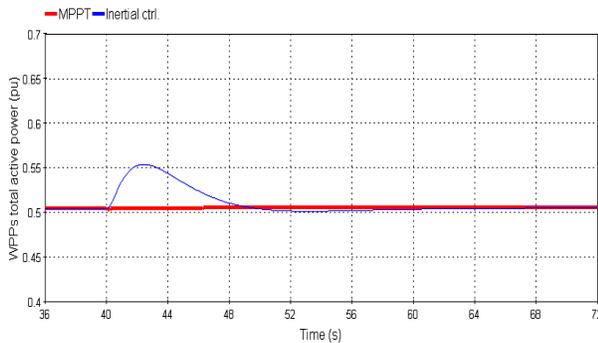


Fig. 14. Effective power of wind farms according to the control algorithm comparison

제안한 방법의 경우 계통 주파수 하락 시 풍력발전단지 출력을 증가하여 계통 주파수 상승에 기여 함을 확인할 수 있다.

Fig. 15에서 알 수 있듯이 복수 풍력발전단지 출력의 경우 입력풍속이 다르므로 각각 풍력발전단지에서 출력 가능

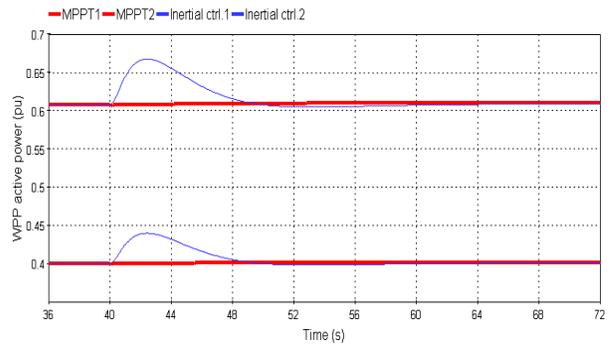


Fig. 15. Comparison of active power at multiple wind farms (10 m/s and 7 m/s)

한 발전량도 다르며, 입력풍속이 높은 풍력발전단지 내 발전기들의 회전자 속도가 높기 때문에 풍력발전단지의 출력 가능한 발전량이 높고 그에 따라 전력계통 주파수 하락 시 보다 많은 양의 전력을 출력함을 확인할 수 있다.

4. 제안한 주파수제어 알고리즘을 적용한 동북 풍력발전단지 실증시험 및 비교 분석

본 논문에서 제안하고 시뮬레이션 검증을 통한 주파수 제어 기술을 적용하여 실제 제주 동북 풍력발전단지의 풍속 측정 후 데이터에 제안 알고리즘을 적용하여 실증시험을 진행하였다.

4.1 실증시험 계획 및 방법

제주 동북풍력발전단지의 실증 시험의 신뢰도를 확보하기 위해 각 시험별 횟수는 20회 시행 하였고, 발전단지 내 전체 측정량이 5 MW 이상일 경우에 실시하였다. 실증 시험 전 1주일간 데이터 분석 결과, 발전단지 전체 출력량은 평균 5 MW 이상을 기록 하였고 시험 전 5개월간 모니터링 결과 주파수는 59.98~99 Hz로 변동사항이 없었다. 그리고 실제 계통에 연계되어 활용되고 있는 에너지원기에 계통주파수를 강제로 Droop 시킬 수는 없으므로 계통 내 극한 상황을 모의하여 제안한 주파수제어 알고리즘 검증 실증 시험을 실시하였다.

감발지령이 투입되기 전에는 MPPT 제어가 이뤄지고 감발지령 후에는 본 제안알고리즘을 투입하므로 제안알고리즘 적용 검증은 감발지령 전후에 측정된 발전단지 전체출

Table 3. A demonstration test method

Wind farm	Scenario	Reduction rate	Number of times	Test time (34 seconds/per session)				Estimated time
				Reduction instructions and delivery completed	Maintenance of reduction	Rising command and Delivery completed	Maintenance of rise	
Dong-bok Wind Farm	1	5%	20	10sec	10sec	10sec	4sec	680sec
	2	10%	20	10sec	10sec	10sec	4sec	680sec
	3	15%	20	10sec	10sec	10sec	4sec	680sec
	4	20%	20	10sec	10sec	10sec	4sec	680sec
Total estimated time required								About 50 minutes (2720sse)

력량을 비교분석하였다.

극한상황을 모의 하기 위하여 한국의 Grid code 내 기능 중 3번째 기능인 급감발 기능을 적용하여 전체 발전단지 내 발전량의 저감률을 선정하였다. 실증일시는 2021년 10월 12일 (화) 13:00~17:00에 진행하였고 모의주파수는 59.51 Hz로 설정하였고 이는 시뮬레이션 검증 시 모의주파수와 동일하다.

실증시험 당일 기준 동북 풍력발전단지 전체 발전량(총 15호기)를 측정하고 시나리오 별 전체발전량대비 저감률을 적용하여 제안한 주파수 제어 알고리즘 성능을 검증하였다.

4.2 시나리오 별 실증시험 비교 분석

Table 3과 같이 각 시나리오 별 주파수 감발지령을 전달하자 최저주파수 도달과 동시에 제안한 주파수제어 알고리즘이 투입되었고, 각각 호기별 회전자 속도를 증가시킴으로써 정산 주파수인 60 Hz를 회복 하였다. 시험은 시나리오 별 총 20 회를 진행하였고 감발지령 전후에 따른 발전단지 최대출력량을 비교한 결과, 감발지령 전에 비해 감발지령 후, 본 연구팀이 제안한 주파수제어 알고리즘을 투입했을 때 식 (7)에 따라 시험을 진행한 모든 시나리오가 Table 4와 같이 기존 출력 대비 10% 이상이 향상하였다.

Table 4. Output comparison of mppt and suggested method

Scenario	Power generation plant maximum output (kW)		
	MPPT	Inertial control	Decrease rate (%)
1	15,024.6	16,794	11.77
2	15,308.4	17,737.2	15.86
3	16,046.7	18,426.3	14.83
4	14,744.2	18,623.6	26.31

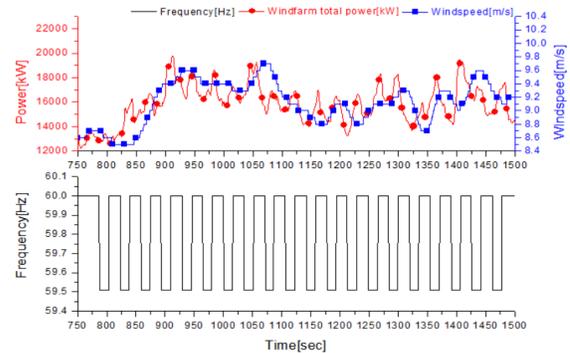


Fig. 16. Scenario 1 (Reduction rate 5%)

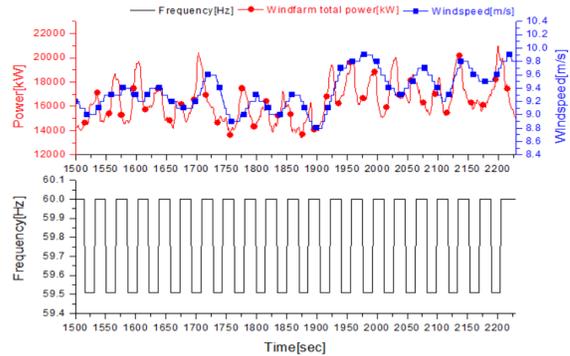


Fig. 17. Scenario 2 (Reduction rate 10%)

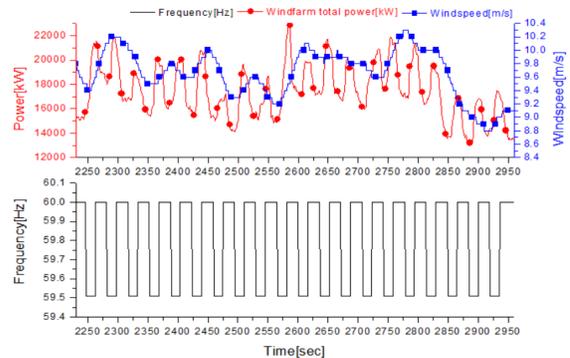


Fig. 18. Scenario 3 (Reduction rate 15%)

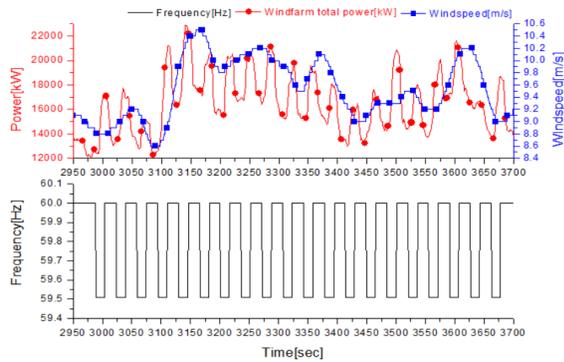


Fig. 19. Scenario 4 (Reduction rate 20%)

5. 결론

본 논문은 계통 주파수를 반영한 풍력발전단지 주파수 제어기술을 향상 시키고자 기존 제어 알고리즘의 취약점을 분석하였고, 루프의 계인 회전자 속도에 따라 가변시키는 제어기술을 제안하여 모의 시뮬레이션을 기존방식인 MPPT 방식과 비교 분석하였다.

분석결과 단수 풍력단지 분석의 경우 기존의 MPPT방식에 비교하여 산출한 결과 제안한 알고리즘을 적용 할 경우 단지 최대출력의 증가를 확인하였고, 복수 풍력단지 분석의 경우 기존의 MPPT방식에 비하여 전력계통 주파수 하락 시 보다 많은 양의 전력을 출력함을 확인할 수 있었다. 제안한 알고리즘의 신뢰성을 입증하기 위하여 제주 동북 풍력발전단지의 실제 풍속 측정 데이터를 수집하고 극한상황을 모의하여 실증 시험을 4가지의 시나리오를 적용하여 시험을 진행한 모든 시나리오가 기존 출력대비 10% 이상 향상시키는 결과를 가져왔다.

변동 풍속 시 제안한 방식에 의한 풍력발전기의 출력이 기존 방식보다 많이 평활됨을 확인하였다. 또한, 발전기 탈락으로 인한 주파수 하락 시에도 제안한 방식을 적용하였을 경우에 주파수 최저점이 높은 것을 확인하였다.

이에, 본 연구 결과를 바탕으로 향후 풍력발전단지에 ESS를 연계하여 제안된 주파수제어 시스템을 통해 통합제어 시스템으로 전력 피크절감 및 계통유연성 확보로 활용될 수 있음이 사료된다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “복수 풍력 단지 연계형 통합 제어 기술 개발 및 실증” 연구과제 결과물을 기초로 작성되었습니다(산업통상자원부공고(No. 20183010025170)).

References

- [1] Korean government, 2020, “Korea 2050 carbon neutral strategy”, **14**, <https://unfccc.int/documents/267683>.
- [2] Jeong, M.S., Seo, S.S., Jo, B.K., and Kim, S.K., 2023, “A review on the P2G system integration as an essential strategy of the energy transition toward carbon-neutral Korea”, *KIEE Magazine*, **72**(3), 30-38.
- [3] Park, S.C., 2020, “A study on characteristics and strategies of the United Kingdom energy transition policy”, *Korean Journal of EU Studies*, **25**(1), 39-77.
- [4] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023, “10th Basic plan for electricity supply and demand (2022-2036)”, Accessed 12 January 2023, <https://korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156547521>.
- [5] Shen, B., Mwinyiwiwa, B., Zhang, Y., and Ooi, B.-T., 2009, “Sensorless maximum power point tracking of wind by DFIG using rotor position phase lock loop (PLL)”, *IEEE Trans. Power Elect.*, **24**(4), 942-951.
- [6] Li, S., Hu, J., Wang, S., He, H., Wang, L., and Liu, G., 2014, “A novel inertial control strategy for full-capacity wind turbine with PLL by optimizing internal potential response”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 3024-3028.
- [7] Margaris, I.D., Hansen, A.D., Cutululis, N.A., Sørensen, P., and Hatziargyriou, N.D., 2011, “Impact of wind power in autonomous power systems-Power fluctuations-Modelling and control issues”, *Wind Energy*, **14**(1), 133-153.
- [8] Miller, N., Manz, D., Johal, H., Achilles, S., Roose, L., and Griffin, J.P., 2011, “Integrating high levels of wind in island systems: Lessons from Hawaii”, *Proc. IEEE ICSET 2010*.
- [9] Kondoh, J., 2010, “Autonomous frequency regulation

- by controllable loads to increase acceptable wind power generation”, *Wind Energy*, **13**(6), 529-541.
- [10] Wang, Q., and Chang, L., 2004, “An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **19**(5), 1242-1249.
- [11] Kayikçi, M., and Milanovic, J.V., 2009, “Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances”, *IEEE Trans. Power Syst.*, **24**(2), 859-867.
- [12] Margaris, I.D., Papathanassiou, S.A., Hatzigiorgiou, N.D., Hansen, A.D., and Sørensen, P., 2012, “Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, **3**(2), 189-199.
- [13] Conroy, J.F., and Watson, R., 2008, “Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, **23**(2), 649-656.
- [14] Lee, J., Muljadi, E., Sørensen, P., and Kang, Y.C., 2016, “Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, **7**(1), 279288.
- [15] Kim, Y., 2016, “Frequency regulation of a variable-speed wind turbine generator using the frequency deviation loop based on the rotor speed-dependent gain”, Doctor’s degree, Jeonbuk National University, Jeonju-si.
- [16] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2022, “Maintenance of power system reliability and electrical quality (Table 16 System Protection Procedures among the Rules of Operation of the Electricity Market)”, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000211645>.
- [17] Chen, Z., Guerrero, J.M., and Blaabjerg, F., 2009, “A review of the state of the art of power electronics for wind turbines”, *IEEE Trans. Power Electron.*, **24**(8), 1859-1875.