해외 그리드 코드를 만족하는 풍력발전기용 합성 관성 알고리즘 시뮬레이션

김예찬, 송승호, 이병철
광운대학교, 유니슨(주)

Simulation of Synthetic Inertia Algorithm for Wind Turbines Complying with Foreign Grid Codes

Ye-Chan Kim, Seung-Ho Song, Byung-Chul Lee
Kwangwoon University, UNISON Co.,Ltd.

ABSTRACT

풍력발전기의 합성 관성은 계통에서의 주파수 외란이 발생할 경우, 외란 직전 풍력발전기의 출력에 더해 터빈에 저장된 운동에너지를 추가로 방출한다. 이는 계통 외란 시에 최저주파수를 향상시키지만, 풍력발전기의 회전속도를 빠르게 감소시키므로 발전 효율이 떨어진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 해외 그리드 코드를 준수하는 두 가지의 합성 관성 알고리즘이 적용된 풍력발전기를 대상으로 합성 관성 수행 시 터빈의 출력 동특성을 분석한다. 각각의 합성 관성 알고리즘은 Type 4 풍력발전기를 대상으로 Matlab/Simulink에 구현되며, 정격 이하의 풍속 및 주파수 외란 발생에 따른 발전량 및 효율 증감, 최대 전력점 회복 시간, 과감속 여부 등이 비교된다..

1. 서 론

IEC 61400-27-1 Type 3, 4[1] 기반의 최신 풍력터빈은 인버터가 적용되어 계통으로부터 독립적이므로, 자유로운 가변속 운전이 가능하다. 이를 통해 풍력발전기의 발전량을 최대화하는 최대 전력점 추종(MPPT: Maximum Power Point Tracking) 제어가 가능해졌지만, 한편으로 계통에 주파수 외란이 발생하였을 때, 풍력 터빈이 가진 관성력을 제공하지 못하게 되었다.

이러한 문제를 해결하기 위해 계통에 주파수 외란이 발생하면 풍력 터빈의 운동에너지를 일시적으로 방출하여 최저주파수를 향상시키기 위한 합성 관성(SI: Synthetic Inertia) 기술이 제안되었다. 합성관성 기술은 유효전력 출력 제어 방식에 따라 계단형 합성 관성, 주파수 기반 합성 관성으로 나뉜다.[2] 주파수 기반 합성 관성은 세부적으로 주파수 편차 비례와 RoCoF(Rate of Change of Frequency) 비례 방식이 있다.

풍력발전기가 합성 관성을 수행할 경우, 풍력터빈 특성 및 운전 상황을 고려하여 운동에너지 방출량을 제한하여 과감속을 방지해야 한다. 그렇지 않으면 과도한 속도 감소로 인해 풍력발전기의 출력이 매우 감소하여, 공칭주파수로 복귀 중인 계통주파수가 다시 떨어질 수 있기 때문이다. 합성관성 수행 후, 풍력발전기는 최대 전력점(MPP: Maximum Power Pouin)으로 복귀하기 위해 회복구간이 요구된다. 회복구간에서의 풍력발전기의 적절한 출력 제어는 풍력발전기의 과감속과 계통주파수의 추가 하락을 동시에 방지해야 하므로 매우 중요한 역할을 가진다.

풍력발전의 비율이 높은 유럽, 북미는 그리드 코드 및 관련 기술문서를 통해 향후 풍력발전기가 합성 관성 기술을 갖추고 주파수 외란 발생 시 개입해야 함을 명시하고 있다. 또한, 해당 국가의 전력계통 상황을 고려하여 합성 관성 수행 및 회복구간에 대한 세부적인 요구사항을 지정하고 있다. 이는 향후 국가별 그리드 코드 요구사항을 충족하는 합성 관성 기술이 풍력발전기에 적용될 경우, 터빈 출력 및 안정성에 미치는 영향에 대하여, 충분한 연구가 필요함을 나타낸다.

본 논문은 유럽 송전 시스템 운영자 네트워크 (ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity) 기술문서와 캐나다 Hydro-Québec 그리드 코드의 합성 관성 요구사항을 비교 분석한다. Matlab/Simulink를 통해 각각의 합성관성 알고리즘을 유니슨 4.5MW Type 4 풍력발전기에 적용하고, 정격 이하의 두 가지 풍속 조건에서 주파수 외란 신호를 인가하여 풍력터빈의 출력 특성과 안정성을 분석한다.

2. 해외 그리드코드의 합성관성

그리드 코드는 세계 각국의 송전 시스템 운영자 (TSO: Transmission System Operators)가 작성한 기술문서로써, 송전 및 배전망에 연결되는 각 장치가 준수해야 하는 요구사항을 설명하는 문서이다. 아래에서 설명할 그리드 코드는 풍력발전기 합성 관성 요구사항을 명시하고 있으며, 표 1에서 자세히 정리하였다.

2.1 ENTSO-E의 기술문서[3]

유럽 전력 송전 시스템 운영자 네트워크(ENTSO-E)는 유럽 전력 시스템 통합을 위해, 유럽 각 지역의 전력계통에 관한 기술 요구사항과 절차를 기술문서를 통해 제시한다. ENTSO-E에서 작성한 노르딕 지역의 빠른 주파수 예비력 제공을 위한 기술 요구사항에서는 풍력발전기의 합성 관성 요구사항에 대해 구체적으로 명시하고 있다. 해당 문서에서는 합성 관성을 빠른 주파수 예비력(FFR: Fast Frequency Reserve)으로 명명한다.

주파수 외란 발생 시, 국가별 TSO에 의해 사전심사된 용량의 추가 유효전력을 출력해야 하며, FFR 시간에 따라 최소 5초를 유지하는 short duration FFR과 최소 30초를 유지하는 long duration FFR로 구분된다. 본 논문에서는 그림 1의 short duration FFR만을 다룬다.

2.2 캐나다 Hydro-Québec의 그리드 코드[4]

캐나다 퀘벡의 그리드 코드는 풍력발전 단지에 합성관성 기술을 적용하도록 한 최초의 기술문서이다. 해당 문서에서는 합성 관성을 관성 응답(IR: Inertia Response)으로 명명한다.

주파수 외란 발생 시, 주파수 편차에 비례하는 추가 유효전력을 최소 9초간 유지해야 한다. 관성 응답에 의한 추가 유효전력 최대치는 최소 정격 출력의 6%이다. 회복구간에서의 전력 감소량은 정격 출력의 20% 이하로 제한한다.

표 1. ENTSO-E/Hydro-Quebec의 합성 관성 기술 요구사항 및 용어 정의
Table 1. Technical requirements and definitions for synthetic inertia of ENTSO-E/Hydro-Quebec

	ENTSO-E[3]		Hydro-Québec[4]	
Nomenclature of Synthetic Inertia(SI)	Fast Frequency Reserve(FFR)		Inertia Response(IR)	
Type of SI	Step		Step or proportional to frequency deviation	
Frequency level for SI activation	Activation level	-0.3/-0.4/-0.5 [Hz]	Dead band	-0.1~-1 [Hz]
Generation level for SI activation	X		Generation level of wind generator	≥ 25% of rated power [W]
Maximum SI power	Maximum FFR capacity	Prequalified FFR capacity [W]	Maximum power overproduction	≥ 6% of rated power [W]
Maximum SI power overshoot	Maximum FFR overdelivery	≤ 20% of FFR capacity [W]	X	
Rise time of SI power	Full activation time	1.3/1/0.7 [s]	Rise time	≤ 1.5 [s]
Duration of SI	Support Duration	≥ 5 [s]	Overproduction duration	≥ 9 [s]
Rate of power decrease after the end of SI	FFR reduction rate during the deactivation	≤ 20% of FFR capacity [W/s]	X	
Delay time before recovery start	Time until start of recovery	≥ 15 [s]	X	
Decrease power during recovery	FFR recovery	≤ 25% of FFR capacity [W]	Decrease during energy recovery	≤ 20% of rated power [W]
Cycle of SI	Prepared time for a new cycle	15 [minute]	Delay after the end ofrecovery period	2 [minute]

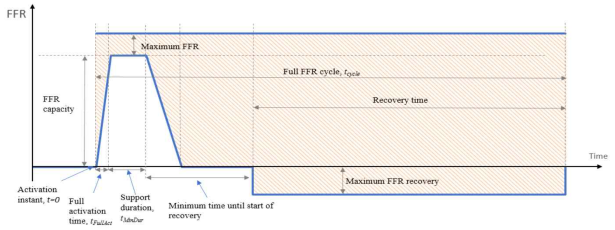


그림 1 ENTSO-E의 단기간 FFR 파형
Fig. 1 Short duration FFR waveform of ENTSO-E

3. Matlab/Simulink 합성 관성 알고리즘 시뮬레이션

Matlab/Simulink에서 구현된 4.5MW 풍력 터빈에 ENTSO-E의 계단형 합성 관성과 Hydro-Québec의 주파수 편차 비례 합성 관성 알고리즘을 적용하였다. 각각의 합성관성 알고리즘은 표 1의 요구사항을 준수하되 구체적으로 제시되지 않은 수치는 비교군의 파라미터를 적용하였으며 이는 표 2와 같다. 연하늘색은 Hydro-Québec 파라미터를 ENTSO-E 파라미터에 적용한 것이며, 연노랑색은 반대이다.

회복 알고리즘은 표 2와 같이 기술 요구사항의 출력 감소 및 기울기를 준수한다. 한편, 구체적인 회복 방식은 문서에서 제시하지 않으므로, 실시간 회전속도에 대한 MPPT 제어 출력에 도달할 때까지 풍력 터빈 출력이 감소하도록 설정한다.

표 3은 시뮬레이션에서 적용된 4.5MW 풍력 터빈의 파라미터이며, 그림 2는 풍력발전기가 합성 관성을 수행하도록 하는 램프 주파수 신호이다. 해당 주파수 신호는 -0.2Hz/s의 기울기를 가진다.

3.1 풍속 조건 1: 합성 관성 수행 시, 점차 감소하는 풍속

풍속 조건 1은 평균 5.88m/s, 최대 6.58m/s, 최소 5.41m/s의속도를 가지며, 시간이 흐름에 따라 초기 풍속 6.21m/s 대비 평균적으로 감소하는 바람 패턴이다. Hydro-Quebec는 합성관성 수행부터 MPPT 출력의 99% 내로 회복할 때까지 63.6초 걸렸으며, 큰 발전량 감소 없이 과감속하지 않았다

표 2. 합성 관성 알고리즘별 파라미터
Table 2. Parameters of Synthetic Inertia Algorithms

	ENTSO-E	Hydro-Québec
Type of SI	Step	Proportional to frequency deviation
Frequency level for SI activation	-0.3 [Hz]	-0.3 [Hz]
Maximum SI power	6% of rated power [W]	6% of rated power [W]
Rise time of SI power	1.3 [s]	1.5 [s]
Duration of SI	5 [s]	9 [s]
Rate of power decrease after the end of SI	1.2% of rated power [W/s]	1.2% of rated power [W/s]
Delay time before recovery start	15 [s]	0 [s]
Decrease power during recovery	1.5% of rated power [W]	20% of rated power [W]

표 3. 유니슨 4.5MW 풍력터빈 파라미터
Table 3. Parameters of Unison 4.5MW Wind Turbine

Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
R	75.5	m	λ_{opt}	11.4	–
GR	110.1	–	ω_{rated}	137.20	r/s
J_b	4,504.8	$kg\,m^2$	ω_{min}	77.66	r/s
J_g	194.2	$kg\,m^2$			

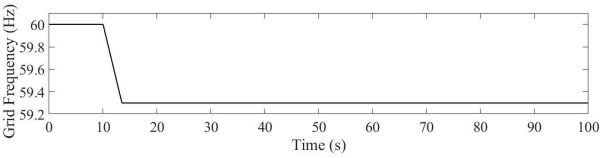
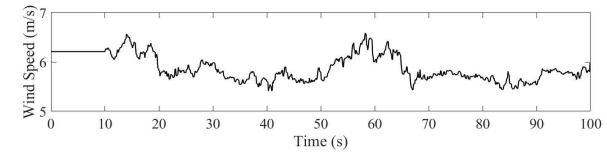
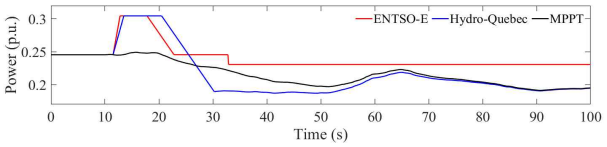


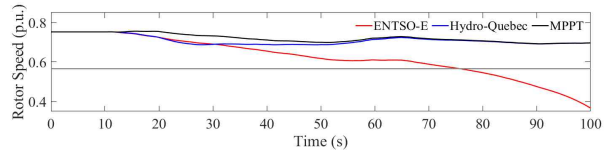
그림 2 시뮬레이션에 사용된 램프 주파수 신호
Fig. 2 Ramp frequency signals for simulation



(a) 풍속



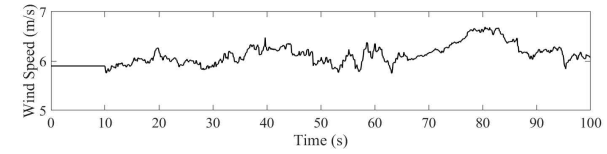
(b) 풍력발전기 유효전력



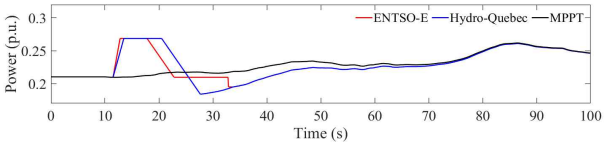
(c) 풍력발전기 회전속도

그림 3 풍속 조건 1의 시뮬레이션 결과

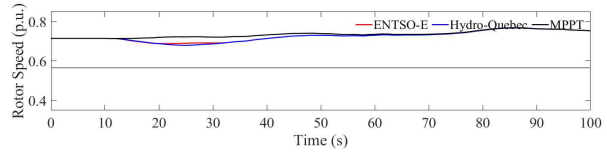
Fig. 3 Simulation result of wind case 1



(a) 풍속



(b) 풍력발전기 유효전력



(c) 풍력발전기 회전속도

그림 4 풍속 조건 2의 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation result of wind case 2

반면 ENTSO-E은 회복구간에서 출력 감소 제한이 너무 작아, 그림 3에서와같이 회복 출력 제한으로 인해 속도가 감소함에도 풍력발전기 출력을 줄일 수 없다. 따라서 76초부터 풍력발전기가 최소 회전속도 0.566p.u.에 해당하는 회색 실선 이하로 떨어졌으며, 이후 지속적으로 감속하다 정지하였다.

3.2 풍속 조건 2: 합성 관성 수행 시, 점차 증가하는 풍속

풍속 조건 2은 평균 6.11m/s, 최대 6.68m/s, 최소 5.75m/s의 속도를 가지며, 시간이 흐름에 따라 초기 풍속 5.90m/s 대비 평균적으로 증가하는 바람 패턴이다. ENTSO-E와 Hydro-Québec 모두 합성관성 수행 후 최소 회전속도 0.566p.u.에 해당하는 회색 실선 이하로 과감속하지 않았다. 또한 71.8초만에 MPPT 출력의 99% 내로 회복하였다.

ENTSO-E의 결과가 조건 1에서와 크게 다른 이유는 평균 풍속이 증가함에 따라 회복 구간에서 출력 감소 제한을 충족하면서, 그림 4에서와같이 터빈 회전속도가 지속적으로 증가하였기 때문이다. 풍속 조건 1과 2의 시뮬레이션 결과는 표 5에 정리하였다.

표 5. 시뮬레이션 결과 정리

Table 5. Summary of simulation results

	Wind Case 1		Wind Case 2	
	ENTSO-E	Hydro-Québec	ENTSO-E	Hydro-Québec
합성관성 출력증가량	2.918 [MWs]	2.972 [MWs]	2.066 [MWs]	2.607 [MWs]
회복구간 출력감소량	-7.892 [MWs]	2.871 [MWs]	2.161 [MWs]	2.718 [MWs]
MPPT 대비 평균 Cp 감소	-0.02459	0.000433	-0.000511	-0.000587
MPP 회복 시간	63.6 [s]	X	71.8 [s]	71.8 [s]
과감속 여부	O	X	X	X

4. 결 론

본 논문에서는 ENTSO-E 기술문서와 캐나다 Hydro-Québec 그리드 코드의 합성 관성 기술 요구사항을 비교하였으며, Matlab/Simulink에서 구현된 4.5MW 풍력 터빈에 각 합성 관성 알고리즘을 적용하여 터빈 출력 특성 및 안정성을 분석하였다. ENTSO-E와 Hydro-Québec은 공통적으로 합성 관성 수행에 대한 요구사항은 분명하지만 회복 구간에 관해서는 출력 감소 제한을 제외하면 구체적인 요구사항이 없다. 따라서 본 논문에서는 출력 감소 제한 내에서 실시간 회전속도에 대한 MPPT 제어 출력에 도달할 때까지 풍력 터빈 출력이 감소하도록 설정하였다.

시뮬레이션에서 평균 풍속 약 6m/s에서 각각의 합성관성 알고리즘이 적용된 두 대의 4.5MW 풍력발전기 모두 정격 출력의 6%에 해당하는 합성관성 최대 출력을 10초 이내로 충분히 유지할 수 있었다. 해당 결과는 대형 풍력터빈이 주파수 외란 상황에서 충분히 계통에 관성력을 제공할 수 있음을 의미한다.

한편, ENTSO-E의 회복 구간 출력 감소 제한은 너무 작으므로, 약 1m/s의 작은 변동 범위 내에서 점차 감소하는 풍속 조건 1에서도 터빈이 정지하였다. 이는 풍력발전기가 합성관성 수행 후에도 계통 주파수에 부담을 주지 않기 위해 출력을 충분히 줄이지 않았기 때문이다. 따라서 변동하는 풍속 조건 하에, 계통 주파수 지원과 최대 전력점까지의 회전속도 회복이라는 상충하는 두 상황을 적절히 조율하는 회복 알고리즘 개발이 필요함을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 20223030020110, 전력망 안정성 확보를 위한 MW급 풍력터빈 합성 관성 기술 개발)

참 고 문 헌

[1] *Wind energy generation systems - Part 27-1: Electrical simulation models - Generic models*, IEC, July. 2020

[2] 강용철, 김규호, 조동호, 김태균, "풍력발전기의 주파수 기반 합성 관성 기술의 성능 분석", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회, 2022. 10

[3] *Technical Requirements for Fast Frequency Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area - External document*, ENTSO-E, Jan. 2021

[4] *Technical Requirements for the Connection of Generating Stations to the Hydro-Quebec Transmission System*, Transenergie and Hydro-QuEbec, July. 2022