

IBRs 그리드코드 WG 전문워크샵

풍력단지 합성관성 해외 그리드코드 사례 및 국내계통 적용 효과

EPEL

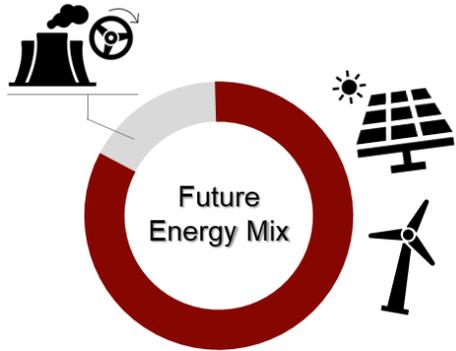
24.04.25



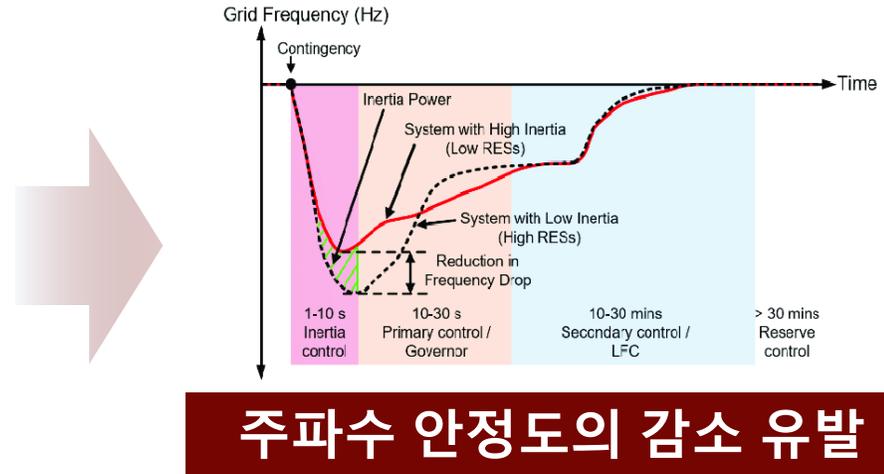
Contents

목차

- **합성관성 개요 및 필요성**
- **해외 그리드코드 및 적용 사례**
- **합성관성 기술 연구개발 내용**
- **국내 전력계통 적용 효용성**



재생에너지원 비중 증가로 인한
회전체 기반 발전설비 비중의 감소로
시스템의 총 관성 감소



재생에너지원들 중에서도 풍력발전기(특히 해상풍력)는 큰 발전가능성을 가지고 있는 자원

- 한국은 3면이 바다로 둘러싸여 있어 해상풍력을 설치하기에 적합
- 세계 풍력 시장은 '19년 521억 달러에서 2025년 1,118억 달러로 증가할 전망 (연 평균 성장률 13%)

(단위 : 백만 달러, %)

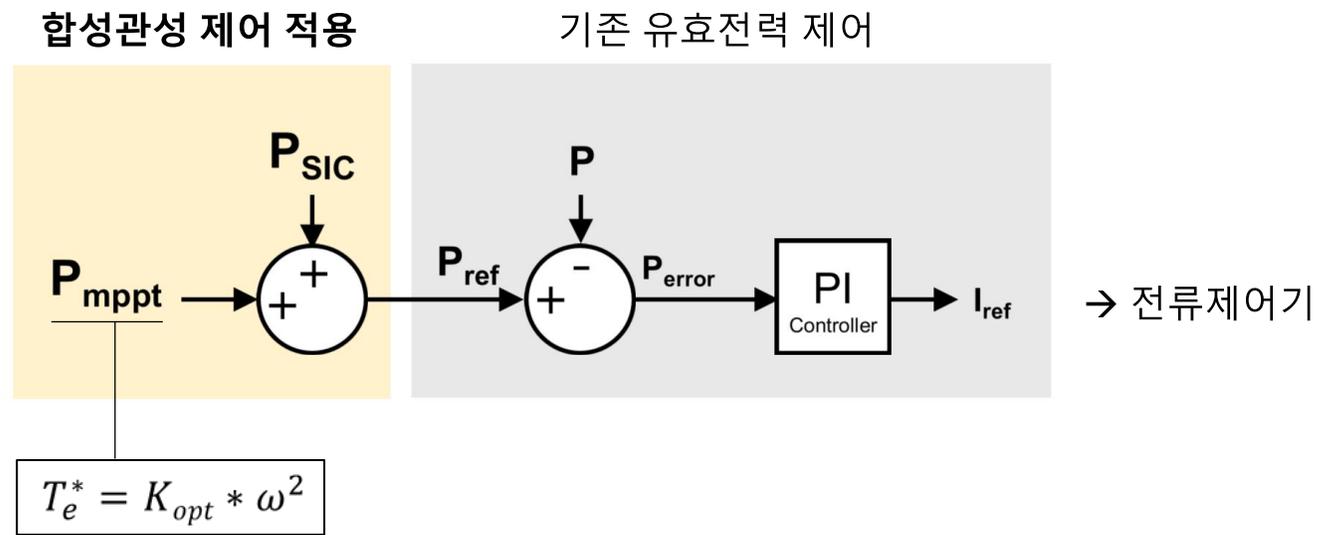
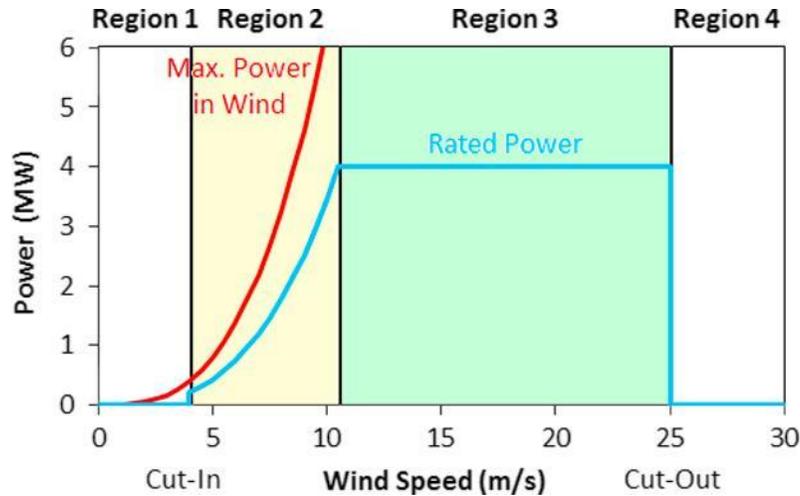
구분	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	CAGR
합계	52,139	59,880	68,770	73,831	84,793	97,382	111,840	13.0

* 출처 : Research and market, wind electricity global market report (2021)

< 풍력에너지 세계 시장규모 및 전망, 중소기업 전략기술로드맵 2022-2024, 신재생에너지, 중소벤처기업부 >

- 인버터 기반으로 동작하는 재생에너지원들은 일반적으로 MPPT 운전을 지속해 계통주파수 외란 시 도움을 주지 않음
➔ 하지만, **회전체**가 존재하는 풍력발전기는 **합성 관성 기술**을 통해 계통에 관성을 공급해줄 수 있음

❖ 풍력발전기 인버터의 유효전력 제어

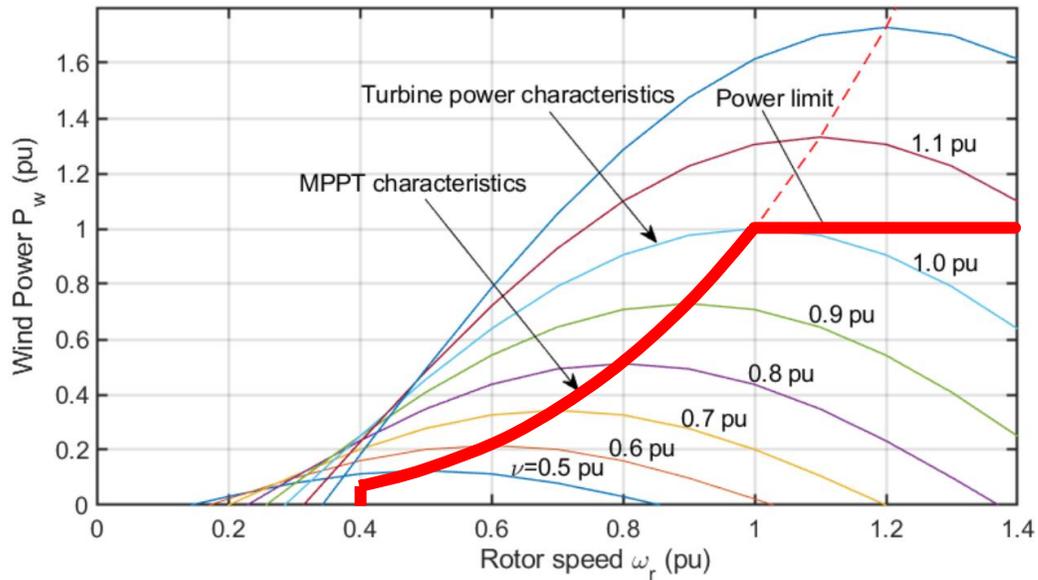


- 풍력발전기는 풍속 상황에 따라 제어 모드가 구분됨 : MPPT 제어, 피치 제어 ...
- 합성 관성 제어는 MPPT 제어 구간인 Region 2에서 적용 가능
- 외란 시, 합성 관성 유효전력 출력이 기존 MPPT 지령치에 더해지는 방식으로 유효전력 출력을 증가시킴

Ref) Cooperman, Aubryn, and Marcias Martinez. "Load monitoring for active control of wind turbines." Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2015)

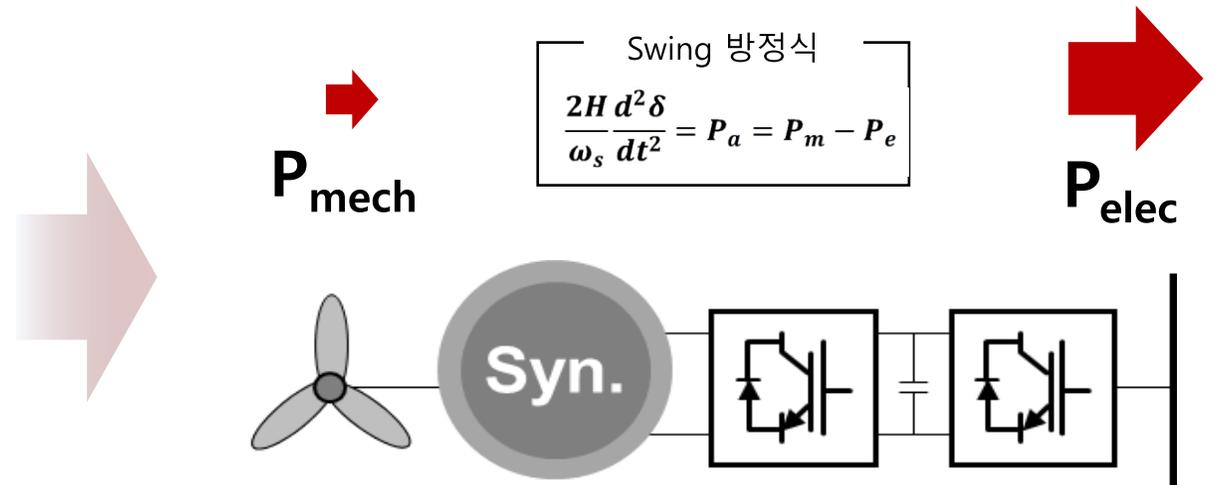
❖ 풍력발전기 인버터 합성관성 제어의 동작

① 계통 주파수 외란 발생 이전



풍속 및 피치 각도에 따른 **MPPT (최대전력점추종) 제어**
 풍력발전기의 출력 $P_e =$ 터빈의 기계적 출력 P_m

② 주파수 하락 외란 발생 후, 합성관성 제어 동작 시



터빈 회전체에 저장된 운동에너지 일시적 방출 (P_e 증가)
→ 계통 최저주파수(Frequency nadir) 향상, 회전자속도 감소
 풍력발전기의 출력 $P_e >$ 터빈의 기계적 출력 P_m

❖ 합성관성 제어의 종류

계통 외란 발생
주파수 하락



일시적으로
출력 증가



Recovery period

회복구간 설정 및 복귀 지점에 따라 다양

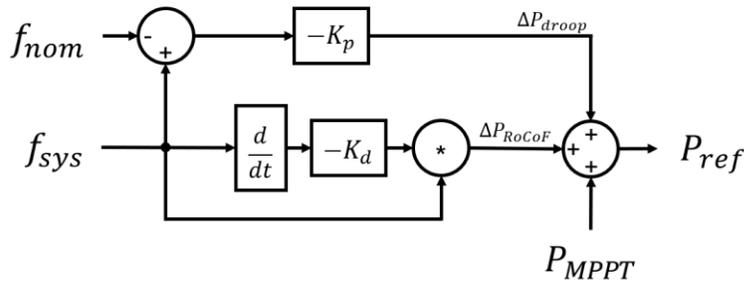
출력 감소 및
회전자 속도 회복



기존
운전점 복귀

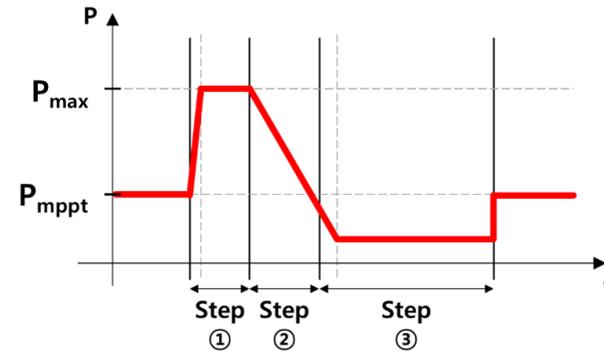
출력 증가 방식 및 유지 시간에 따라,
주파수 기반 계산 (주파수 기반) / 직접 설정 (계단형)

주파수 기반 합성 관성 제어



- 주파수 편차(Δf)와 주파수 변화율(RoCoF)을 이용
- 최저주파수와 외란 직후의 주파수를 효과적으로 보상
- 설정한 계인에 따라 방출하는 운동E의 크기가 변동, 과도한 계인 설정 시 회전자 과감속 우려

계단형 합성 관성 제어



- Step ① : Activation & Duration
- Step ② : Deactivation
- Step ③ : Recovery

- 계단식으로 출력을 증가시키고 관성 제공 이후 다시 감소
- 출력 크기와 유지시간이 고정적이기 때문에, 그리드 코드에 따라 신뢰 가능한 관성을 공급 가능
- 회복 시 유효전력 감소량에 따라, 2차 주파수 하락 발생 가능성 존재

■ 해외 그리드 코드의 합성 관성 기술

- 많은 TSO, ISO가 계통주파수 지원 자원으로 풍력발전기 합성관성 제어를 언급하며 그리드 코드에 포함하고 있음
- 캐나다 Hydro-Quebec과 아일랜드 EirGrid and SONI의 그리드코드에는 풍력터빈의 합성관성에 관한 기술적 요구사항 명시
- 유럽 ENTSO-e와 영국 National Grid는 향후 그리드 코드에 합성관성이 적용될 것을 대비해 기술 요구사항이 포함된 문서를 제작
- **합성관성 추가 유효전력 유형**
 - ① **계단 증가** : 추가 유효전력의 최대치를 지속해서 출력 (Step)
 - ② **주파수 편차 비례** : 주파수 편차에 비례한 추가 유효전력 출력 (Droop)

항목	ENTSO-e Nordic (북유럽) ¹⁾	Hydro-Québec (캐나다 퀘벡 TSO) ²⁾	IESO (캐나다 온타리오 TSO) ³⁾	EirGrid and SONI (아일랜드) ⁴⁾	
명칭	Fast Frequency Reserve(FFR)	Inertial response	별도 명칭 없음 (급격한 주파수 감소를 완화하기 위한 풍력터빈의 추가 유효전력 공급 기능을 언급한 이후부터 이를 'this feature'로 언급)	Fast Frequency Response(FFR) Provision with Dynamic Capability	Fast Frequency Response(FFR) Provision with Static Capability
추가 유효전력 유형	계단 증가	계단 증가 또는 주파수 편차 비례	계단 증가	주파수 편차 비례	다단 주파수 트리거에 의한 계단 증가
재 동작 주기	≤ 15 [minute] (합성 관성 시작 시점 기준)	≤ 2 [minute] (속도 회복 종료 이후 기준)	≤ 30 [minute] (합성 관성 시작 시점 기준)	-	-

1) ENTSO-e Nordic: Fast Frequency Reserve – Solution to the Nordic inertia challenge, 2019. 12. 13

2) Hydro-Quebec: Technical Requirements for the Connection of Generating Stations to the Hydro-Québec Transmission System, 2022. 07. 15

3) IESO: Market Manual 2: Market Administration Part 2.20: Performance Validation Issue 10.0, 2019. 12. 4

4) EirGrid and SONI: DS3 System Services Protocol – Regulated Arrangements

■ 해외의 합성관성 기술 특징 : 정량적 파라미터

구분	항목	ENTSO-e Nordic (북유럽) ¹⁾	Hydro-Québec (캐나다 퀘벡 TSO) ²⁾	IESO (캐나다 온타리오 TSO) ³⁾	EirGrid and SONI (아일랜드) ⁴⁾	
합성관성 시작 조건 (Activation/trigger)	주파수 트리거 레벨	A) -0.3 B) -0.4 C) -0.5 [Hz]	-0.1 ~ -1 [Hz] (Adjustable Dead band)	-0.3 [Hz] (-0.036Hz 보다 높으면 추가 유효전력 출력 종료)	-0.015~-0.2 [Hz]	-0.2~-0.7 [Hz]
	외란 직전 유효전력 최소 레벨	-	≥ 정격 출력 25% [W]	-	-	-
추가 유효전력 파라미터 (Additional power)	추가 유효전력 크기 (Additional Power)	FFR 용량 [W] (TSO에 의해 사전 검증된)	≥ 정격 출력 6% [W]	≥ 외란 직전 출력 10% [W]	TSO와 계약	TSO와 계약
	추가 유효전력 오버슈트 허용치 (Max. Overshoot)	≤ FFR 용량의 35% [W]	-	-	-	-
	추가 유효전력 상승 시간 (Rise time)	A) ≤ 1.3 B) ≤ 1 C) ≤ 0.7 [s]	≤ 1.5 [s]	≤ 1 [s]	2 [s] (유효전력 응답 시간)	-
	추가 유효전력 유지 시간 (Duration)	≥ 5 [s]	≥ 9 [s] (상승 시간 (≤ 1.5s) 포함)	≥ 10 [s]	계통주파수가 복구될 때까지 (TSO 동의 하에 정확한 시간 설정 가능)	계통주파수가 복구될 때까지 (TSO 동의 하에 정확한 시간 설정 가능)
회복 관련 제한조건 (Recovery Limitations)	유효전력 감소율 (Power decrease rate)	≤ FFR 용량의 20% [W/s]	-	≤ 추가 유효전력 상승 시의 증가율 [W/s]	-	-
	회복 시작 전 지연 시간 (Buffer time before recovery)	≥ 10[s]	-	-	-	-
	유효전력 감소량 (Power during recovery)	≥ -25% of 지정 용량 [W]	≥ -외란 직전 출력 20% [W]	≥ -추가 유효전력 [W]	-	-

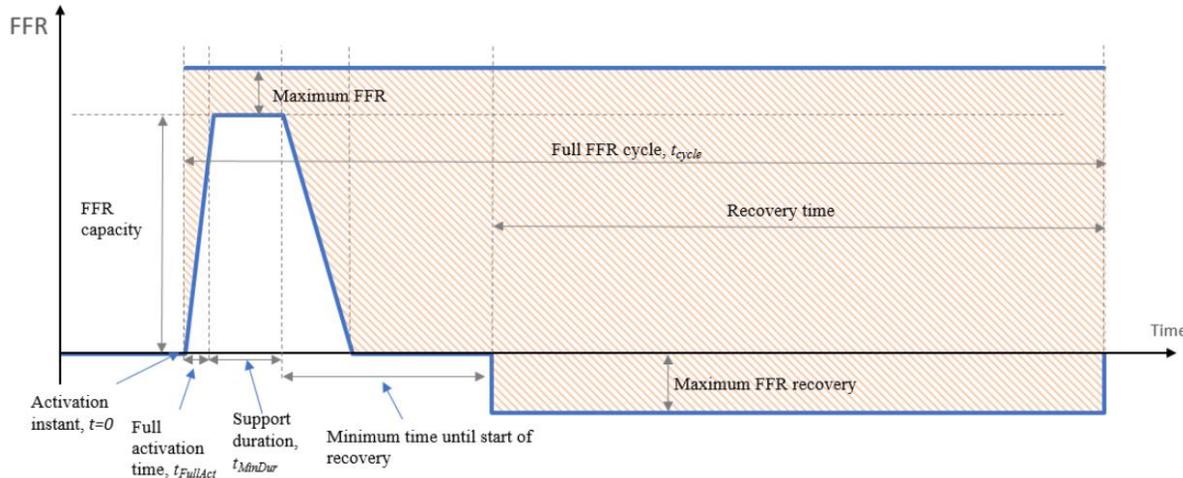
1) ENTSO-e Nordic: Fast Frequency Reserve – Solution to the Nordic inertia challenge, 2019. 12. 13

2) Hydro-Quebec: Technical Requirements for the Connection of Generating Stations to the Hydro-Québec Transmission System, 2022. 07. 15

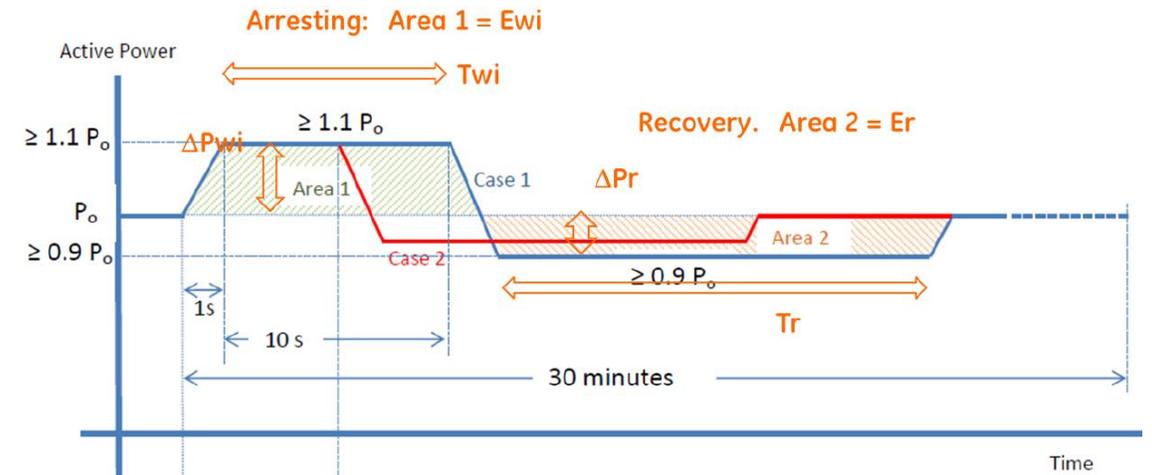
3) IESO: Market Manual 2: Market Administration Part 2.20: Performance Validation Issue 10.0, 2019. 12. 4

4) EirGrid and SONI: DS3 System Services Protocol – Regulated Arrangements

해외의 합성관성 기술 특징 : ENTSO-e 와 Hydro-Québec 의 비교



ENTSO-e FFR Requirements

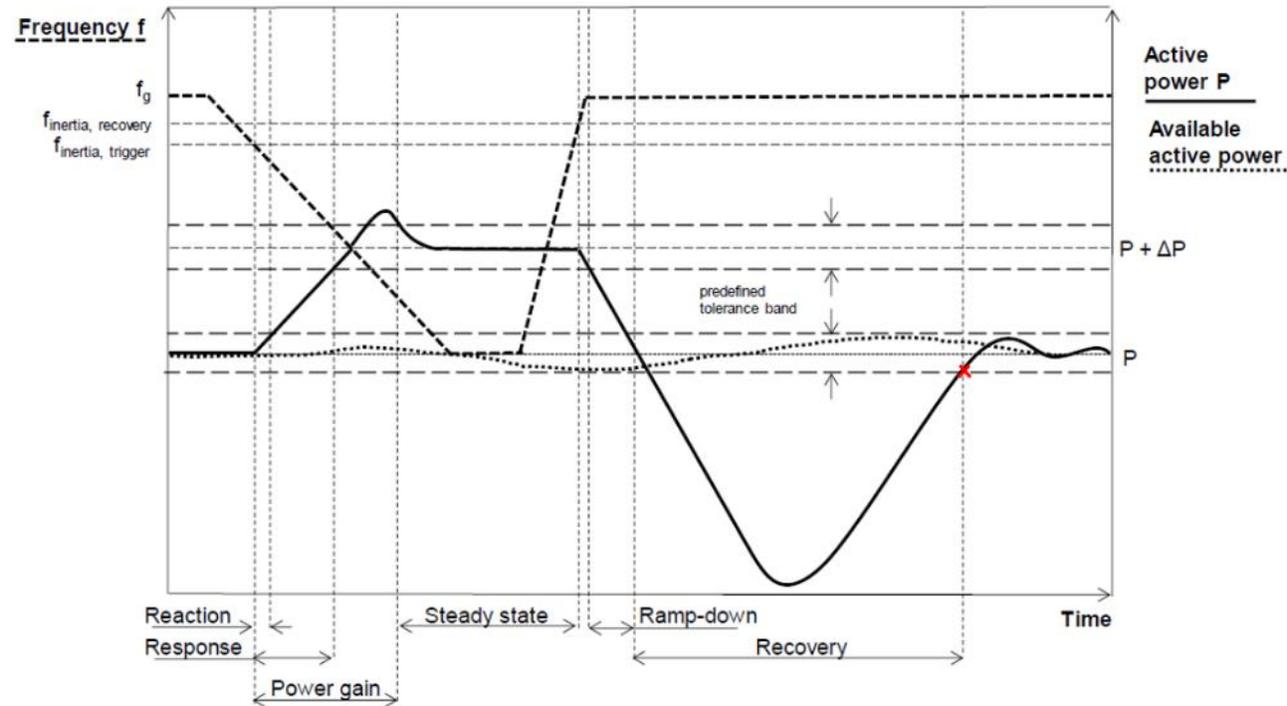


Hydro-Quebec FFR Grid Code

구분	항목	ENTSO-e Nordic (북유럽)	Hydro-Québec (캐나다 퀘벡 TSO)
합성관성 시작 조건	주파수 트리거 레벨	A) -0.3 B) -0.4 C) -0.5 [Hz]	-0.1 ~ -1 [Hz] (Adjustable Deadband)
추가 유효전력 파라미터	추가 유효전력 크기 (Additional Power)	(TSO에 의해 사전 검증된) FFR 용량 [W]	≥ 정격 출력 6% [W]
	추가 유효전력 상승 시간 (Rise time)	A) ≤ 1.3 B) ≤ 1 C) ≤ 0.7 [s]	≤ 1.5 [s]
	추가 유효전력 유지 시간 (Duration)	≥ 5 [s]	≥ 9 [s] (상승 시간 (≤ 1.5s) 포함)
회복 관련 제한조건	유효전력 감소율 (Power decrease rate)	≤ FFR 용량의 20% [W/s]	-
	유효전력 감소량 (Power during recovery)	≥ -25% of 지정 용량 [W]	≥ -외란 직전 출력 20% [W]

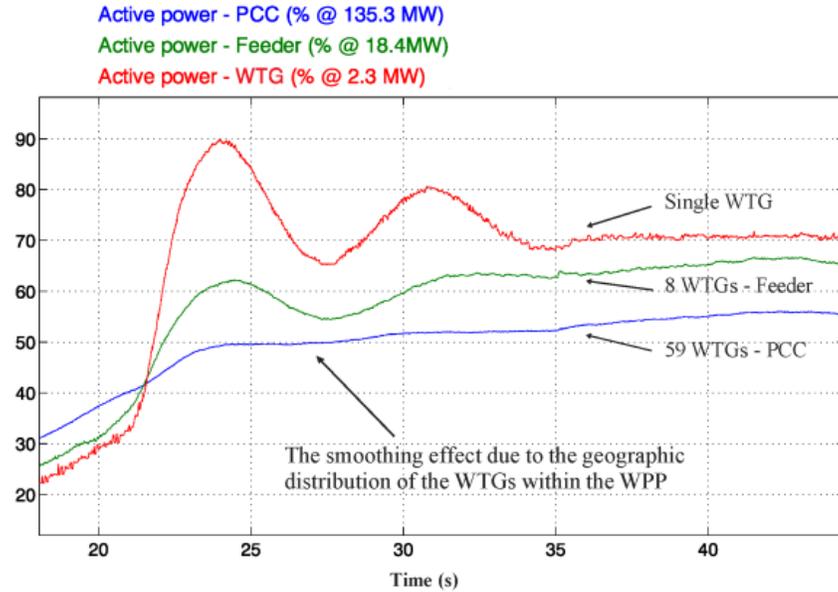
합성관성 성능평가 국제표준 : IEC 61400-21-2

- 합성 관성(Synthetic inertia response)을 계통주파수 외란 이후, 시간에 따른 풍력발전단지의 유효전력 출력 응답으로 규정
- IEC 61400-21-2에서 정의하는 합성관성 절차는 아래 그림처럼 Power gain, Steady state, Ramp-down, Recovery로 나뉘어 있음
- 시뮬레이션 주파수 지령치 f_{sim} 을 활성화 신호로 인가하여 풍력발전단지의 합성관성을 평가함

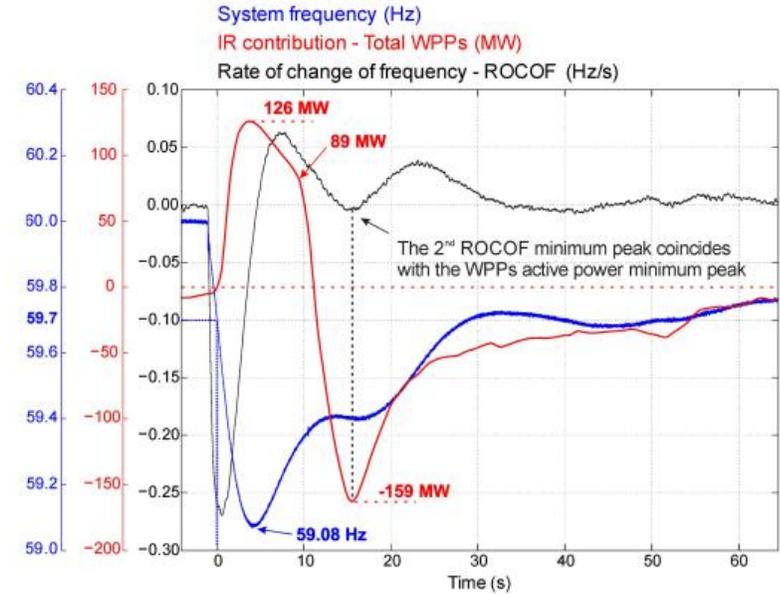


IEC 61400-21-2의 풍력발전기 합성관성 시험 절차

합성관성 기술 적용 사례 : Hydro-Québec



Power output at the PCC, feeder and single WTG within the same WPP

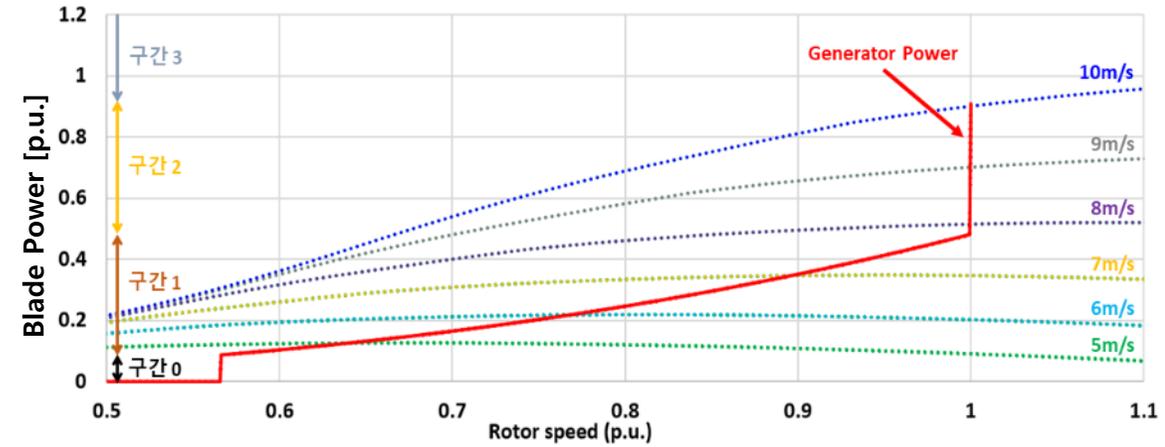
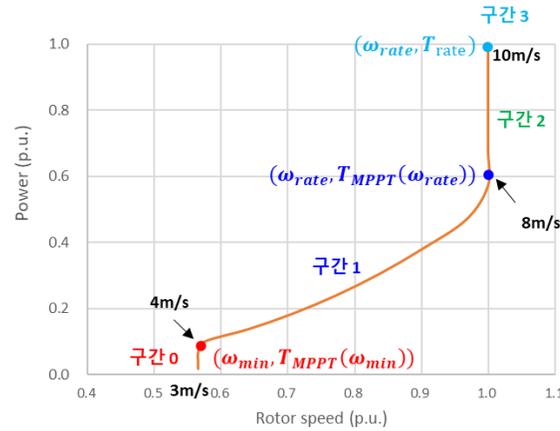
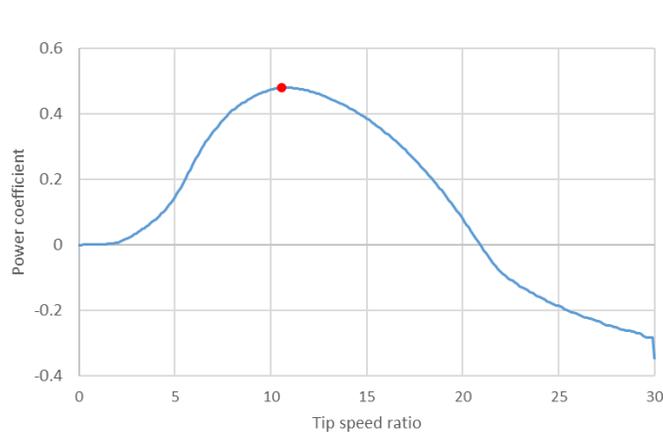


Comparison of the IR contribution from WPP with the system frequency and corresponding RoCoF

- Hydro-Québec은 2009년에 처음으로 합성관성을 계통연계기준에 포함
- 2015년 12월 28일 1700MW 발전 손실로 59.08Hz의 최저주파수를 기록했는데, 이때 관성응답을 제공하는 WPP가 주파수 향상에 기여함

Ref) Asmine, Mohamed, Charles-Éric Langlois, and Noël Aubut. "Inertial response from wind power plants during a frequency disturbance on the Hydro-Quebec system—event analysis and validation." IET Renewable Power Generation 12.5 (2018): 515-522.

■ 유니슨 U151 풍력터빈 모델 구현

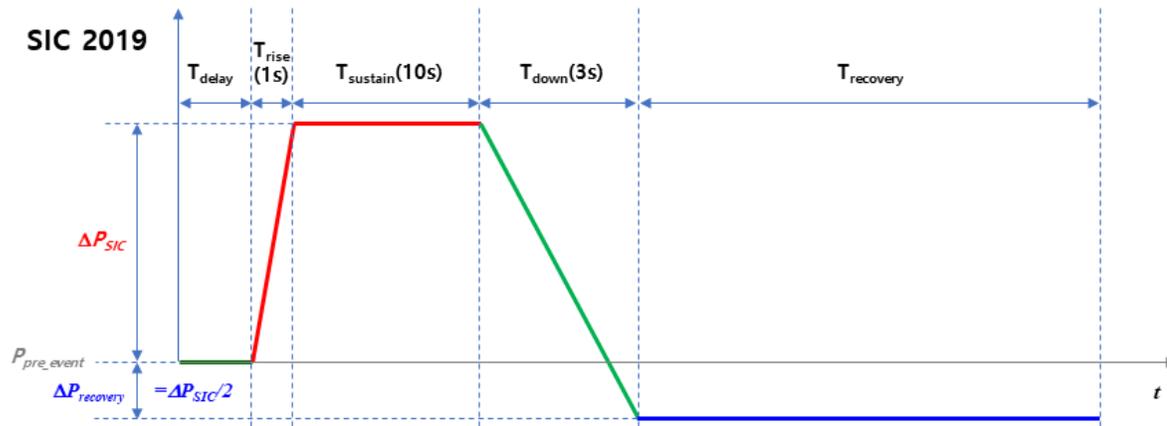


유니슨 풍력발전기 U151 모델의 Cp 및 속도-출력 곡선

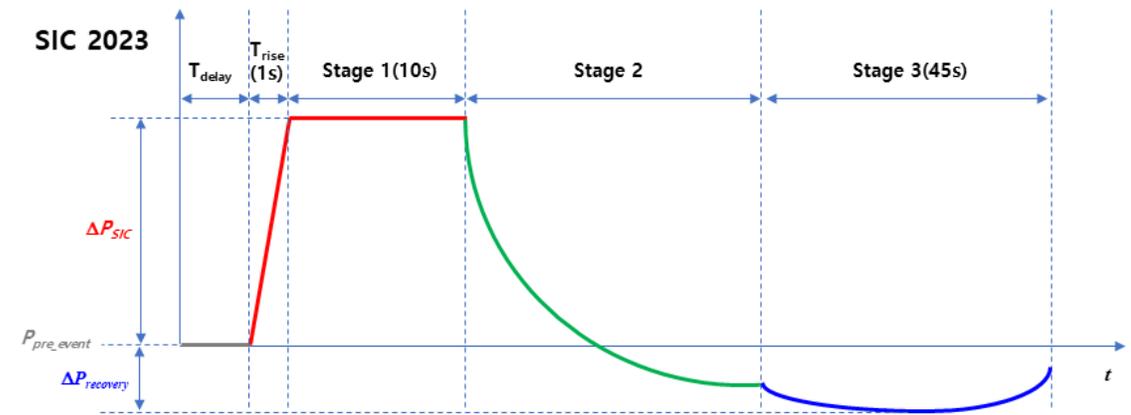
- 유니슨에서 제공한 Cp, 풍력터빈 파라미터와 속도-출력 곡선을 바탕으로 U151 풍력발전기 모델 구현
- 유니슨 풍력 터빈의 출력 제어
 - ① 구간 0 : 저풍속 제어구간, $T_{ref} < T_{mppt}$
 - ② 구간 1 : MPPT 제어구간, $T_{mppt}(\omega_{min}) < T_{ref} < T_{mppt}(\omega_{rate})$
 - ③ 구간 2 : 고풍속 제어구간, $T_{ref} > T_{mppt}(\omega_{rate})$
 - ④ 구간 3 : 피치제어 구간, $\beta > 0$

■ 계단형 합성관성 제어 기술

- 풍력발전기가 외란 이전에는 MPPT 제어를 수행하고 있다가, 외란 직후 회전체에 저장된 운동에너지를 방출하는 기술
- 계단형 합성관성은 유효전력 기준값을 미리 설정한 함수대로 변경하며 외란 감지 직후 출력을 순간적으로 증가시킴
- 합성관성 사이클은 합성관성 구간(A→C)와 속도 회복구간(C→E)로 구분
- 출력 증가량은 외란 크기와 관계없기 때문에, 많은 양의 운동에너지가 방출될 수 있어 회전자의 과감속(Over-deceleration) 가능성
→ OD를 방지하고, 계통 주파수에 주는 영향을 줄여 원만하게 풍력발전기 회전자 속도를 회복하게 하는 알고리즘을 개발

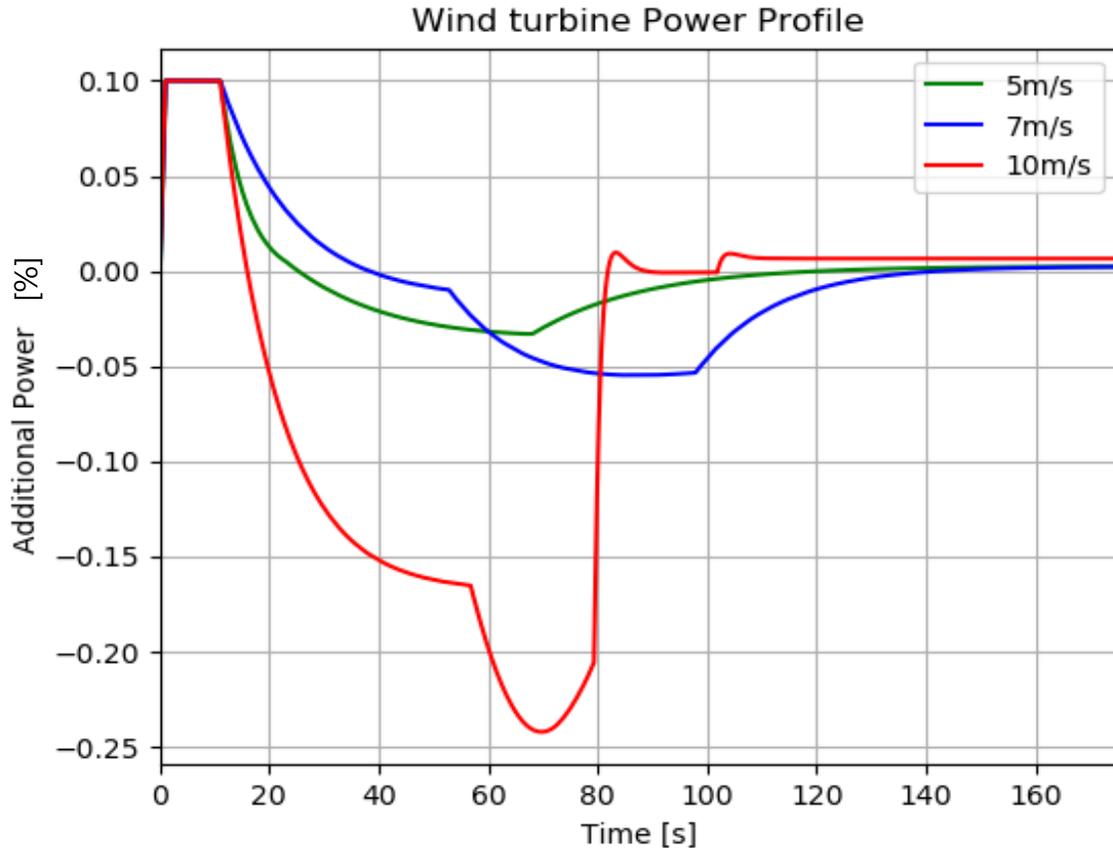


기본적인 계단형 합성관성 알고리즘 : SIC 2019



OD 방지 및 최저주파수 향상을 위한 합성관성 알고리즘 : SIC 2023

최신 합성관성 제어 알고리즘의 풍속 별 프로파일



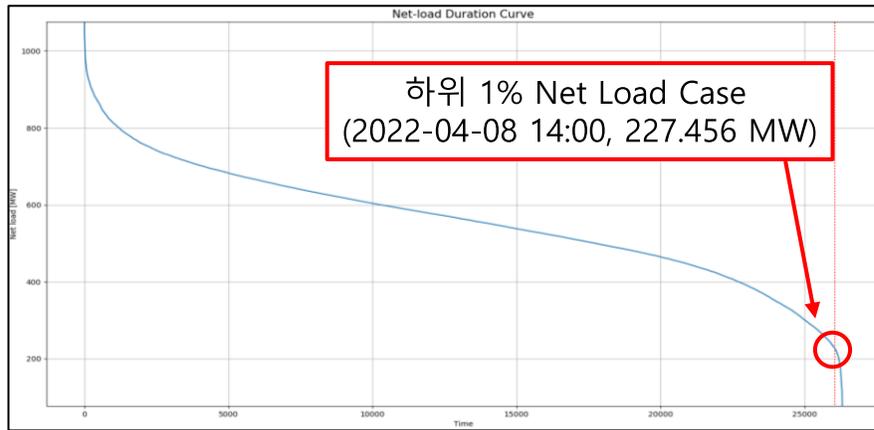
SIC 2023 알고리즘의 풍속 별 합성관성 추가전력 파형

- 해당 프로파일은 2023년 연구개발 버전의 알고리즘으로, 회복구간에서 OD가 발생하지 않는 유효전력 궤적으로 회복
- 각각 저풍속, 중풍속, 고풍속대의 프로파일을 단순화하여 나타냄
- **10m/s** 고풍속의 경우 Cp곡선의 특성 상, 알고리즘에 따라 회전자 감속이 더 가파르게 진행되어 큰 유효전력 감소 발생
- Maximum Additional Power : 외란 전 출력의 10%

Rising rate	$P_{gen} * 0.1$ [pu/s]
Duration time	10 [s]
Additional power	외란 전 $P_{gen} * 0.1$

■ 제주계통 시뮬레이션을 위한 DB 셋업

- 10차 전기본 기반 2026년 타겟 미래 제주계통을 대상으로 PSS/e DB 셋업 및 시뮬레이션
 - 제주KPX 2020~2022 실적데이터의 NDC 1%를 Base case로 세팅하고, 10차 전기본의 2026년도 기준 설비용량 및 부하 스케일링
- * 미래 제주계통 Must-run 발전기는 4대로 가정



제주 KPX 실적데이터 Net-load Duration Curve (2020~2022)

Base case Snapshot (2022-04-08 14:00)

	PV	WT	Total
RE 설비용량 [MW]	532.82	313.18	845.997
RE 발전량 [MW]	242.645	6.027	248.672
RE 이용률	0.4554	0.0192	-
부하			
계통수요	480.855 [MW]		
2022년 최대부하수준	1104 [MW]		

Future JEJU DB Summary [MW]

Year	Load level	Mainland load	Total load	RE Capacity	Curtailement	Swing gen
2026	595.84	500	1095.84	2342.0	75.35	100.75

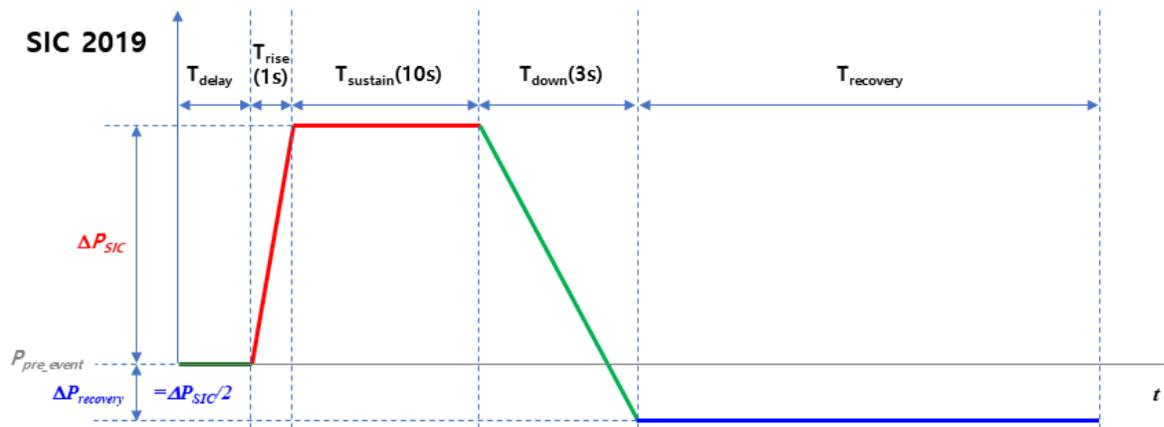
2026년도 DB 구축 결과 요약

HVDC Set point [MW]

#1	역송	100
#2	정송	100
#3	정송	0

■ 제주계통 풍력발전단지 합성관성 시뮬레이션

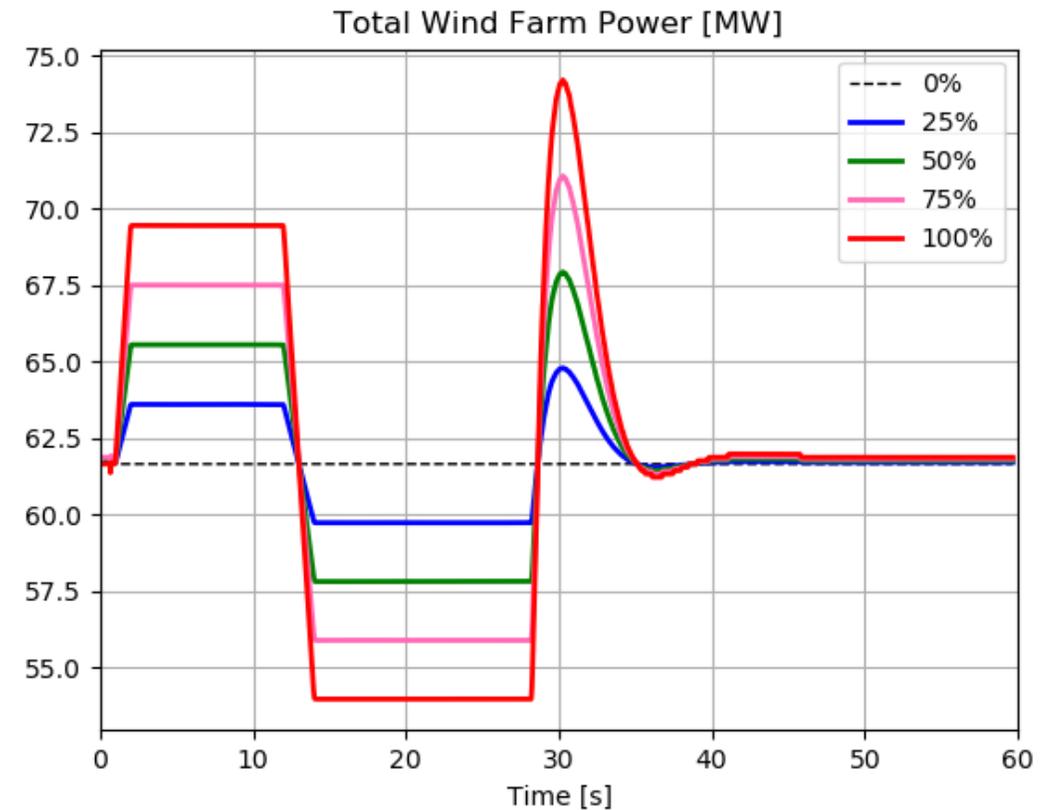
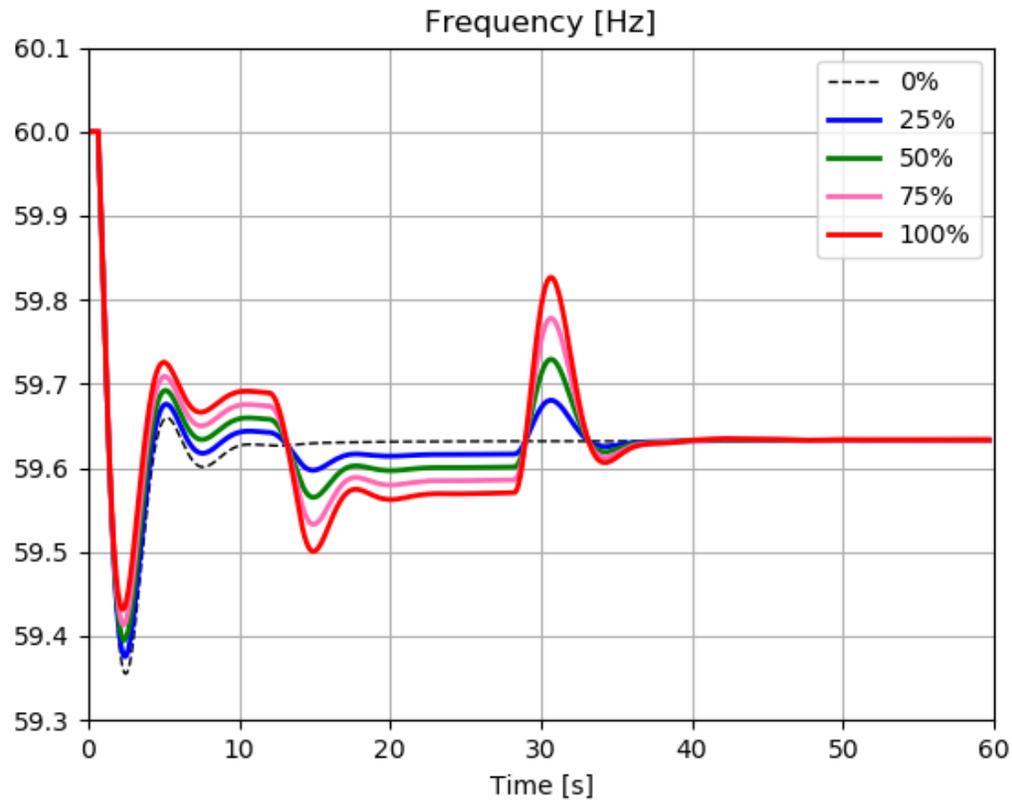
- 10차 전기본 기반 2026년 타겟 미래 제주계통에서 합성관성 시뮬레이션
- 제주계통 대상 시뮬레이션의 합성관성 방식은 2019년 알고리즘 방식을 사용
- 풍속 및 풍력발전기 이용률 : 저풍속대인 4m/s 합성관성 프로파일 적용 → 풍력발전기 이용률 38%
- 합성관성 참여율 : 최대 추가출력은 기존 전체 출력의 10% → 10%의 추가출력이 0, 25, 50, 75, 100 [%] 만큼 기여하는 경우를 비교
- 사고 시나리오 : 0.65 [s] 에 제주TP2 (46MW) 발전기 탈락, 주파수 하락 모의



기본적인 계단형 합성관성 알고리즘 : SIC 2019

Rising rate	$P_{gen} * 0.1$ [pu/s]
Falling rate	$P_{gen} * 0.1$ [pu/s]
Duration time	10 [s]
Additional power	외란 전 $P_{gen} * 1.1$
Recovery power	외란 전 $P_{gen} * -1.1$
Recovery time	14 [s] at 4m/s

■ 제주계통 합성관성 시뮬레이션 결과



■ 육지계통 해상풍력단지 합성관성 시뮬레이션

- 2030, 2036년 미래 육지계통 동계주간(Case 10), 동계야간(Case 18) DB를 베이스 시나리오로 설정
- 합성관성 적용 대상 단지 : 육지계통 TW 해상풍력단지 중 설비용량 상위 24단지
- 풍속 : 저, 중, 고풍속을 모의하기 위해 5, 7, 10 [m/s] 선정
- 풍력발전기 이용률 : 베이스 시나리오의 재생에너지 총 발전량을 유지하면서 대상 단지에 Profile의 풍속별 이용률 적용,
합성관성 적용하지 않는 풍력발전단지는 해당 스냅샷의 기본 이용률을 적용
*해당 방식대로 이용률을 적용하면 기존 재생e 총 발전량을 유지하지 못하는 고풍속 상황이 존재 → 해당 케이스는 제외 (참고 : 부록 1)
- 합성관성 참여율 : 최대 추가출력은 기존 전체 출력의 10% → 10%의 추가출력이 0, 25, 50, 75, 100 [%] 만큼 기여하는 경우를 비교
- 사고 시나리오 : 0.05 [s] 에 신한울#1G (1521MW) 발전기 탈락, 주파수 하락 모의

시뮬레이션 시나리오 요약							
시나리오	년도	케이스	풍속	시나리오	년도	케이스	풍속
1	2030	동계주간	5	6	2036	동계주간	5
2			7	7			7
3			10	8			10
4		동계야간	5	9		5	
5			7	10		7	
_*			10	_*		10	

■ 육지계통 시뮬레이션 시나리오 요약 (단위 : MW)

- 2030년 동계주간 (Case 10) 스냅샷 별 재생e 현황

풍속	5m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	41547.8	9157.3	22735.0	73440.0
발전량	20717.4	2608.91	2864.6	26191.0
이용률 [%]	49.9	28.5	12.6	-

풍속	7m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	41547.8	9157.3	22735.0	73440.0
발전량	15715.8	2608.91	7866.3	26191.0
이용률 [%]	37.8	28.5	34.6	-
* 발전기 1개 on				

풍속	10m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	41547.8	9157.3	22735.0	73440.0
발전량	3402.5	2608.91	20279.6	26291.0
이용률 [%]	8.2	28.5	89.2	-
* 발전기 2개 on				

- 2030년 동계야간 (Case 18) 스냅샷 별 재생e 현황

풍속	5m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	41547.8	9157.3	22735.0	73440.0
발전량	10237.4	2928.50	2864.6	16030.5
이용률 [%]	24.6	32.0	12.6	-

풍속	7m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	41547.8	9157.3	22735.0	73440.0
발전량	5235.7	2928.50	7866.3	16030.5
이용률 [%]	12.6	32.0	34.6	-

풍속	10m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	41547.8	9157.3	22735.0	73440.0
발전량			20279.6	
이용률 [%]			89.2	

기존 스냅샷의 재생e 총 발전량을 초과하는 경우로 시나리오 설정 불가능 (해당 케이스 제외)

■ 육지계통 시뮬레이션 시나리오 요약 (단위 : MW)

- 2036년 동계주간 (Case 10) 스냅샷 별 재생e 현황

풍속	5m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	71408.9	9554.9	24493.2	105457.0
발전량	31387.7	2722.2	3086.1	37196.1
이용률 [%]	44.0	28.5	12.6	-

풍속	7m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	71408.9	9554.9	24493.2	105457.0
발전량	26000.0	2722.2	8474.6	37196.8
이용률 [%]	36.4	28.5	34.6	-

풍속	10m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	71408.9	9554.9	24493.2	105457.0
발전량	12626.0	2722.2	21847.9	37196.1
이용률 [%]	17.7	28.5	89.2	-

*서인ST#1 In-Service

*장문GT#1,2 In-Service

- 2036년 동계야간 (Case 18) 스냅샷 별 재생e 현황

풍속	5m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	71408.9	9554.9	24493.2	105457.0
발전량	10670.4	3055.66	3086.1	16812.20
이용률 [%]	14.9	32.0	12.6	-

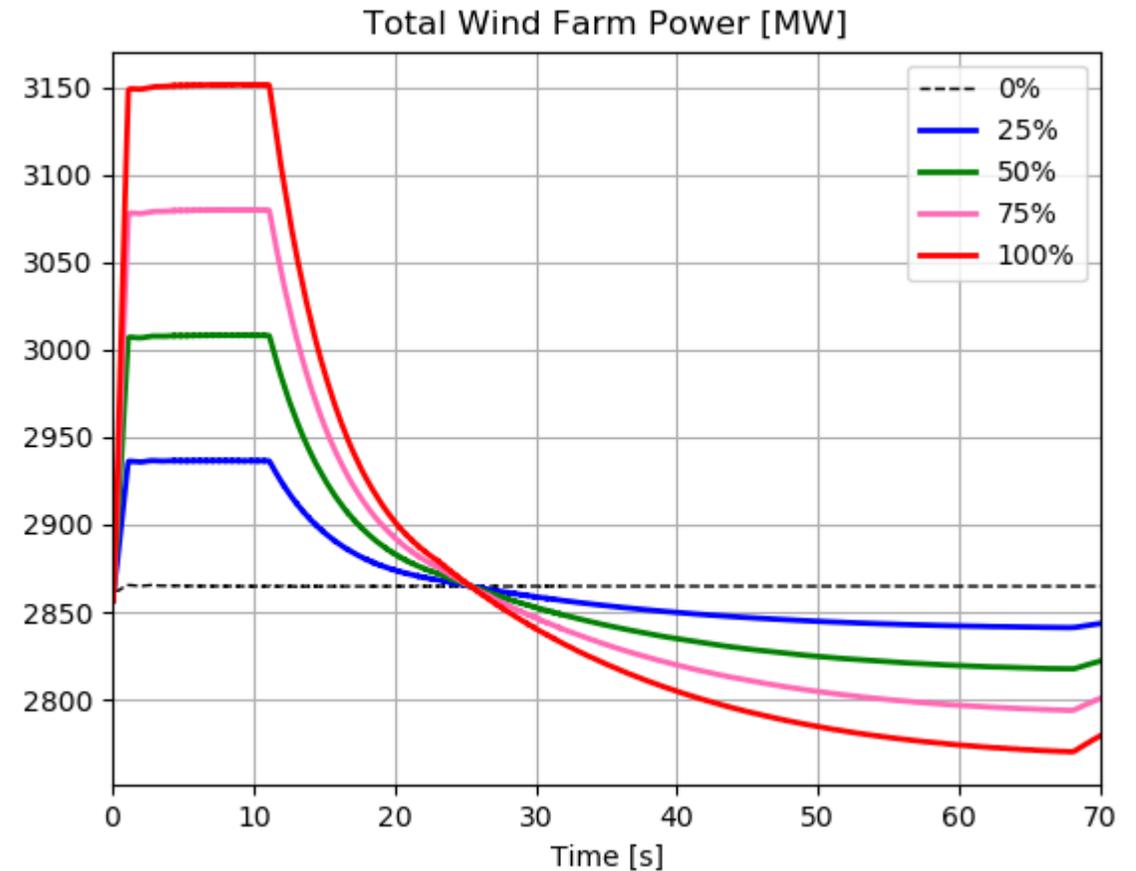
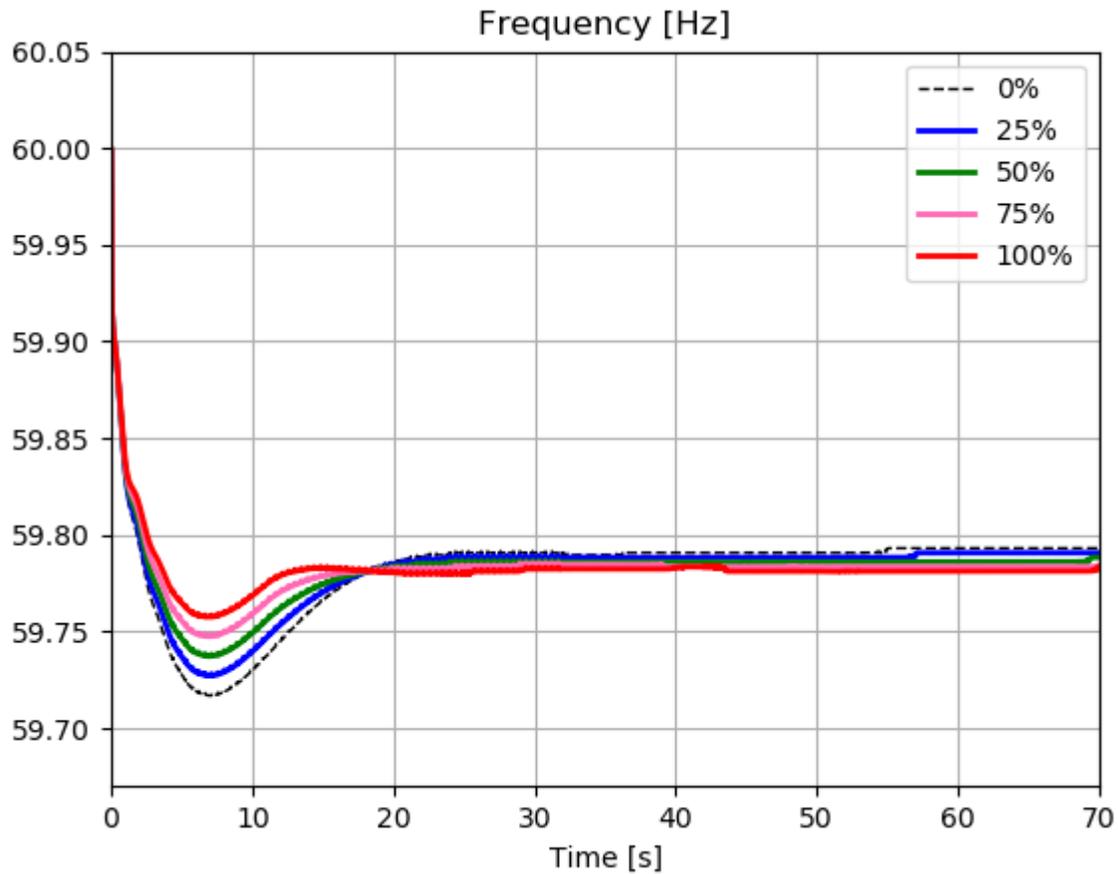
풍속	7m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	71408.9	9554.9	24493.2	105457.0
발전량	5281.9	3055.64	8474.6	16812.2
이용률 [%]	7.4	32.0	34.6	-

풍속	10m/s			합계
	재생e	PV	WT	
			그외	
설비용량	71408.9	9554.9	24493.2	105457.0
발전량			21847.94	
이용률 [%]			89.2	

기존 스냅샷의 재생e 총 발전량을 초과하는 경우로 시나리오 설정 불가능 (해당 케이스 제외)

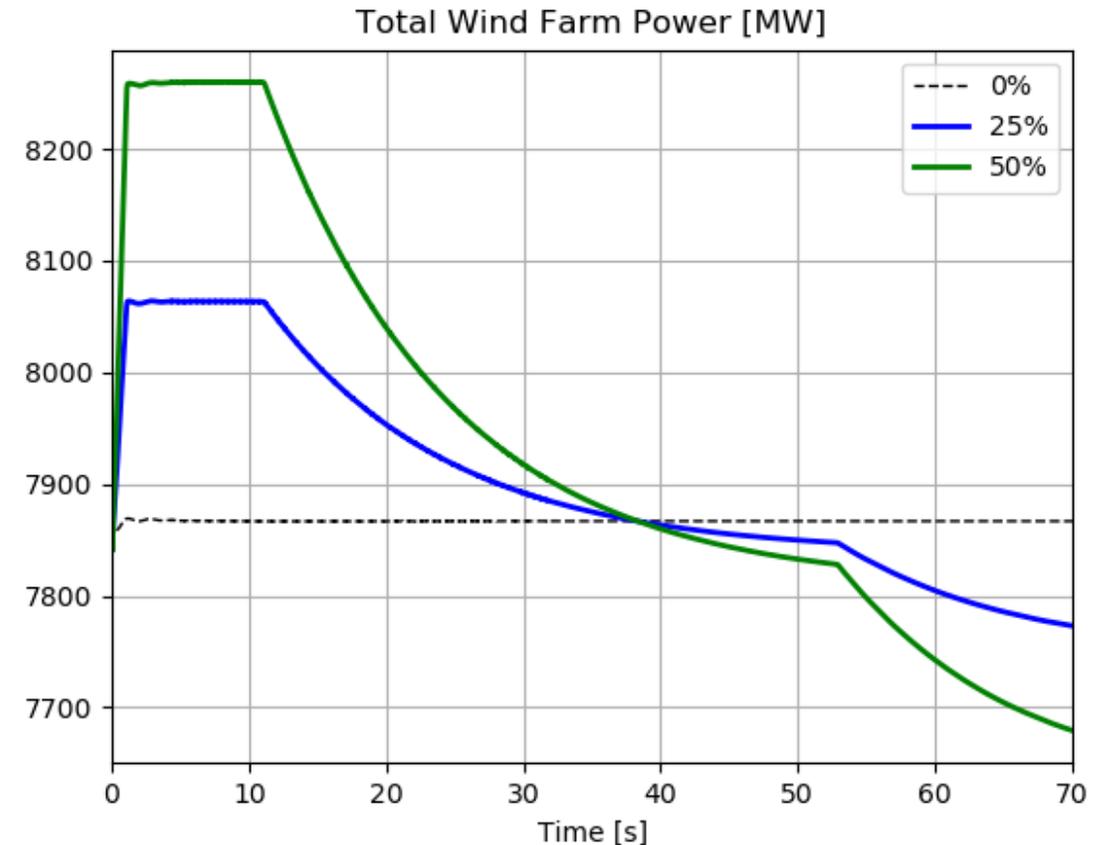
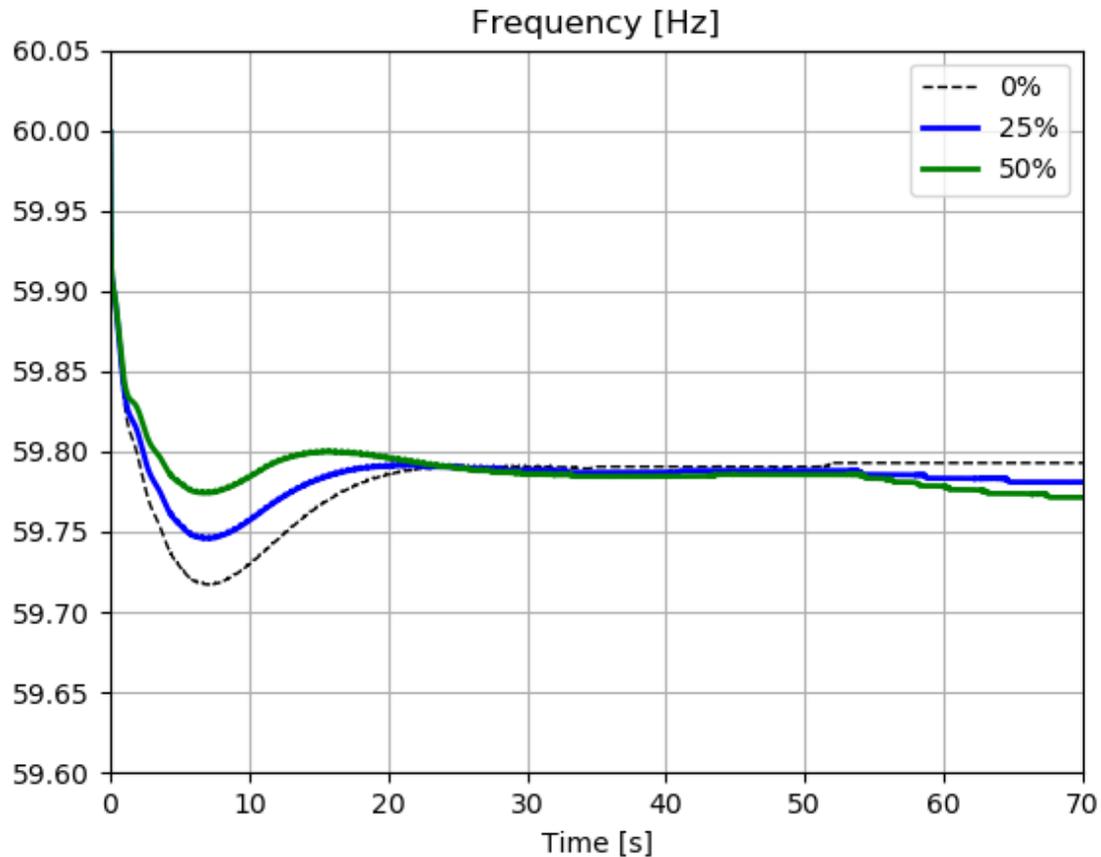
육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2030년 동계주간(Case 10) - 5m/s



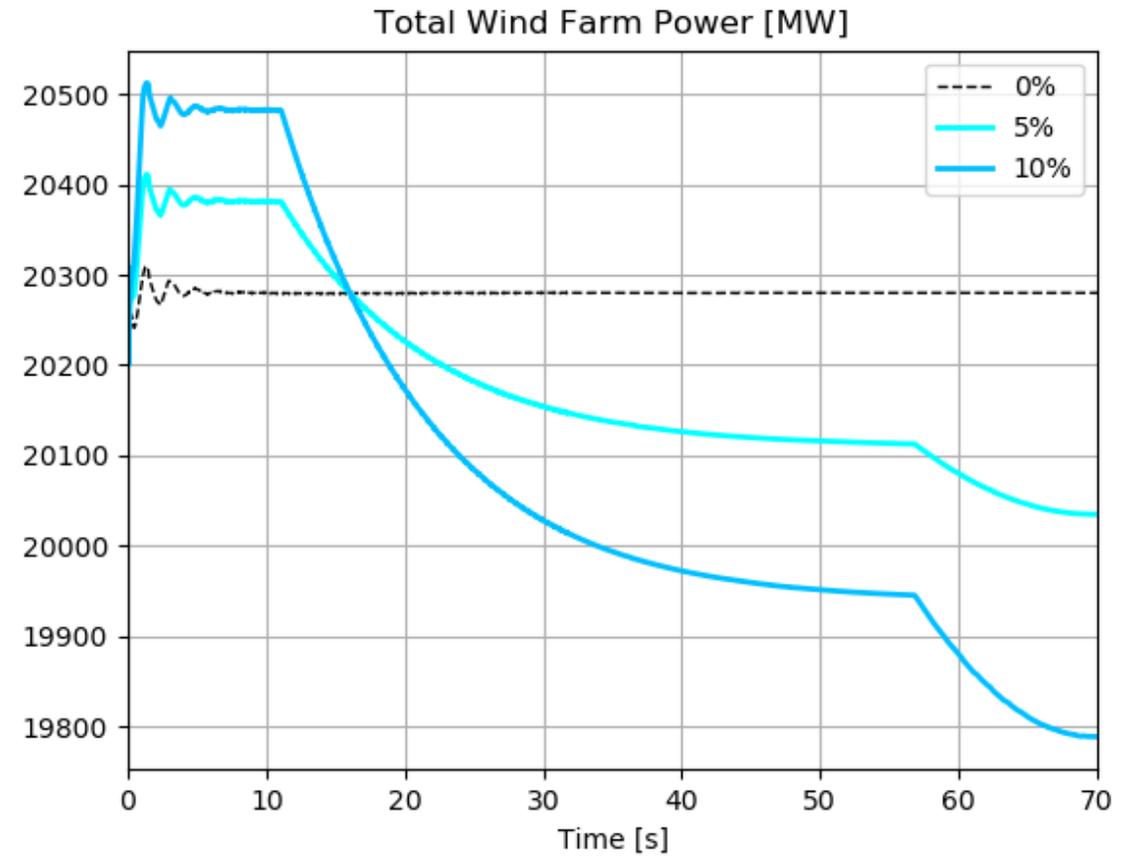
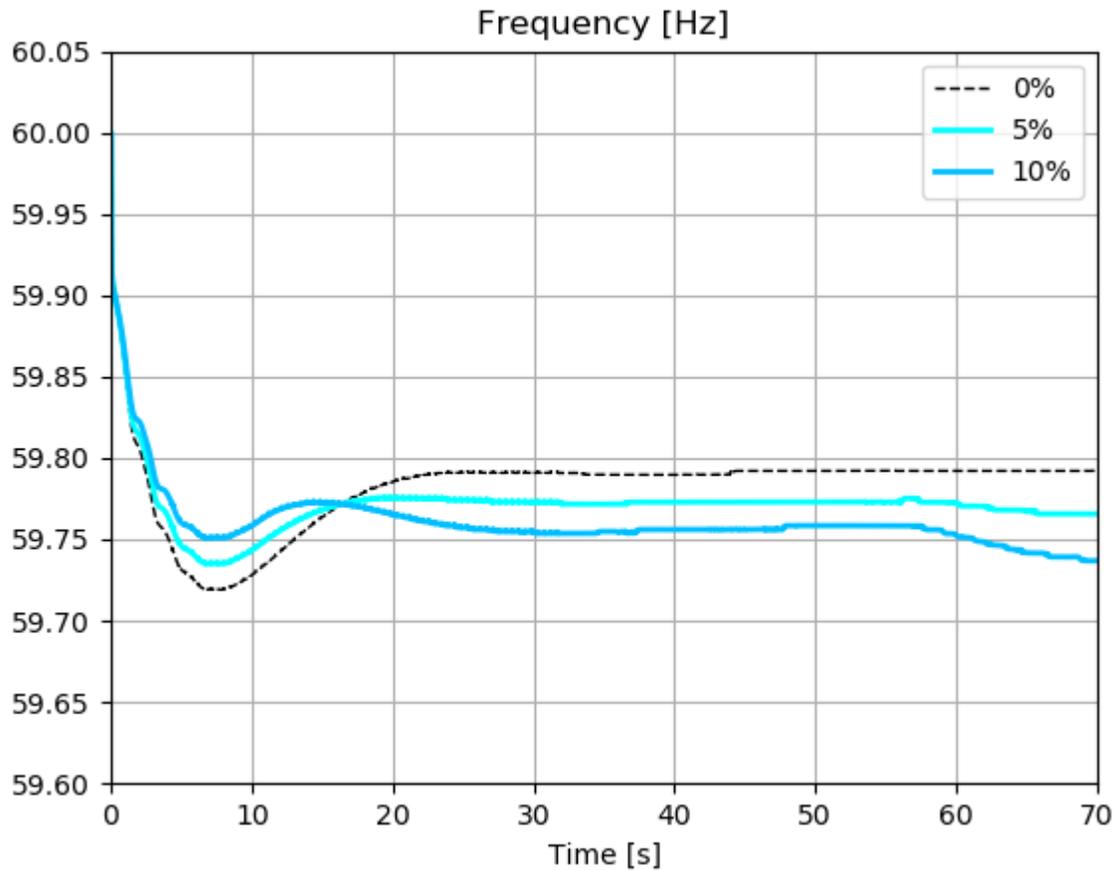
■ 육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2030년 동계주간(Case 10) - 7m/s



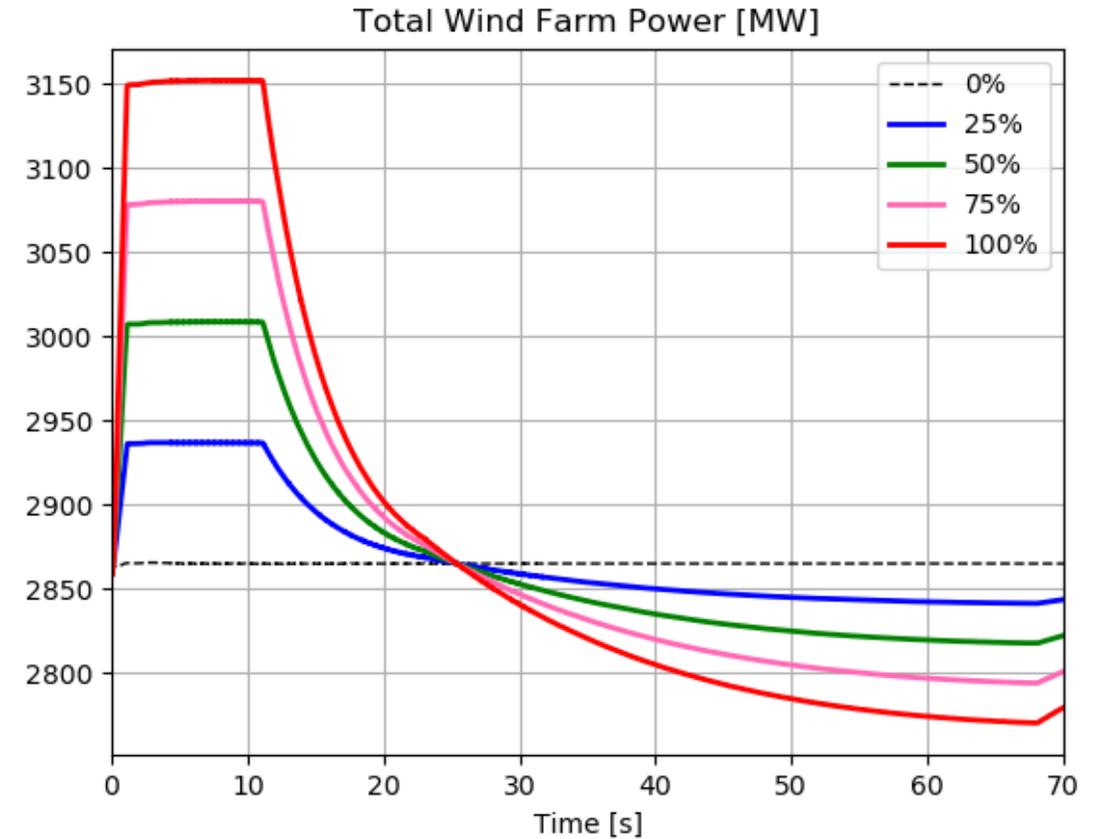
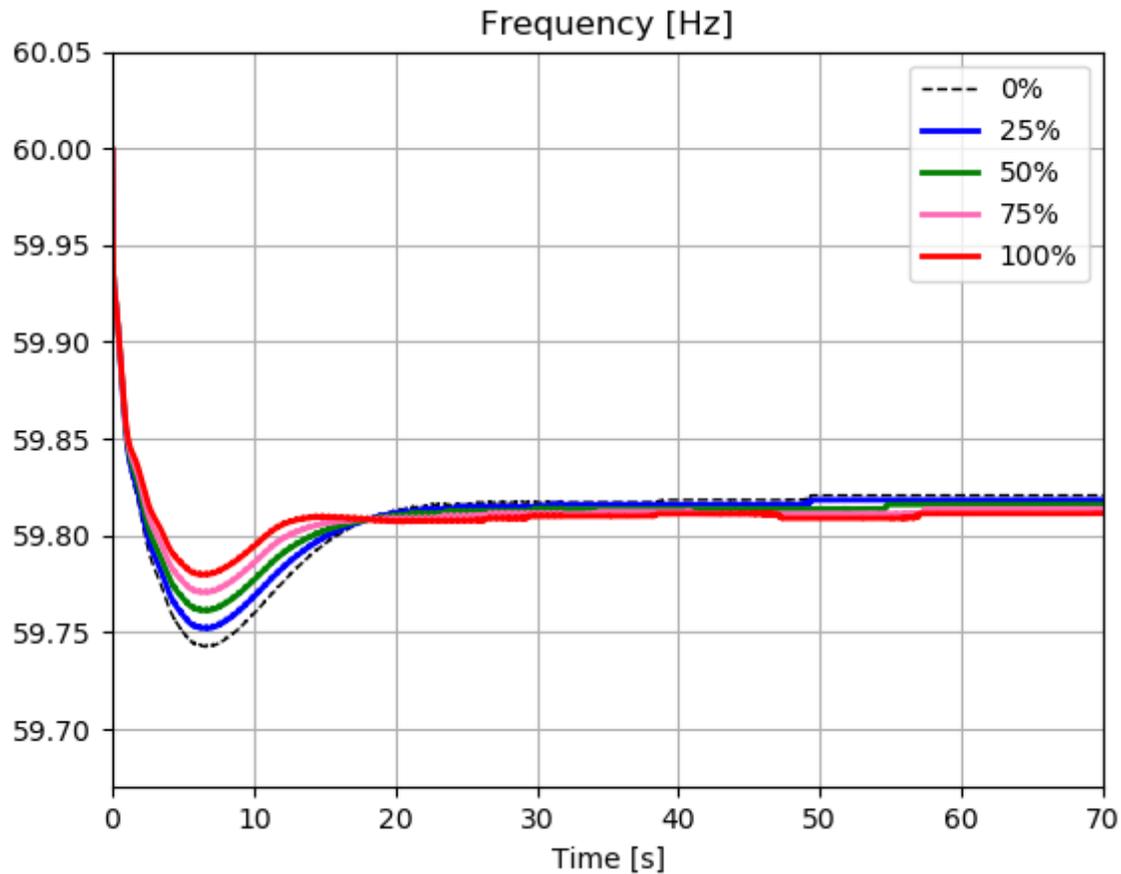
육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2030년 동계주간(Case 10) - 10m/s



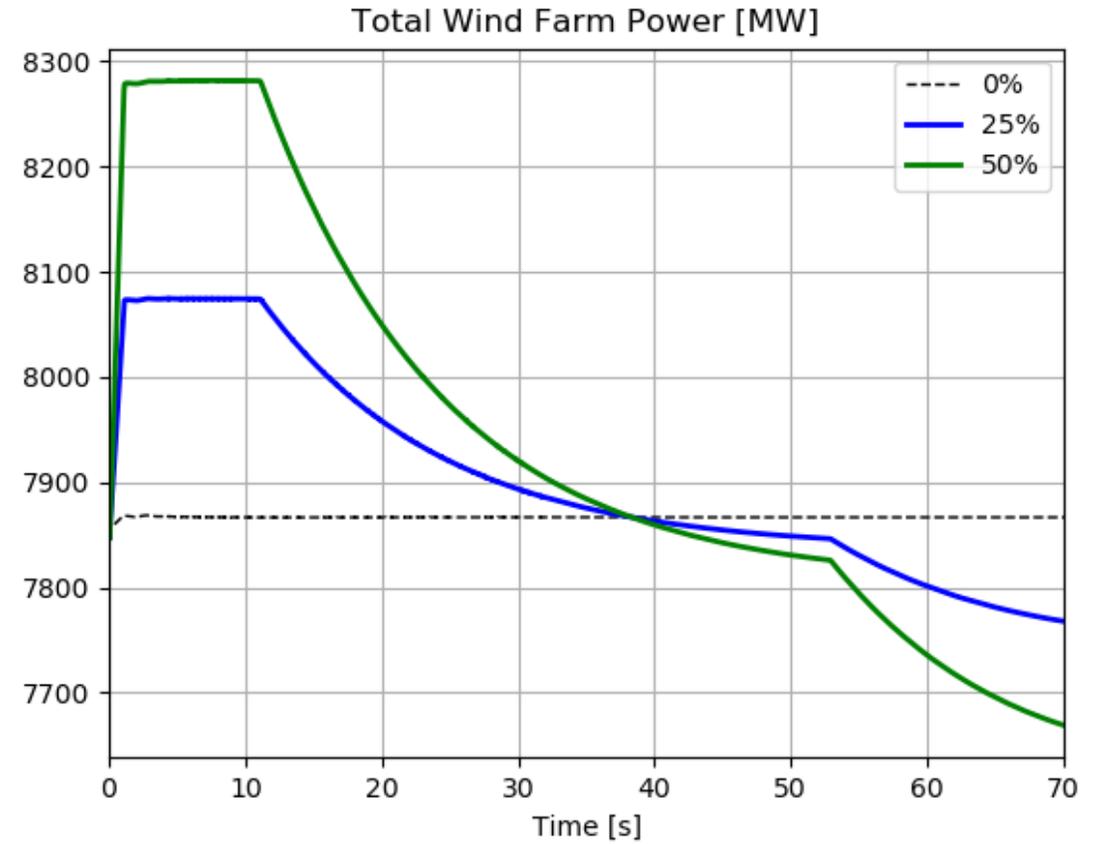
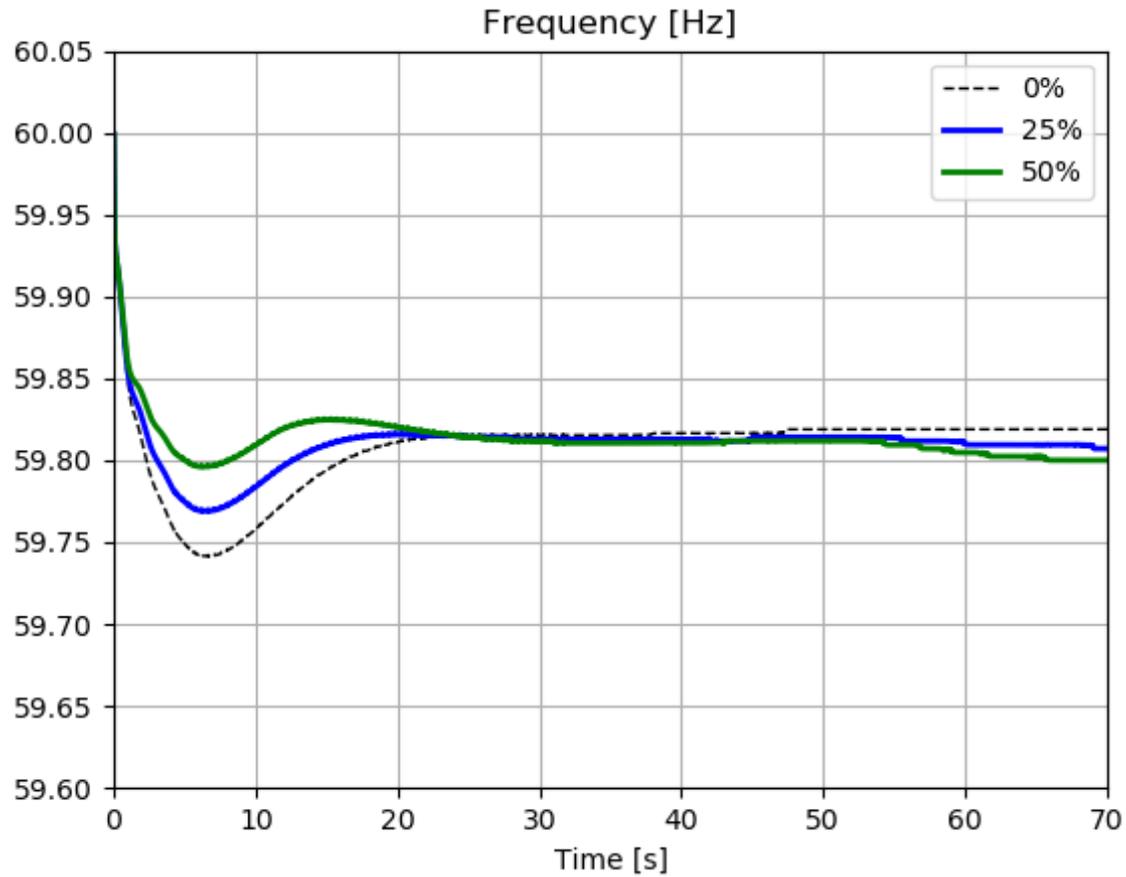
육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2030년 동계야간(Case 18) - 5m/s



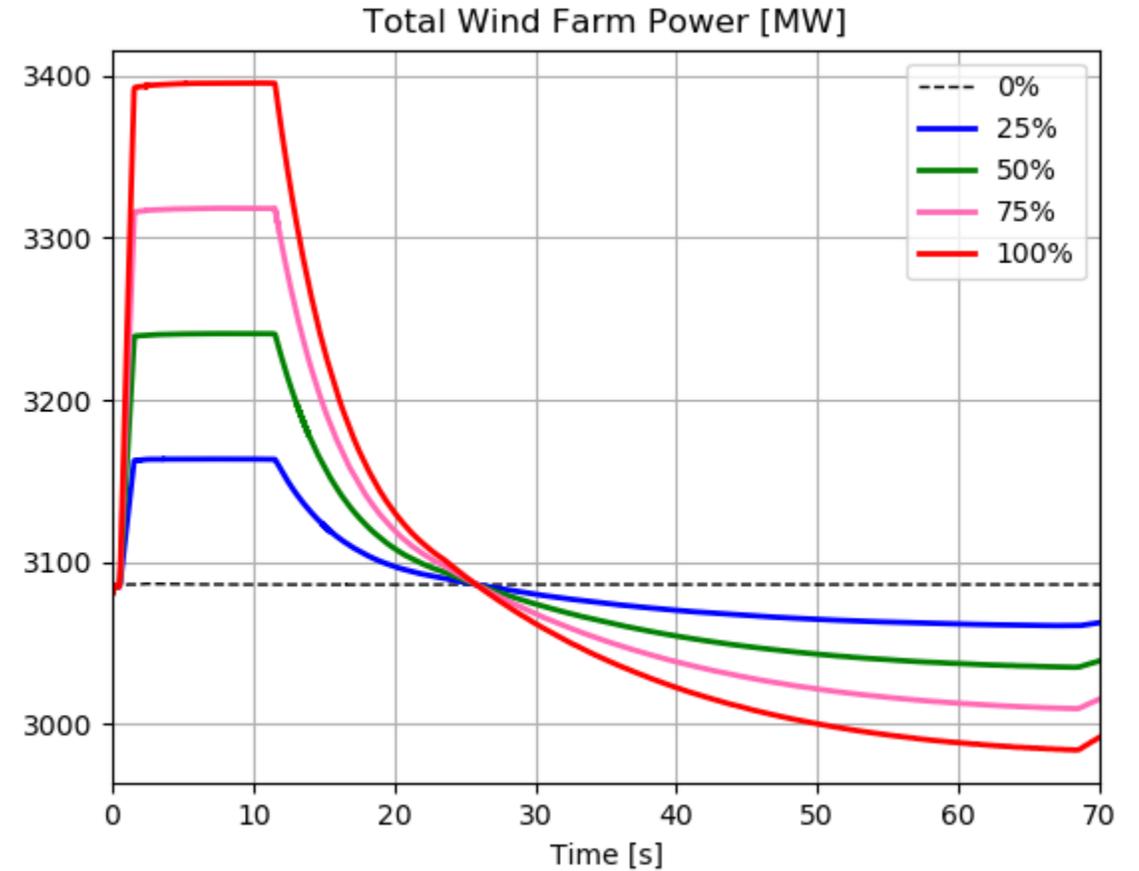
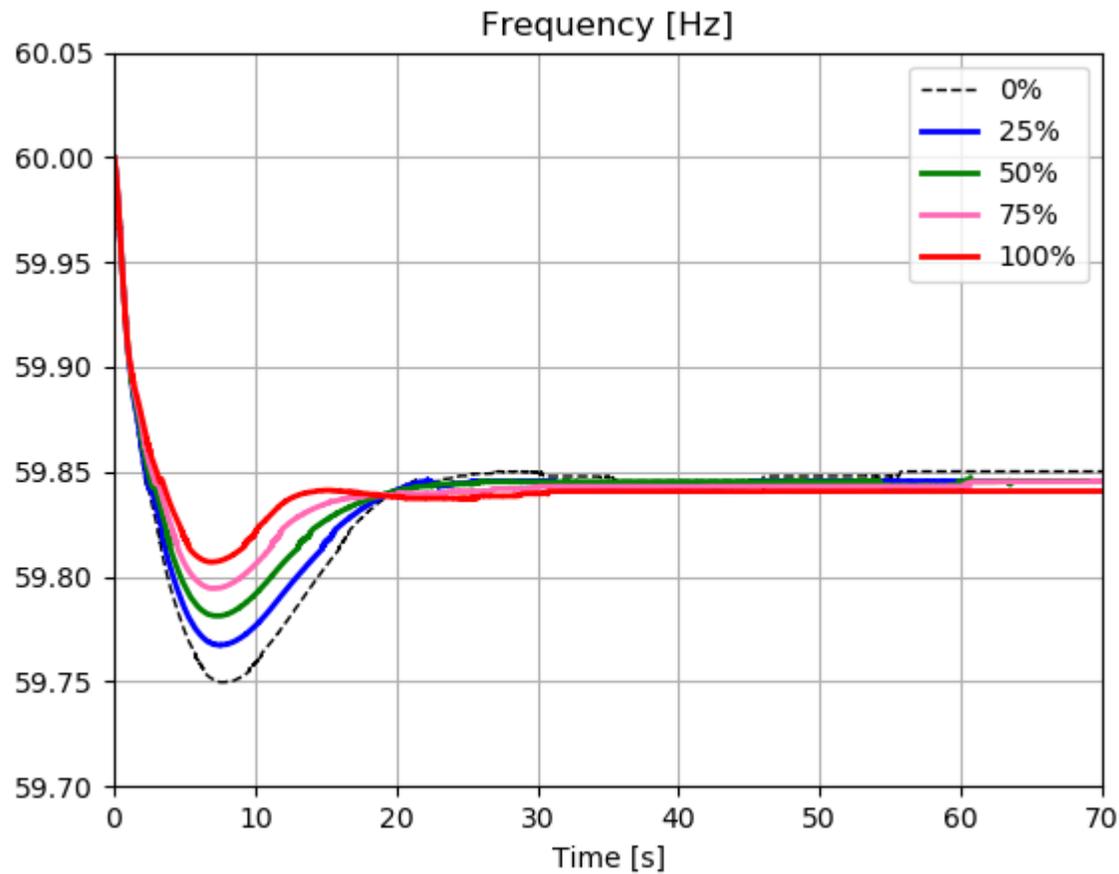
육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2030년 동계야간(Case 18) - 7m/s



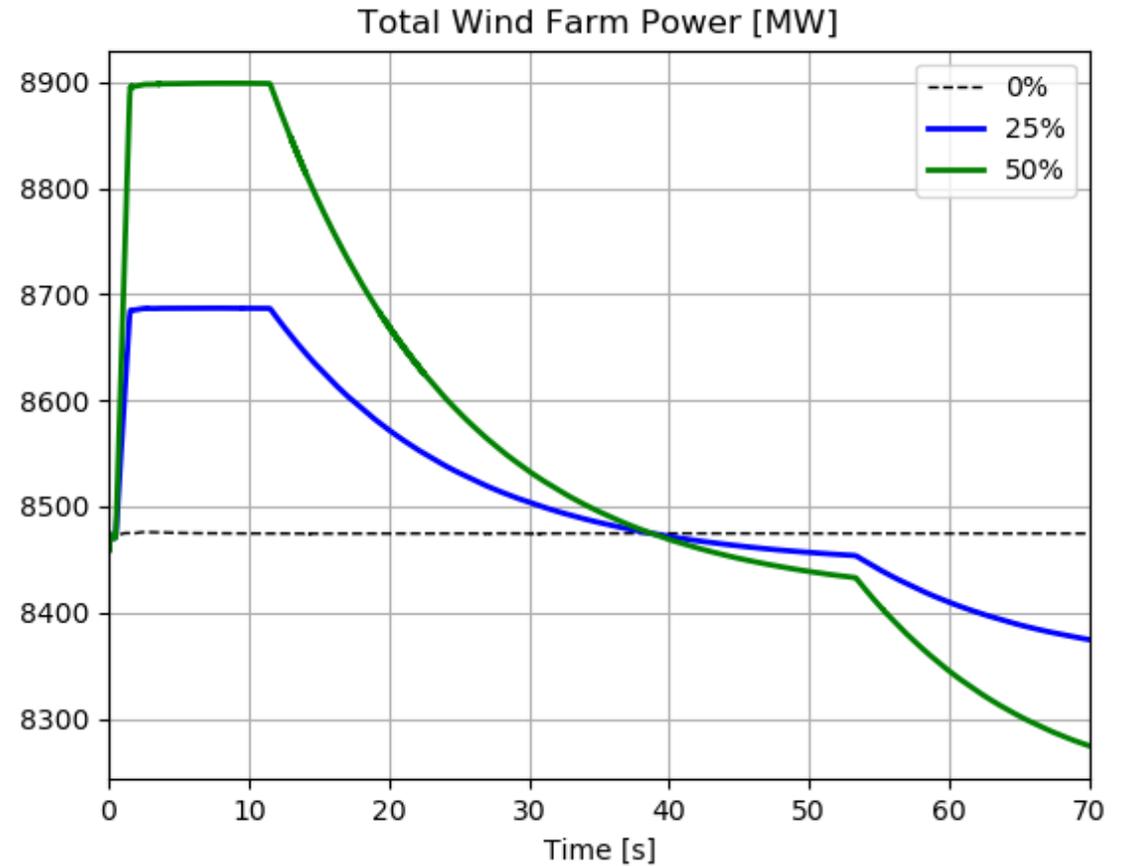
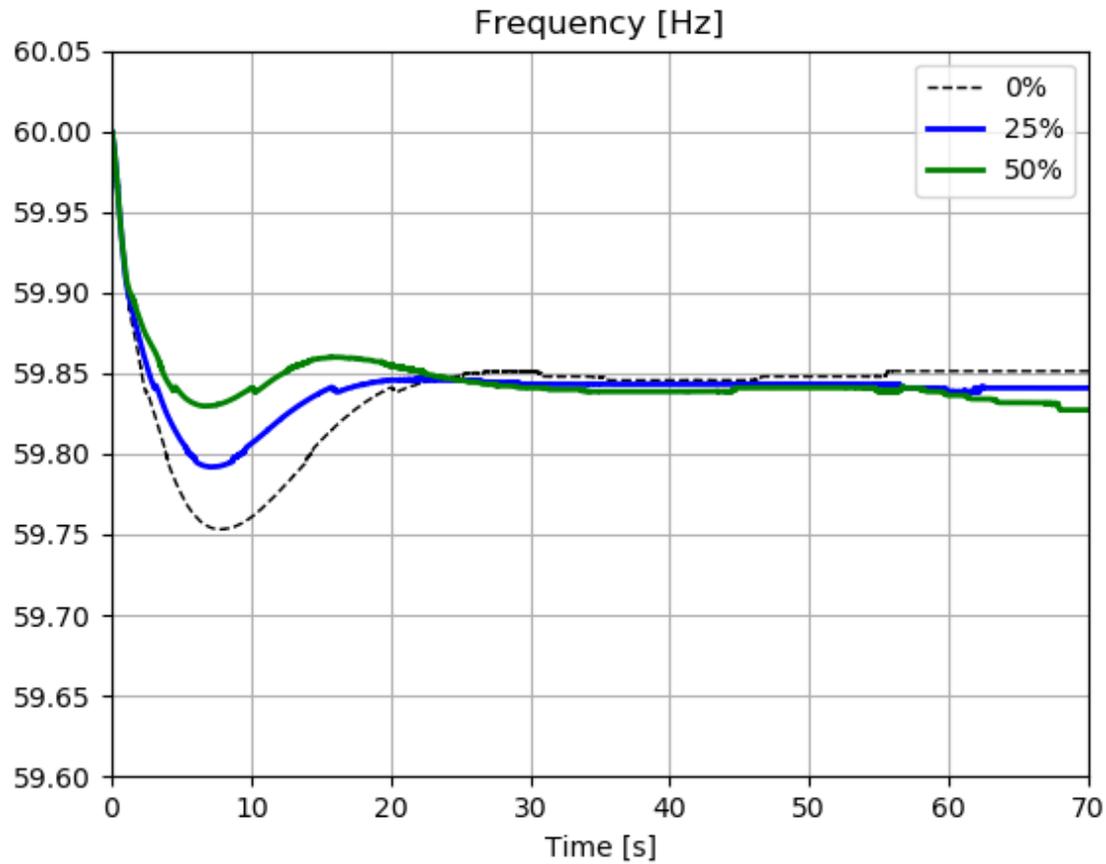
■ 육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2036년 동계주간(Case 10) - 5m/s



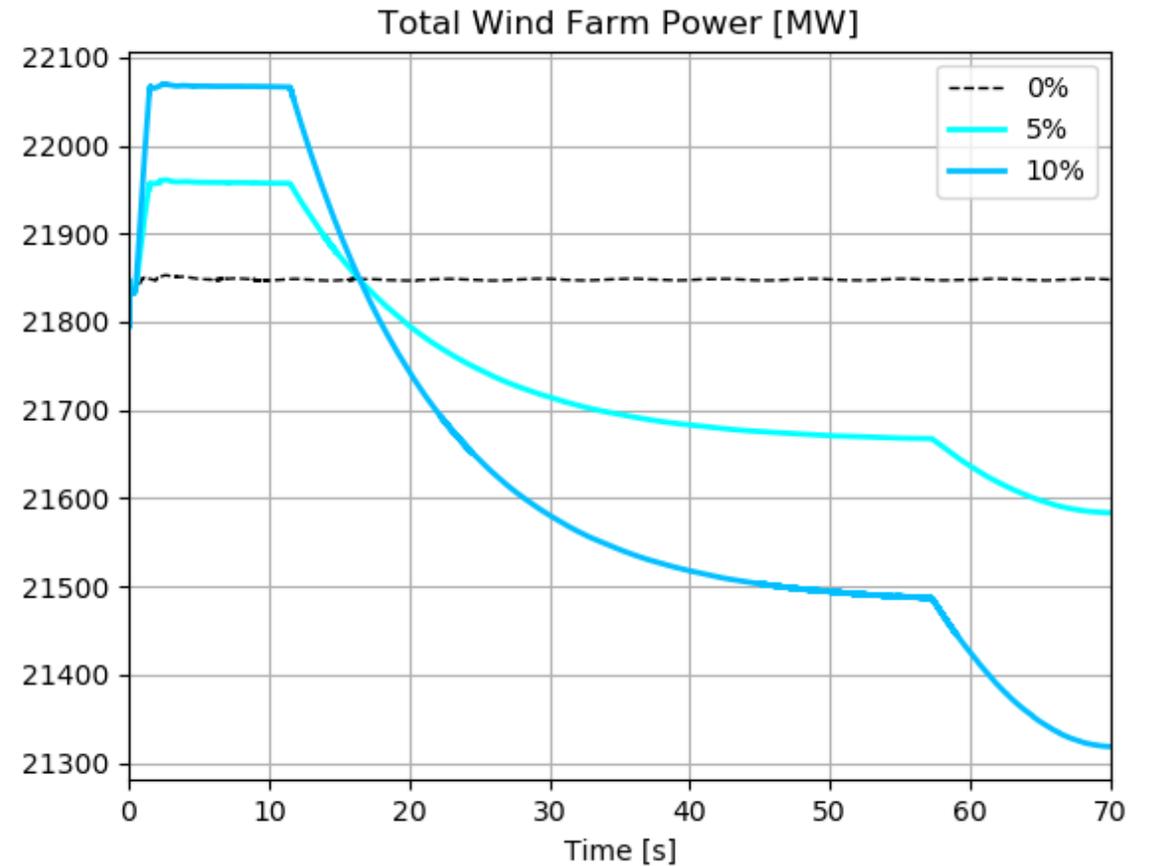
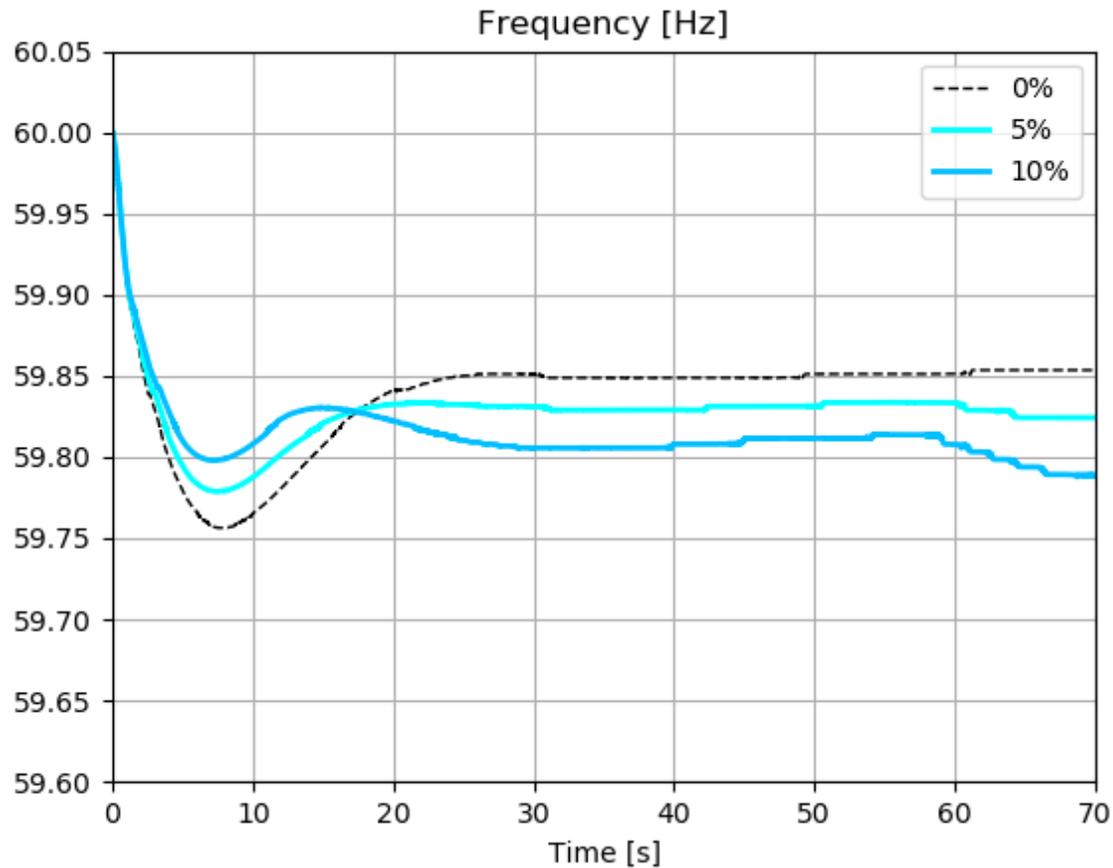
■ 육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2036년 동계주간(Case 10) - 7m/s



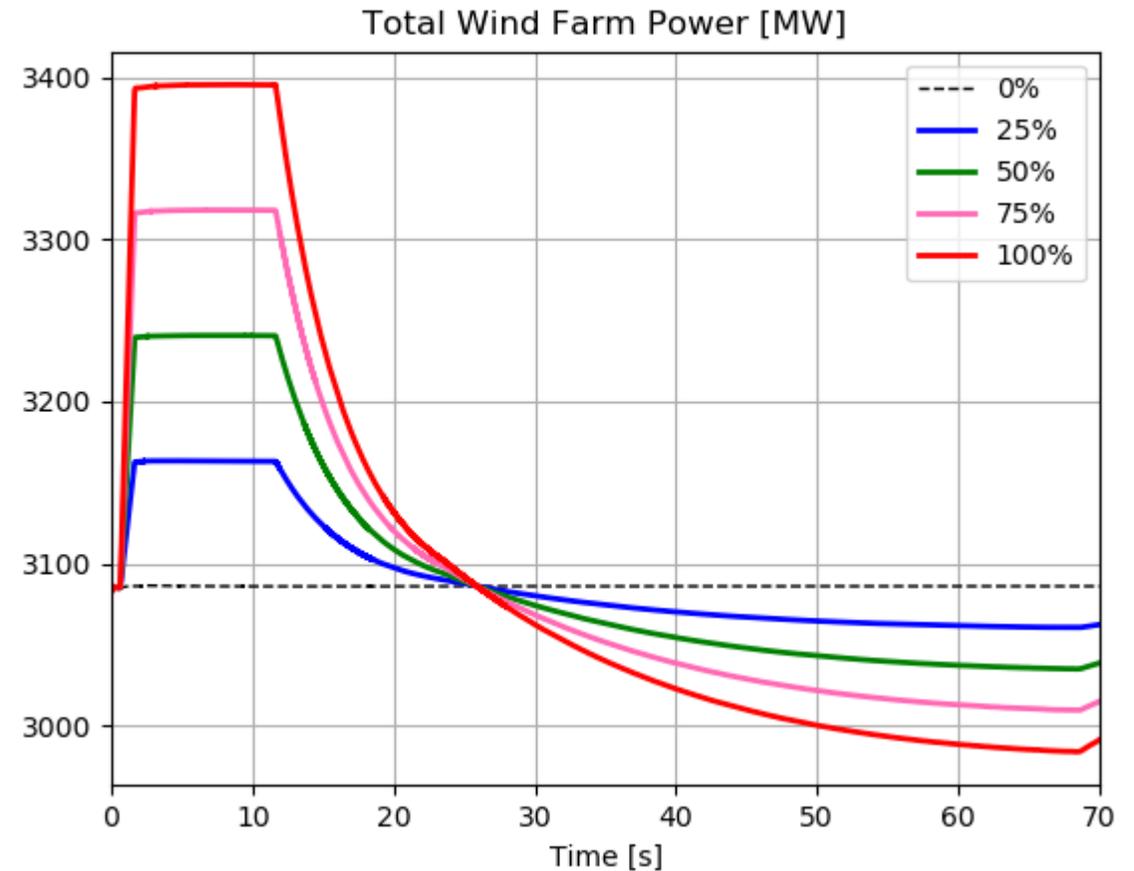
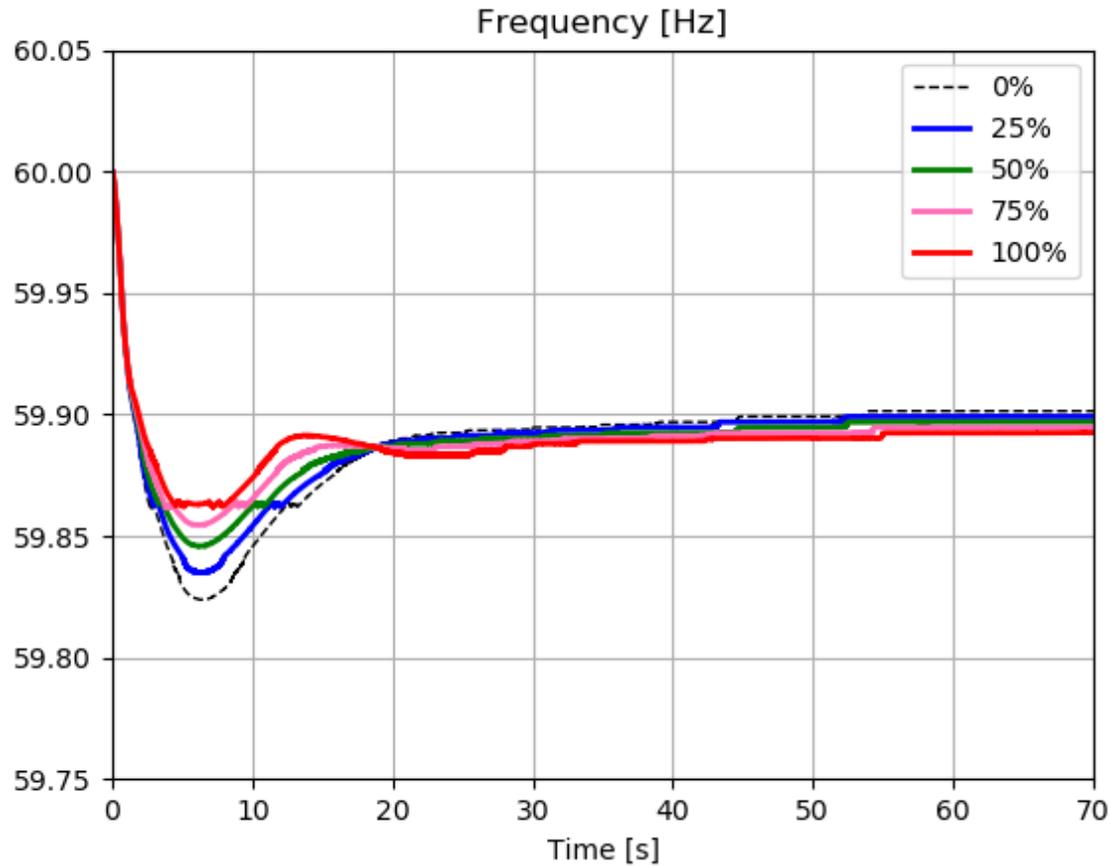
■ 육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2036년 동계주간(Case 10) - 10m/s



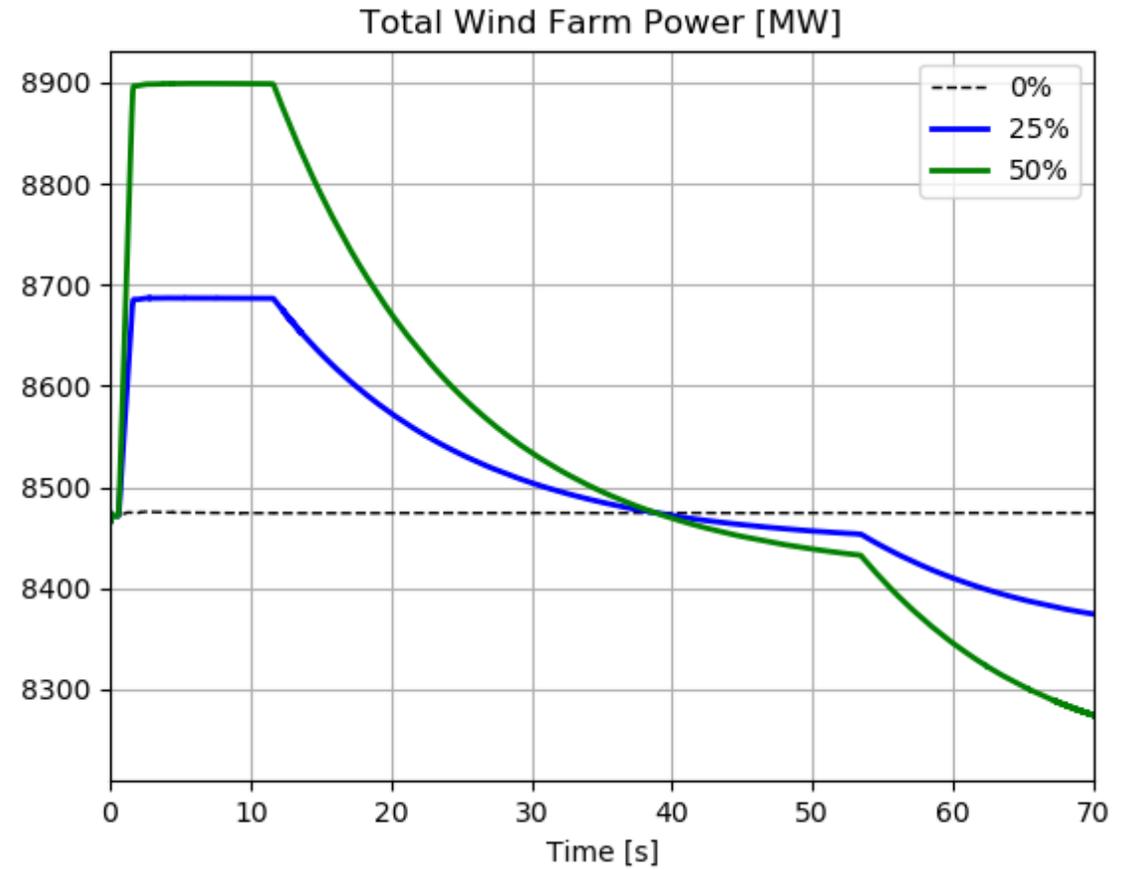
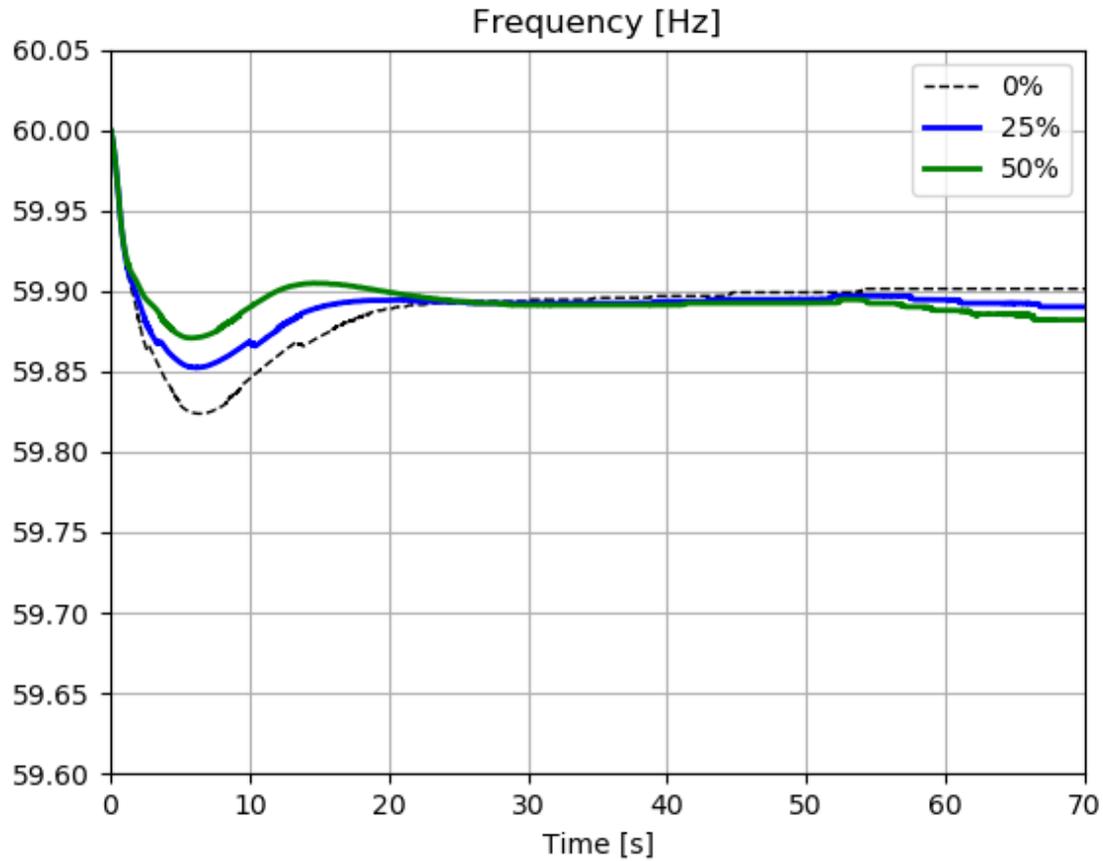
■ 육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

• 2036년 동계야간(Case 18) - 5m/s



■ 육지계통 합성관성 시뮬레이션 결과

- 2036년 동계야간(Case 18) - 7m/s





Thank You

Contact : myoon@kw.ac.kr