Distributed Power System Research Center

그리드포밍 인버터 기반 마이크로그리드 제어 및 운영기술

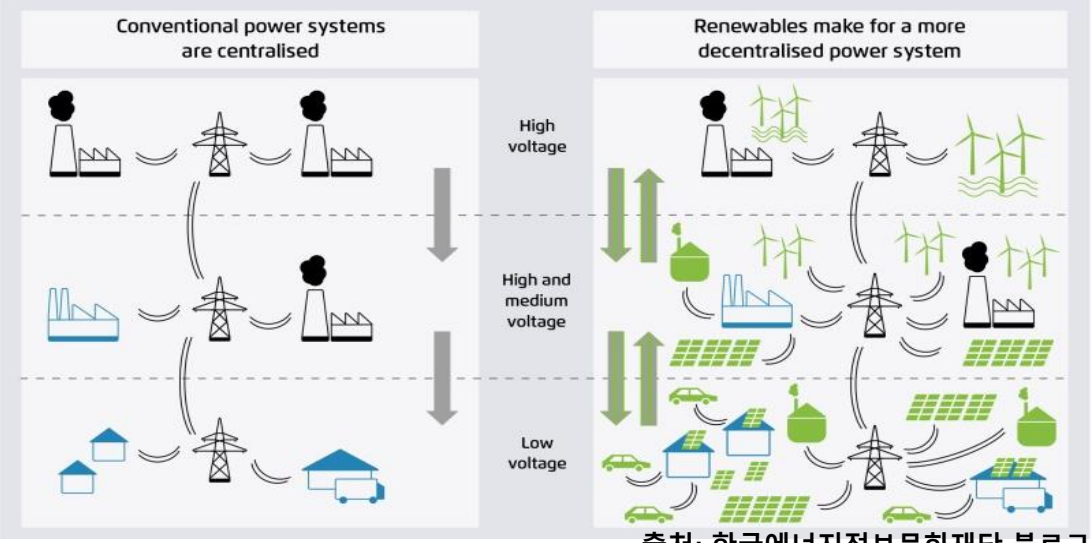
2023.07.05

한국전기연구원
분산전력시스템 연구센터
유형준 선임연구원

서론(1)

*IBR: Inverter-Based Resources

전력망 진화 방향



출처: 한국에너지정보문화재단 블로그

Power System

- **Past: SG dominated system**
- **Present: Increase penetration of IBRs**
- **Future: IBR dominated system**

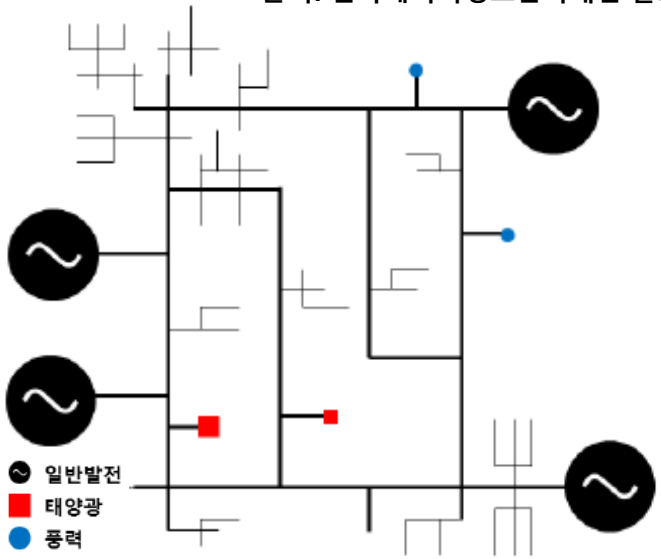
System needs from IBR

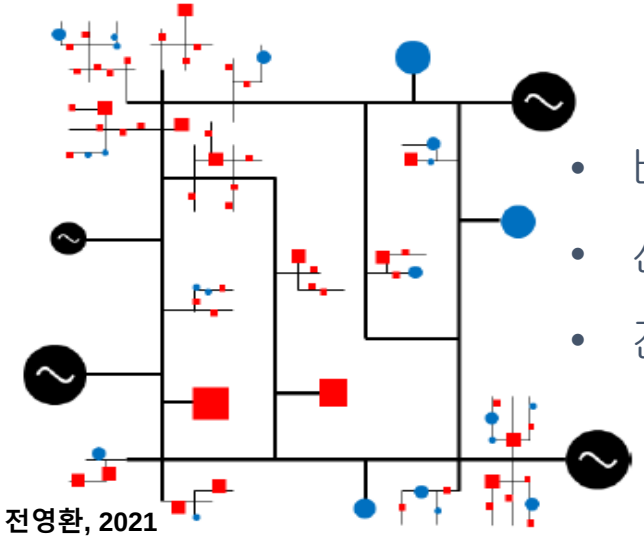
- **power factor, minimal fault ride-through…**
- **Automatic voltage control, frequency response, V/F ride-through**
- **Without relying on SGs, provide the above services and more….**

Inverter dominated system으로의 변화

IBR은 그리드의 신뢰성 보장을 위해 그리드 서비스를 제공
점진적으로 SG를 대체

- 송전시스템
- 대형화력기
- 동기발전기

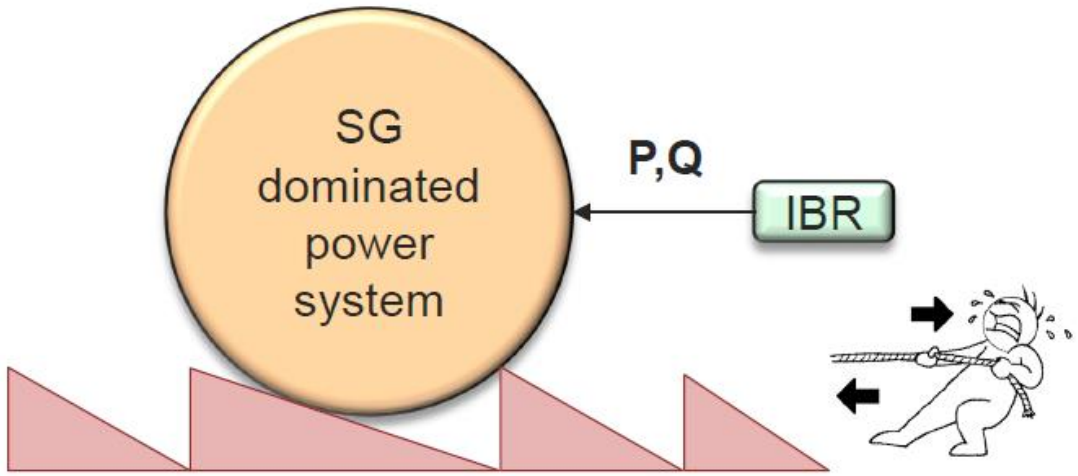


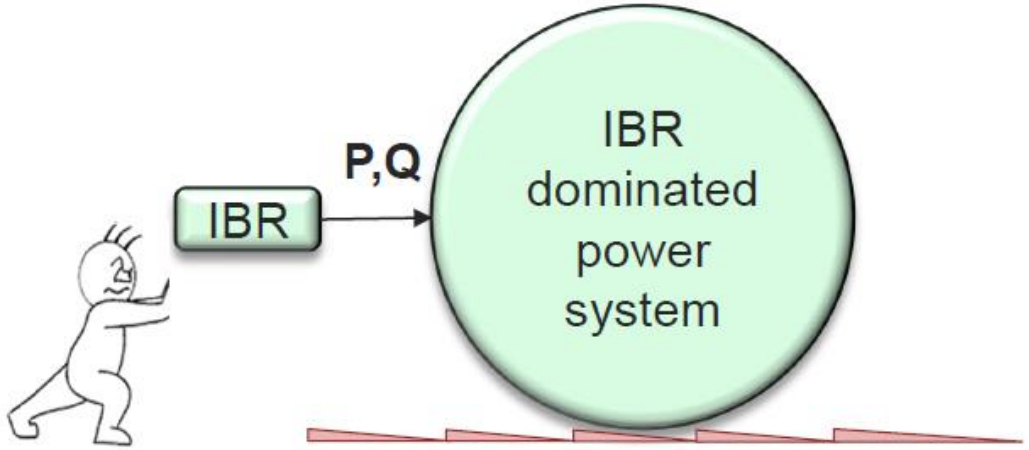


- 배전시스템
- 신재생전원
- 전력변환장치

출처: 재생에너지와 전력산업 기능분리 필요성, 홍익대, 전영환, 2021

서론(2)





- 과거의 IBR은 Stiff 전력시스템에 접속되는 것을 고려하여 제어기가 설계됨
  - IBR의 동특성이 Stiff 전력시스템에 거의 영향을 미치지 않음
  - IBR은 접속되어 있는 전력시스템의 변화에 영향을 받음

- IBR 접속량이 많은 전력시스템
  - 시스템의 제어가 용이함
  - IBR의 동특성이 전력시스템에 미치는 영향이 큼
  - IBR의 제어성능의 안정성이 보장되어야 함

[Ref] A. Huque and E. Farantatos, “Grid Forming Inverters: EPRI Tutorial,” 2020.

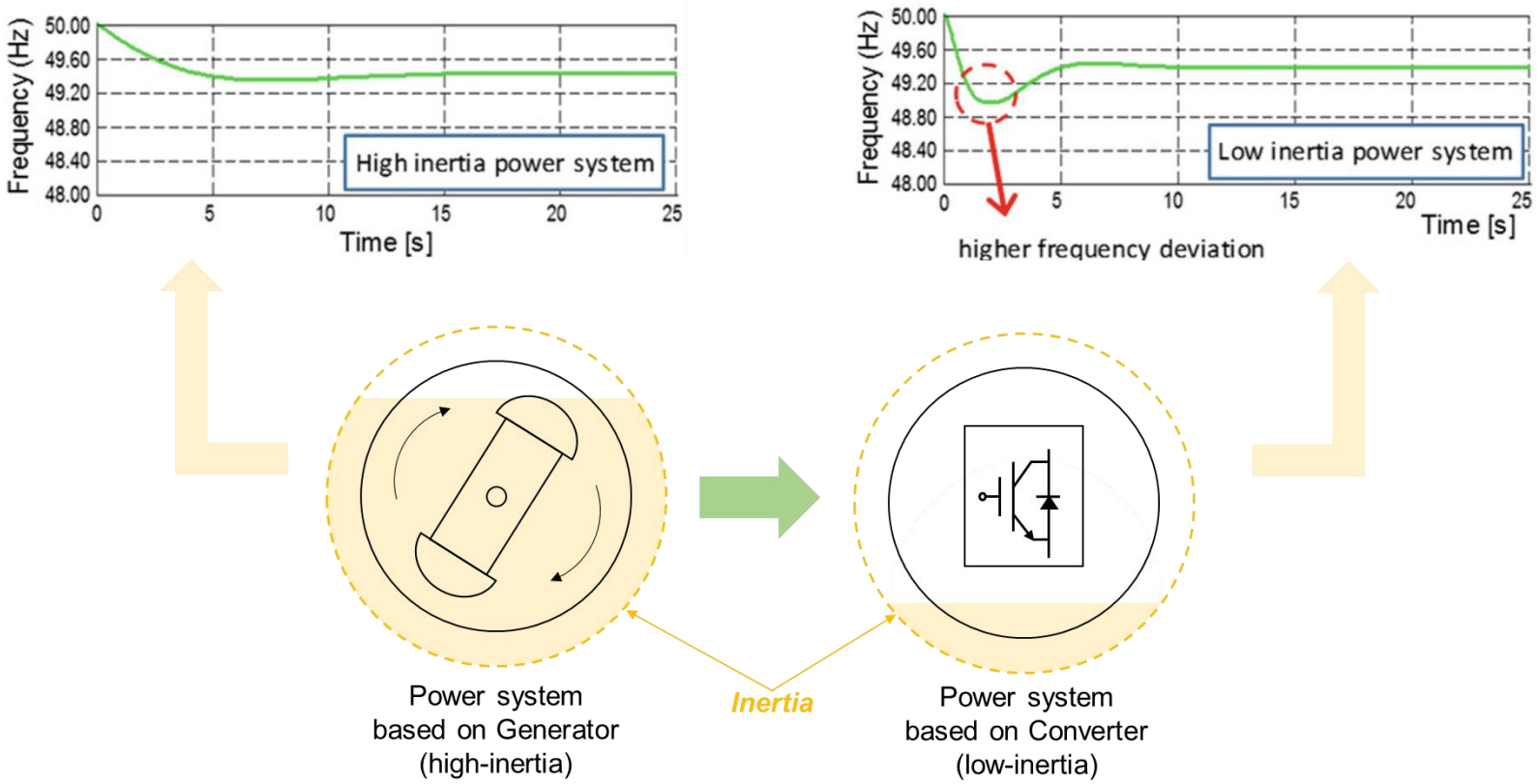
IBR 보급율 증대에 따른 주파수 문제

관성에너지 제공 기기 감소

수급분균형에 따른 주파수 변화에 대응하는 시간 감소

UFLS 동작 활성화 확률 증가

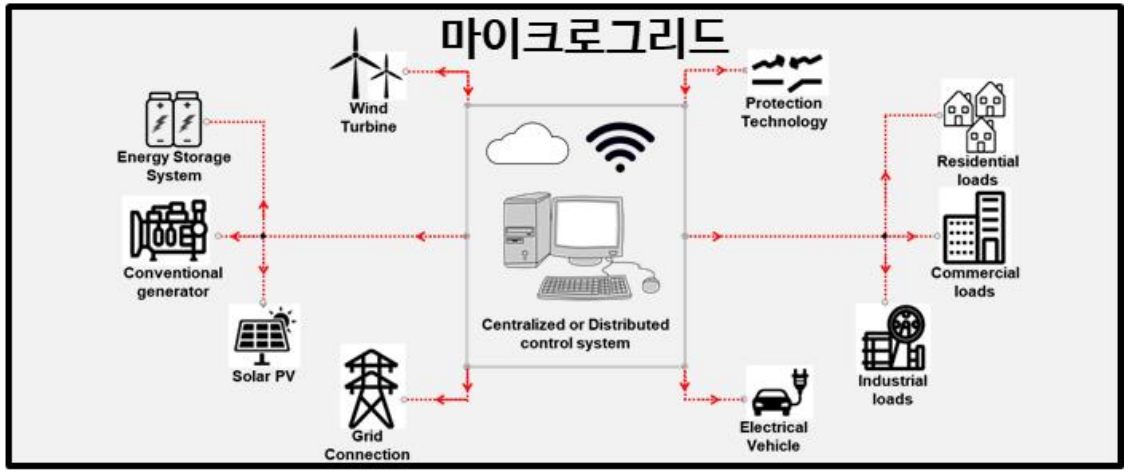
보호계전기 동작으로 인한 계단식 정전 가능성 증가



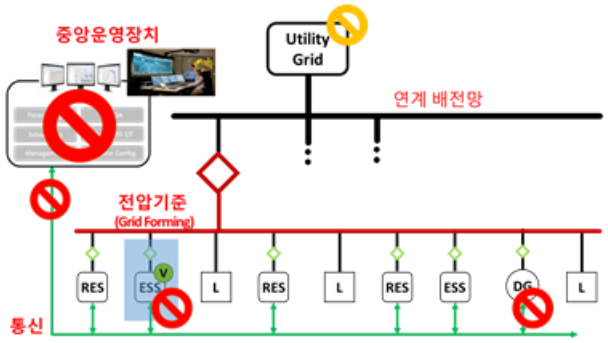
- ✓ 신재생전원 보급률이 높은 Ireland, Texas, and South Australia의 경우 하루 중 특정 시간동안 주파수 문제 발생
- ✓ Australia, Hawaii와 같은 소규모 섬 전력 시스템은 이미 저 관성 관련 문제에 직면해 있음

연구 필요성

재생전원 수용율 및 복원력 향상을 위한
분산전원의 계통유지 제어 및 분산운영 기술 개발

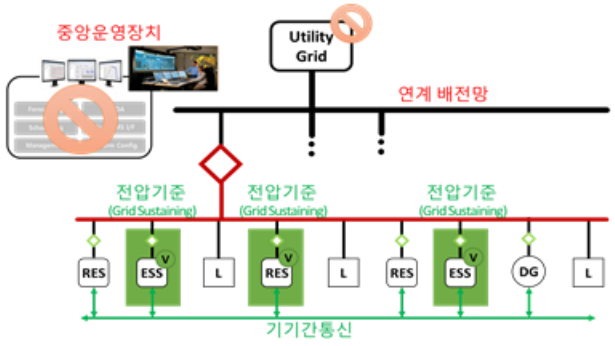


기존 마이크로그리드



- EMS에 의한 중앙집중제어, 운영
- 전류제어기반 분산전원 연계
- 단일 기준전원에 의한 독립운전
- 시스템 보완 및 확장에 제한
- 통신 및 마이크로그리드내 사고에 취약

차세대 마이크로그리드

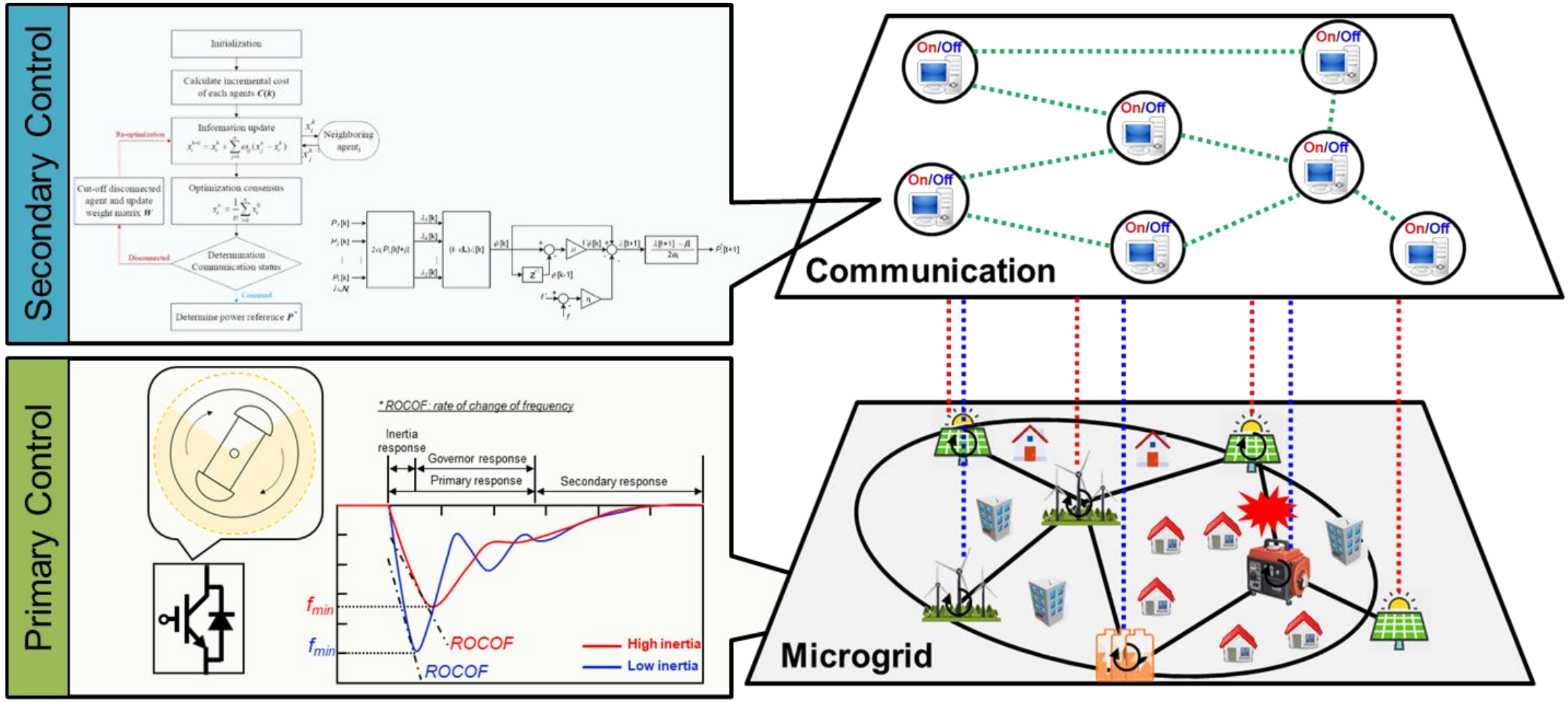


- 다수의 운영 주체 분산 제어, 운영
- 전압제어기반 분산전원 연계
- 다수 기준전원에 의한 독립운전
- 시스템 보완 및 확장이 쉬움 (plug & play)
- 통신 및 마이크로그리드내 사고에 강인

연구 내용

❖ 그리드포밍 기반 가상관성 컨버터 제어기술 개발 – <u>신재생수용율 향상(주파수 안정도 향상)</u>

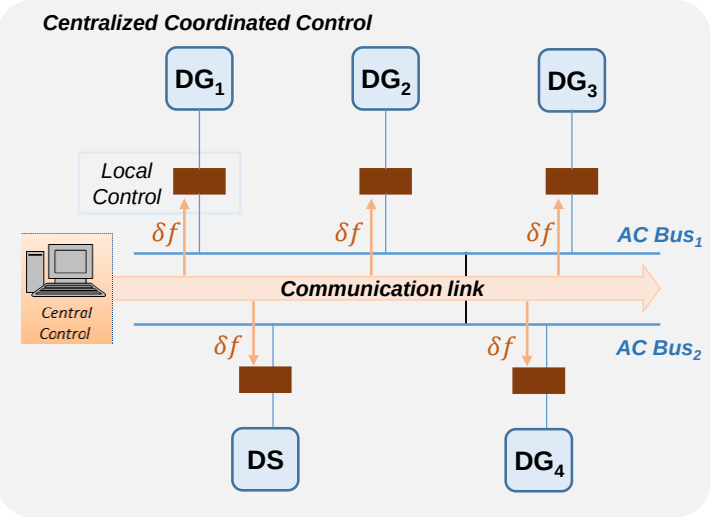
❖ 분산운영 기술 개발 – <u>중앙 EMS 없는 운영시스템</u>



마이크로그리드 운영

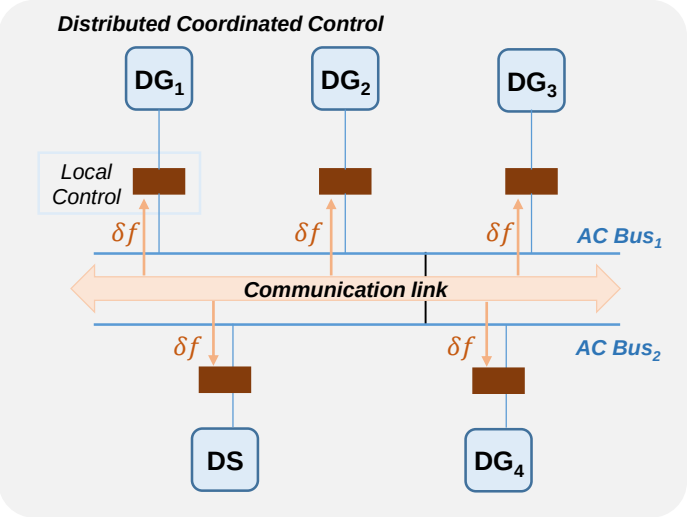
❖ 중앙집중식 운영

- 단일 EMS를 이용하여 시스템 내 요소의 모든 정보를 받아 지령치 생성 및 전송
- High bandwidth 통신 필요
- 단일 통신 고장에 취약함



❖ 분산운영

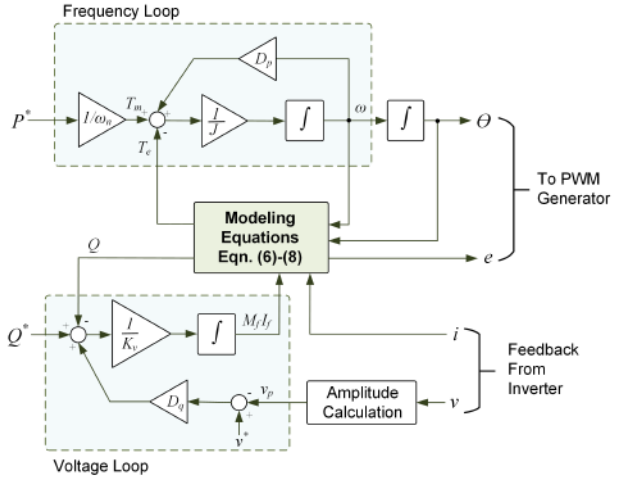
- 시스템 내 요소간 통신을 이용하여 필요정보만을 주고 받으며 지령치 자체 생성
- Low bandwidth 통신사용가능
- 도서지역 등 소규모 전력시스템에 사용 가능(경제성 확보)
- 자연재해, 전쟁 등 큰 재난 발생 시 resiliency 확보 가능



관성제어(virtual inertia) 기술

❖ 시스템의 주파수 안정도를 향상시키기 위하여 전력변환장치 기반 분산전원에 관성 특성을 반영한 제어 기법

- Synchronous Generator model based(Synchronverters)
  - 동기기의 다이나믹을 매우 유사하게 모의 가능
  - 파라미터의 정확성에 따른 시스템 불안정성 내제
- Swing Equation based(Ise Lab's Topology)
  - 상대적으로 모델링이 간편함
  - 출력전력과 주파수에 진동발생
- Frequency-power response based(VSYNC's Topology)
  - 전류원으로 동작
  - PLL 특성에 따라 시스템 안정도 영향



<Synchronous Generator model based>

$$P_{VSG} = K_D \Delta\omega + K_I \frac{d\Delta\omega}{dt}$$

$$I_d^* = \frac{2}{3}\left(\frac{V_d P_{VSG} - V_q Q}{V_d^2 + V_q^2}\right)$$

<Frequency-power response based>

$$P_{in} - P_{out} = J\omega_m\left(\frac{d\omega_m}{dt}\right) + D_p \Delta\omega$$

$$\Delta\omega = \omega_m - \omega_g$$

<Swing Equation based>

Ref.[1]: U. Tamrakar, D. Shreshta, M. Maharjan, B. P. Bhattarai, T. M. Hansen, and R. Tonkoski, "Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions," Energies, 2017.

연구개발내용 –그리드포밍기반 가상관성기술

DC 전원 공급 확보 가능 전원
(배터리, 연료전지 등)

DC 전원 공급이 불확실한 전원
(태양광, 풍력발전)

그리드포밍 인버터 제어기술 + **스윙방정식**

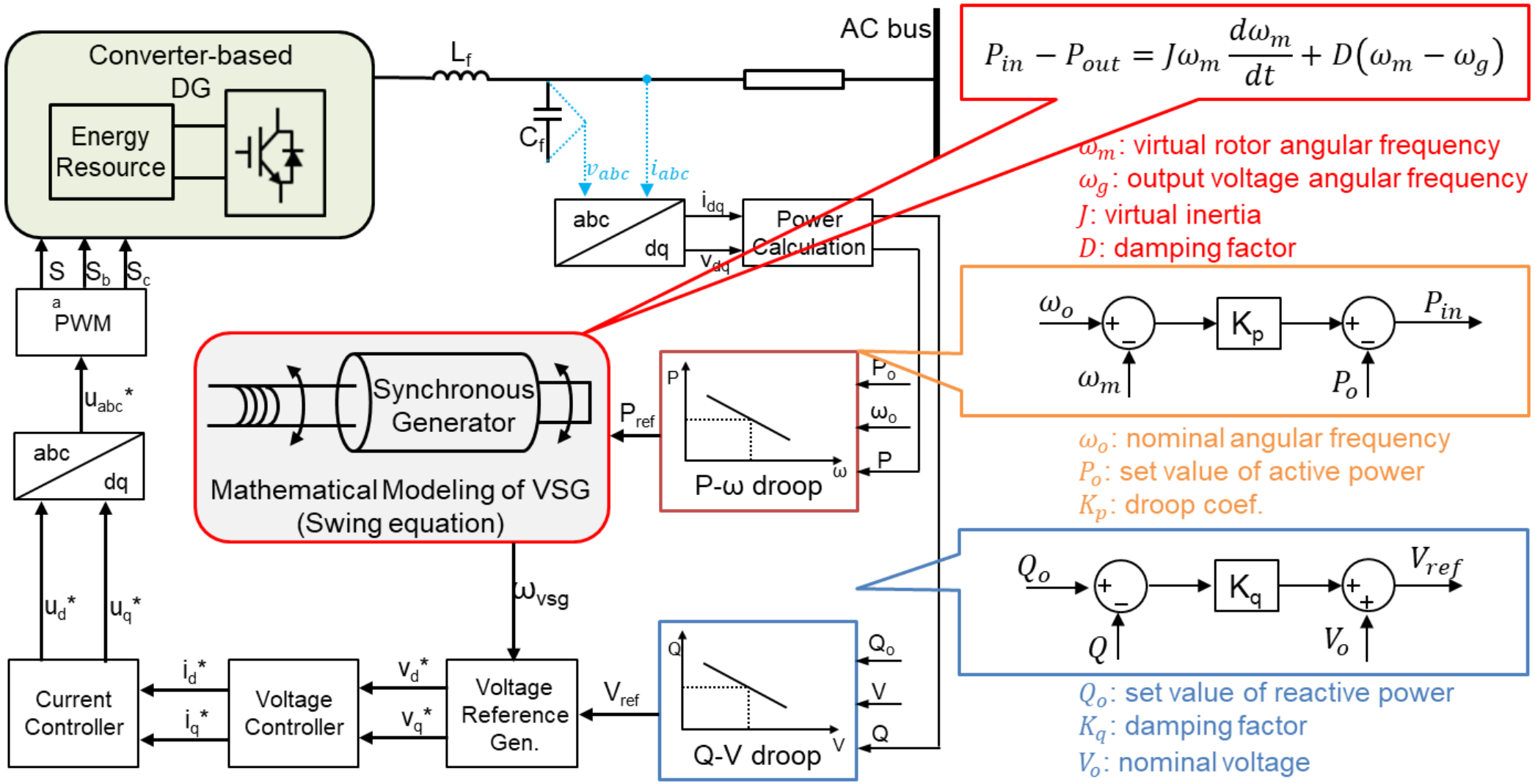
$$P_{in} - P_{out} = J\omega_m \frac{d\omega_m}{dt} + D(\omega_m - \omega_g)$$

Inertia Support

가상동기발전기(Virtual Synchronous Generator, VSG)

연구개발내용 – ESS 용 그리드포밍기반 가상관성기술

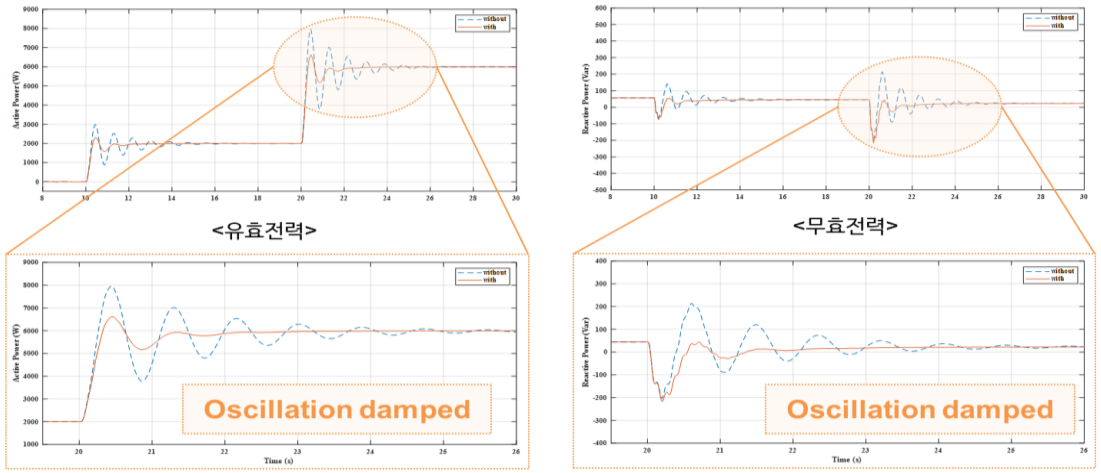
❖ ESS – 가상관성을 적용한 AC/DC 전력변환장치



연구개발내용 – ESS 용 그리드포밍기반 가상관성기술

❖ 시뮬레이션 및 실험을 통한 효과 검토

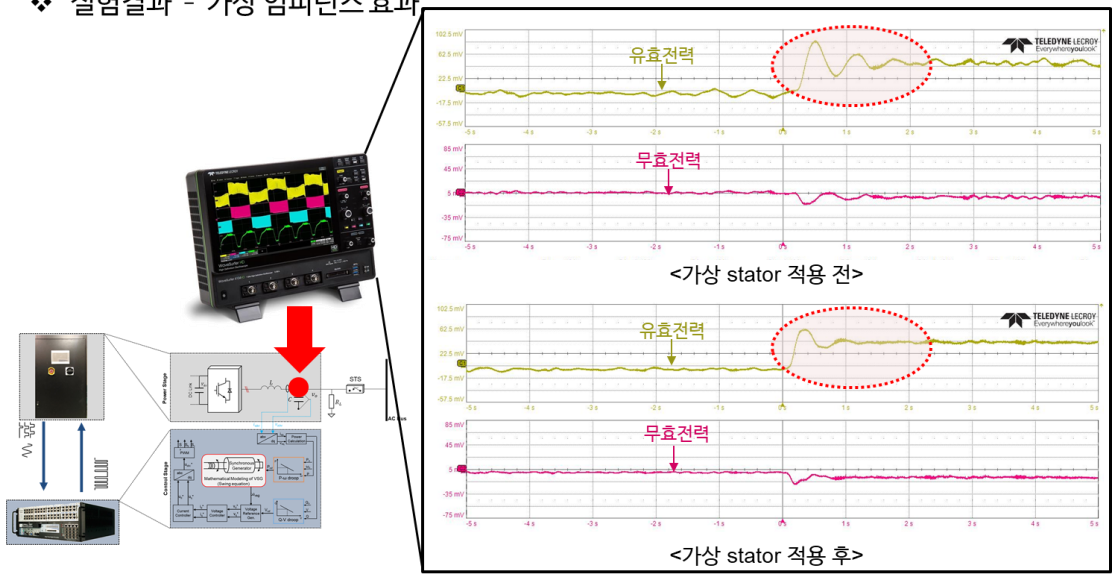
▪ 계통연계운전모드



<유효전력>

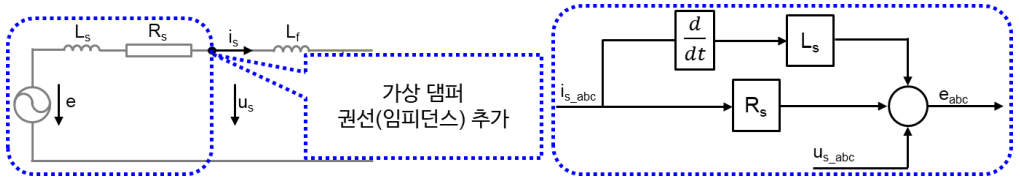
<무효전력>

❖ 실험결과 - 가상 임피던스 효과



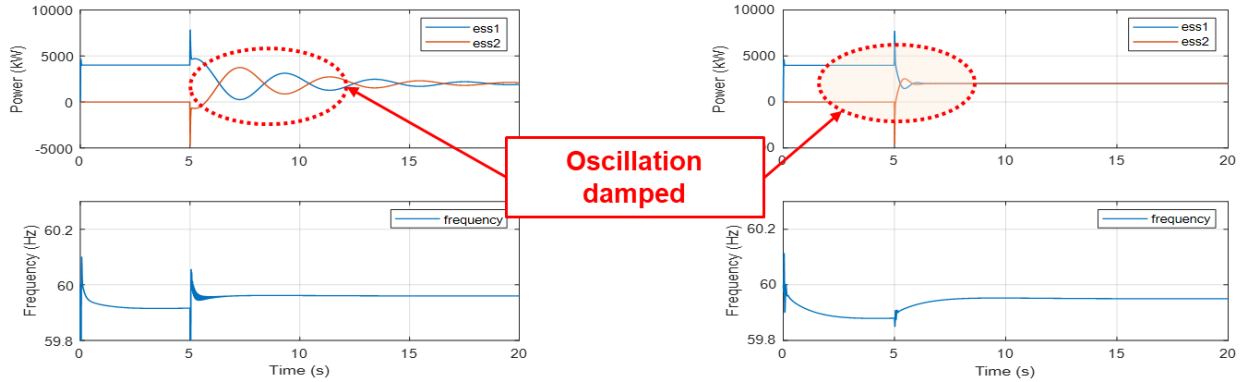
<가상 stator 적용 전>

<가상 stator 적용 후>



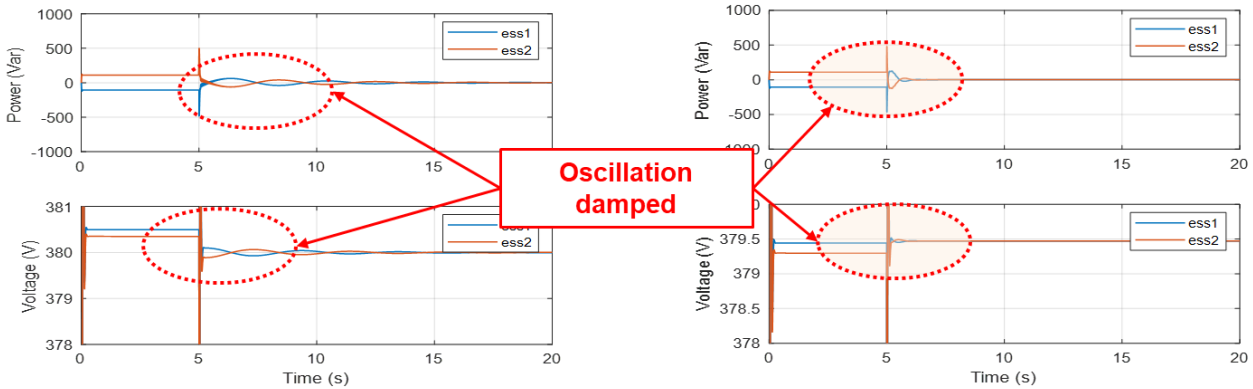
<댐핑을 위한 가상임피던스>

▪ 독립운전모드



<without virtual stator reactance>

<with virtual stator reactance>



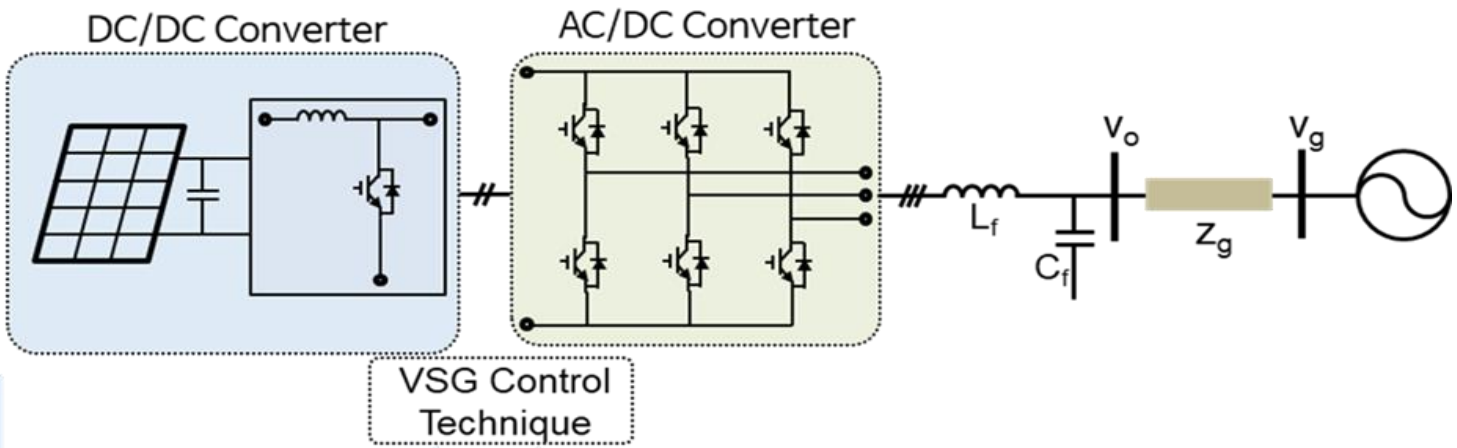
<without virtual stator reactance>

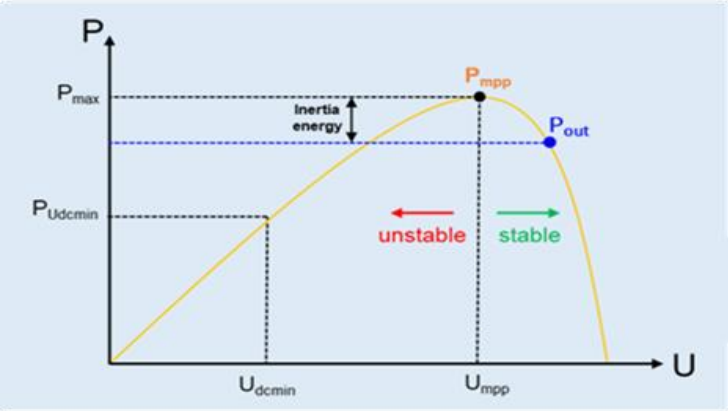
<with virtual stator reactance>

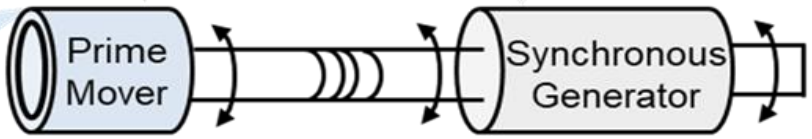
가상관성 적용 태양광 발전시스템 개념

- PV 시스템 : DC/DC 컨버터 + AC/DC 컨버터
  - ✓ DC/DC 컨버터 : Prime mover
  - ✓ AC/DC 컨버터 : Synchronous generator

≜



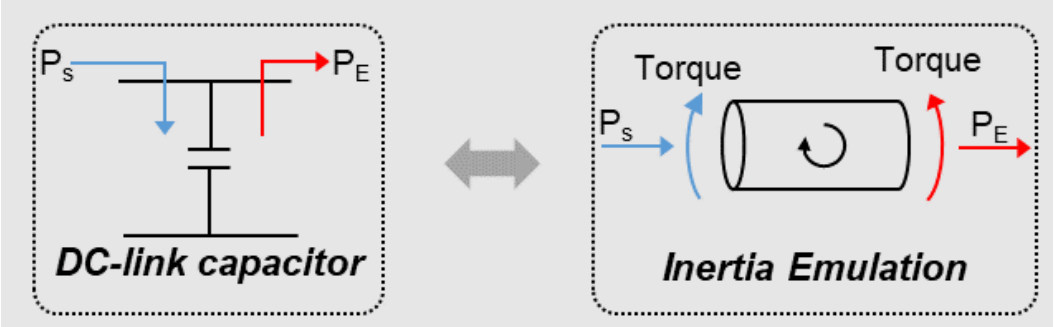




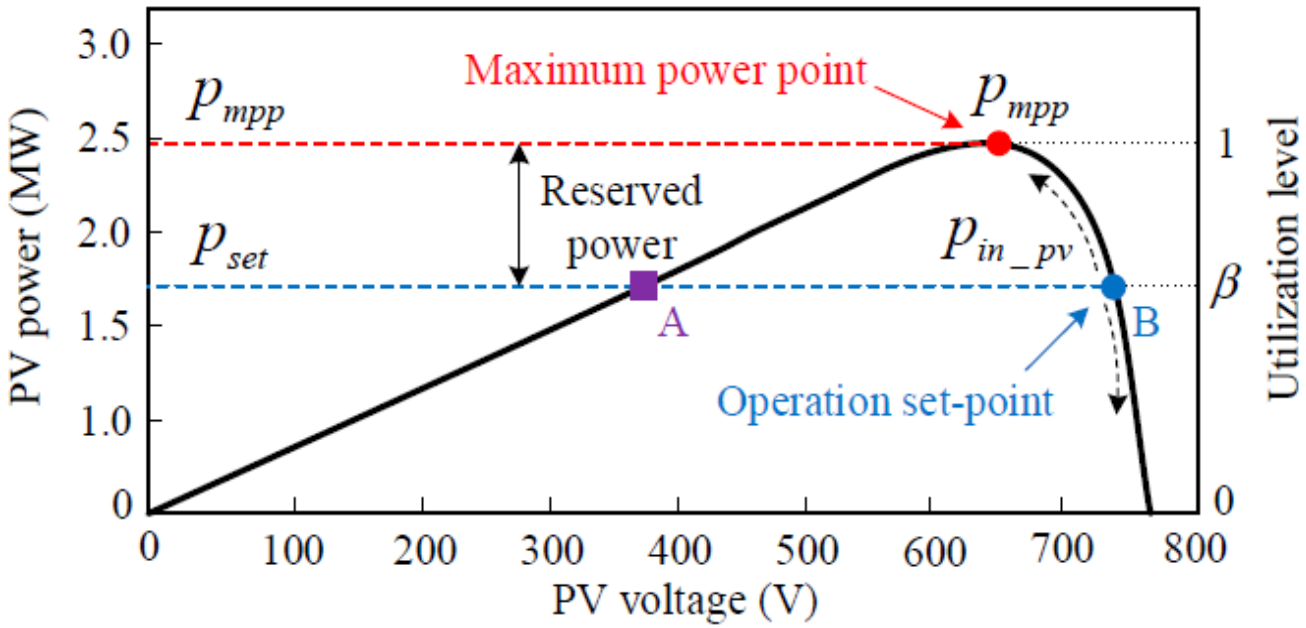
연구개발내용 – PV 용 그리드포밍기반 가상관성기술

❖ 신재생전원의 전압제어 기반 가상관성제어 기법

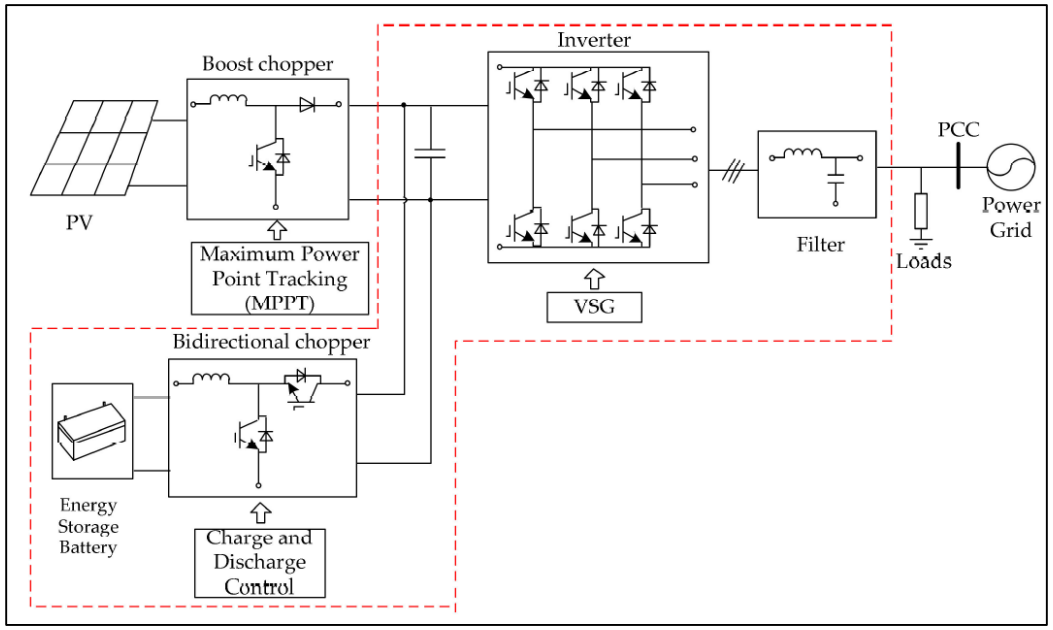
- DC링크 커패시터를 이용한 관성에너지 모의
- 에너지저장장치를 이용한 관성에너지 모의
- PV의 MPPT 곡선을 이용한 관성에너지 모의



<DC링크를 이용한 제어 기법 원리>



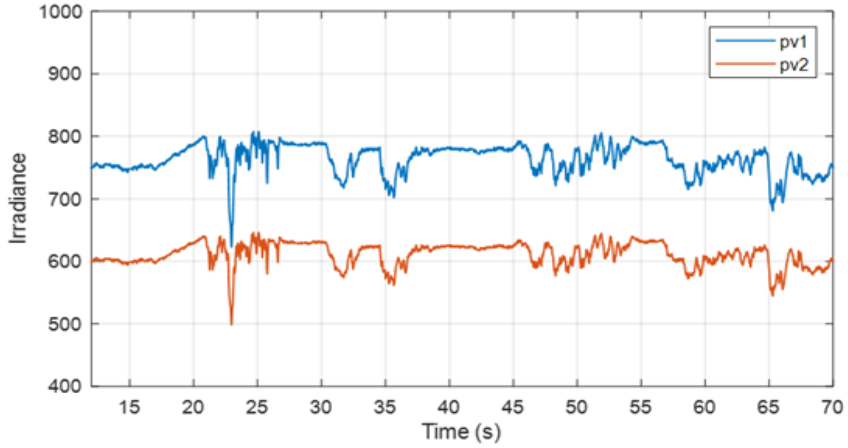
<MPPT 곡선을 이용한 제어 기법 원리>



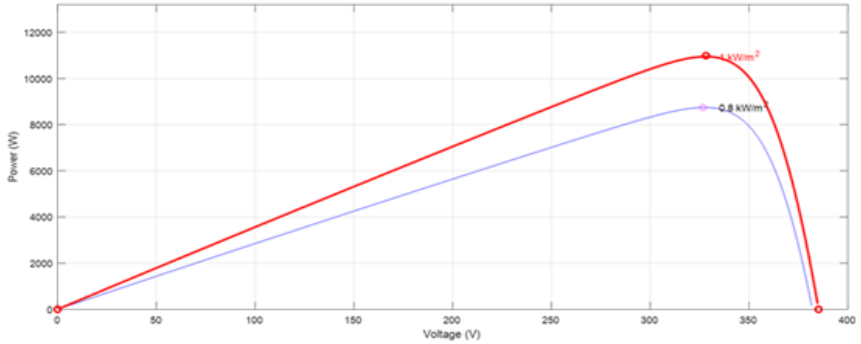
<ESS를 이용한 제어 기법 원리>

가상관성 적용 태양광 발전시스템 모의실험 시나리오

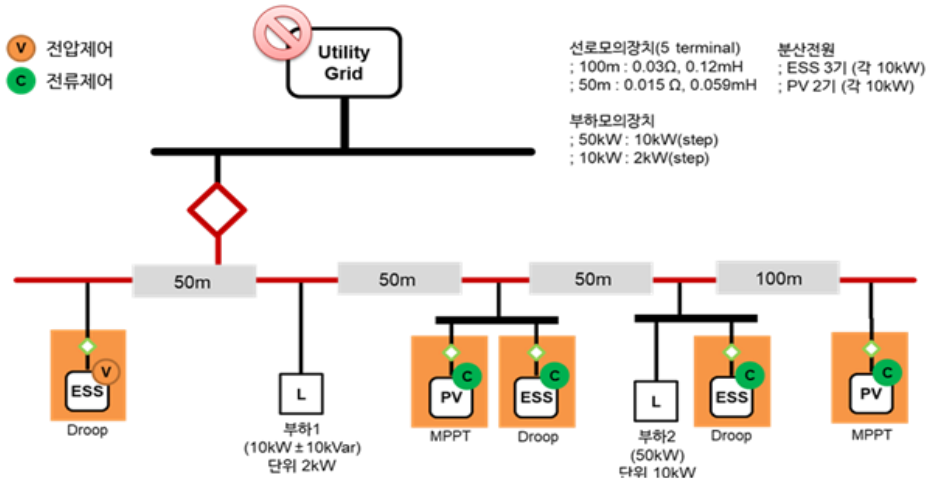
❖ 태양광 출력 및 부하변동에 따른 주파수 응답 특성 검토



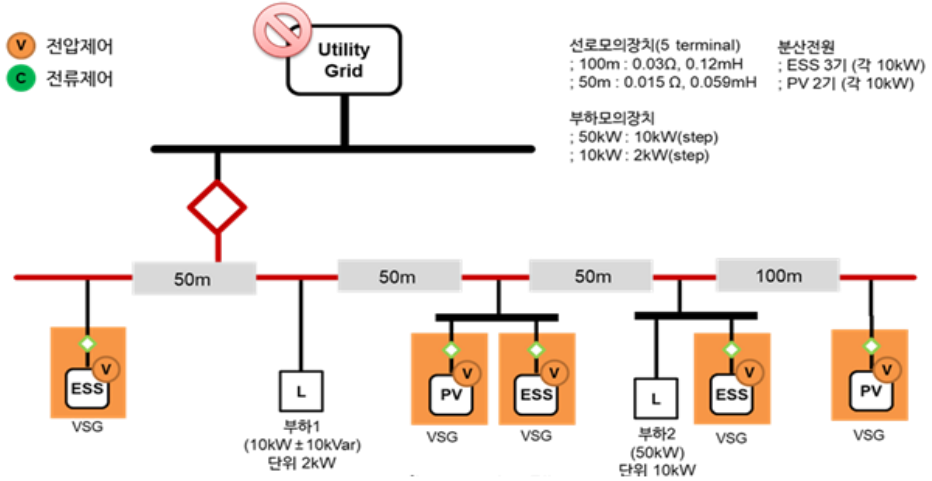
<태양광 일사량>



< MPP 특성 곡선>



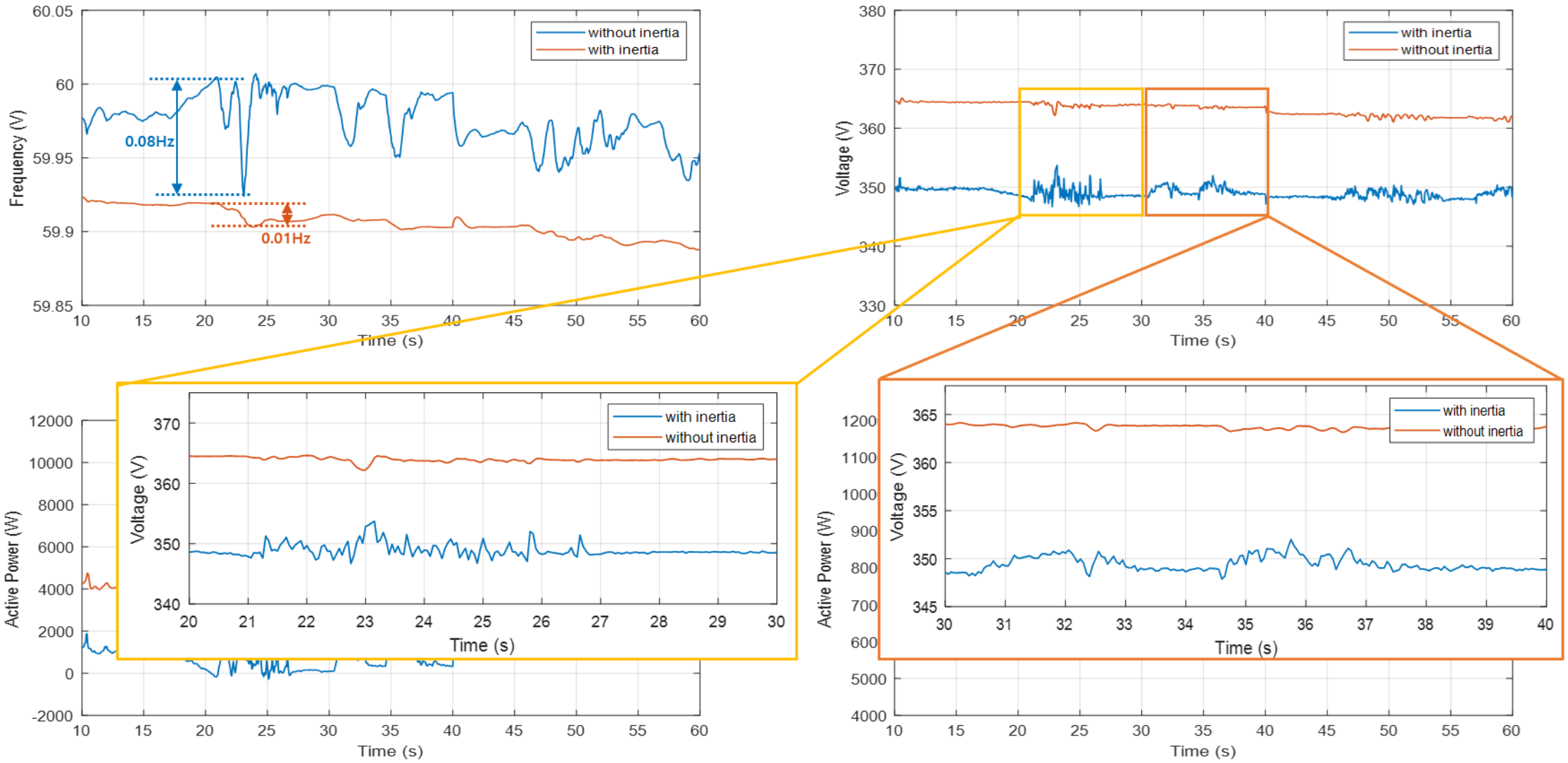
기존방식(Droop 기반 제어)



가상관성 적용 제어

연구개발내용 – PV 용 그리드포밍기반 가상관성기술

❖ 시뮬레이션을 통한 성능검토



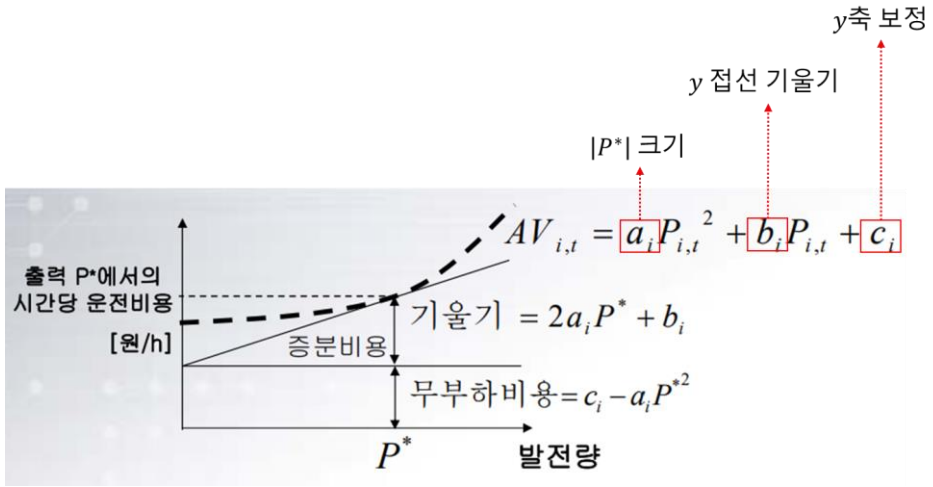
연구개발내용 – 분산운영 기술 개발

❖ 인버터 기반 마이크로그리드 분산운영 기술

▪ ESS 증분비용 및 diffusion 알고리즘

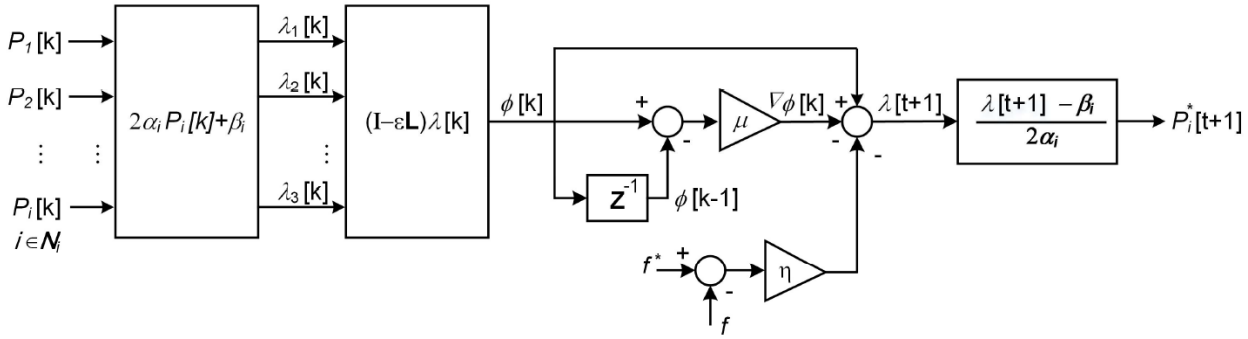
• ESS 비용 함수

$$C_e(P_e^{ESS}) = \alpha_e^{ESS}(P_e^{ESS} + 3P_{e,\max}^{ESS}\cdot(DOD))^2 + \beta_e^{ESS}(P_e^{ESS} + 3P_{e,\max}^{ESS}\cdot(DOD)) + \gamma_e^{ESS}$$



• 2차 주파수 보정을 고려한 디퓨젼 알고리즘

$$\begin{cases} \Phi[k] = (I - \varepsilon L)\lambda[k] \\ \lambda[k+1] = \Phi[k] - \mu\nabla\Phi_v[k] - \eta(f^* - f) \end{cases}$$



• ESS 증분비용

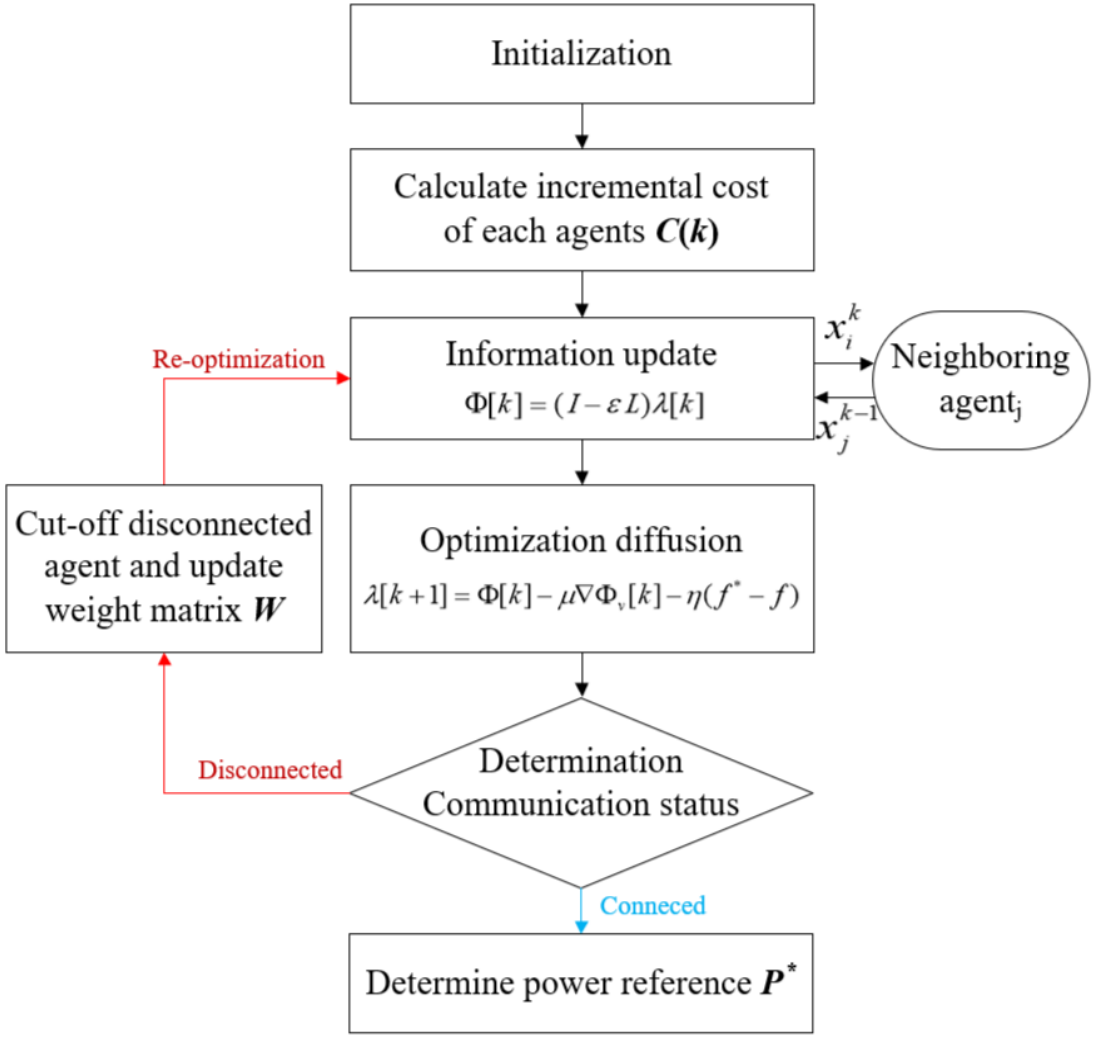
$$\frac{\partial C_e(P_e^{ESS})}{\partial P_e^{ESS}} = 2\alpha_e^{ESS}(P_e^{ESS} + 3P_{e,\max}^{ESS}\cdot(DOD)) + \beta_e^{ESS}$$

- P_e : ·방전 전력
- $P_{e,max}$: ·방전 전력
- α, β, γ: 2 계수
- DOD : Depth of discharge

연구개발내용 – 분산운영 기술 개발

❖ 인버터 기반 마이크로그리드 분산운영 기술

▪ Diffusion 알고리즘을 통한 증분비용 수렴 프로세스



- 증분비용 수렴

$$\begin{cases} \Phi[k] = (I - \varepsilon L)\lambda[k] \\ \lambda[k+1] = \Phi[k] - \mu\nabla\Phi_v[k] - \eta(f^* - f) \end{cases}$$

- 통신 토폴로지(a_{ij}) 탐색 및 가중치 행렬 업데이트(W)

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & if\,(i,j) \in \varepsilon \\ 0 & if\,(i,j) \notin \varepsilon\, or\, i = j \end{cases}$$

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 1/[\max(n_i + n_j) + 1] \\ 1 - \sum_{j \in N_i} 1/[\max(n_i + n_j) + 1] \\ 0 \end{cases}$$

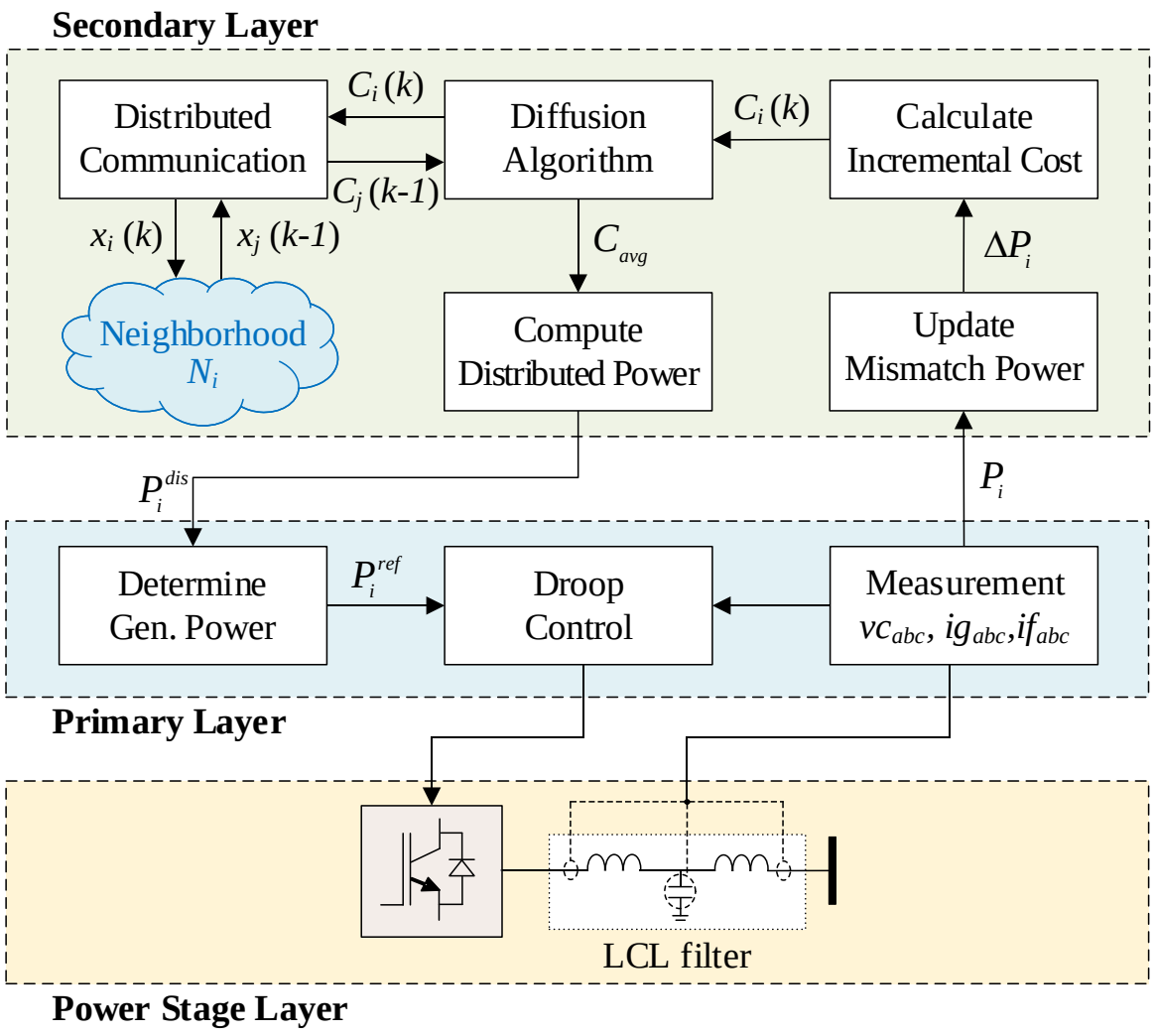
- ESS 전력 지령치 결정 (P_{dis})

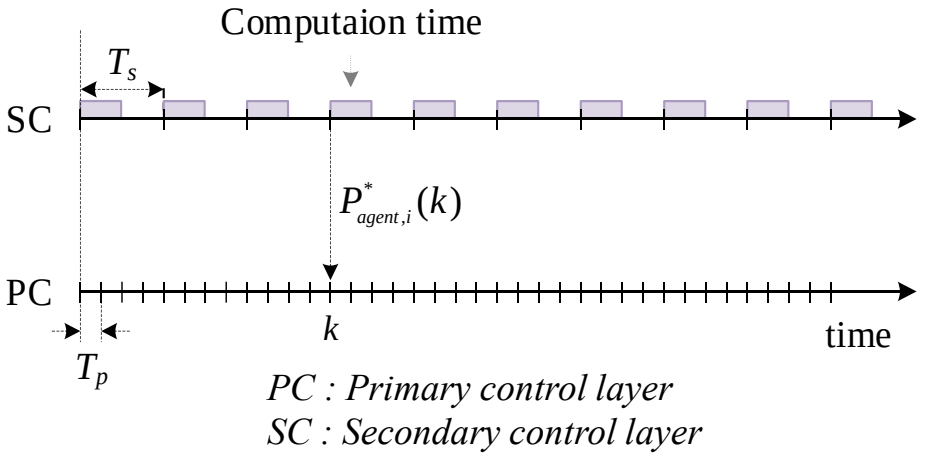
$$P_{disESS}^k = \left(\left(\lambda_i^{k+1} - y\right)/2x\right) - \left(3P_{b,\max}DOD\right)$$

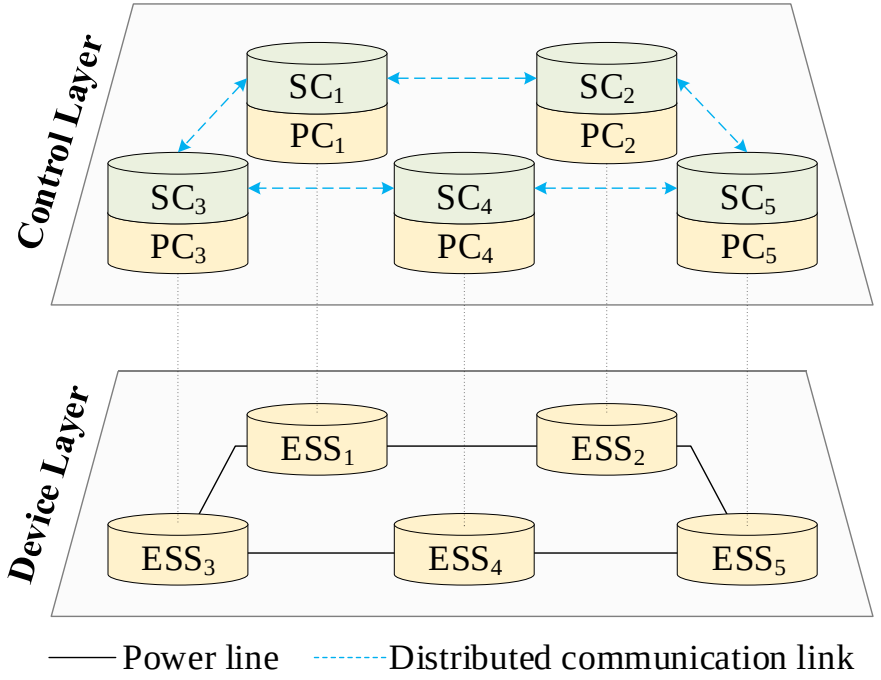
연구개발내용 – 분산운영 기술 개발

❖ 인버터 기반 마이크로그리드 분산운영 기술

- 계층 제어 시스템



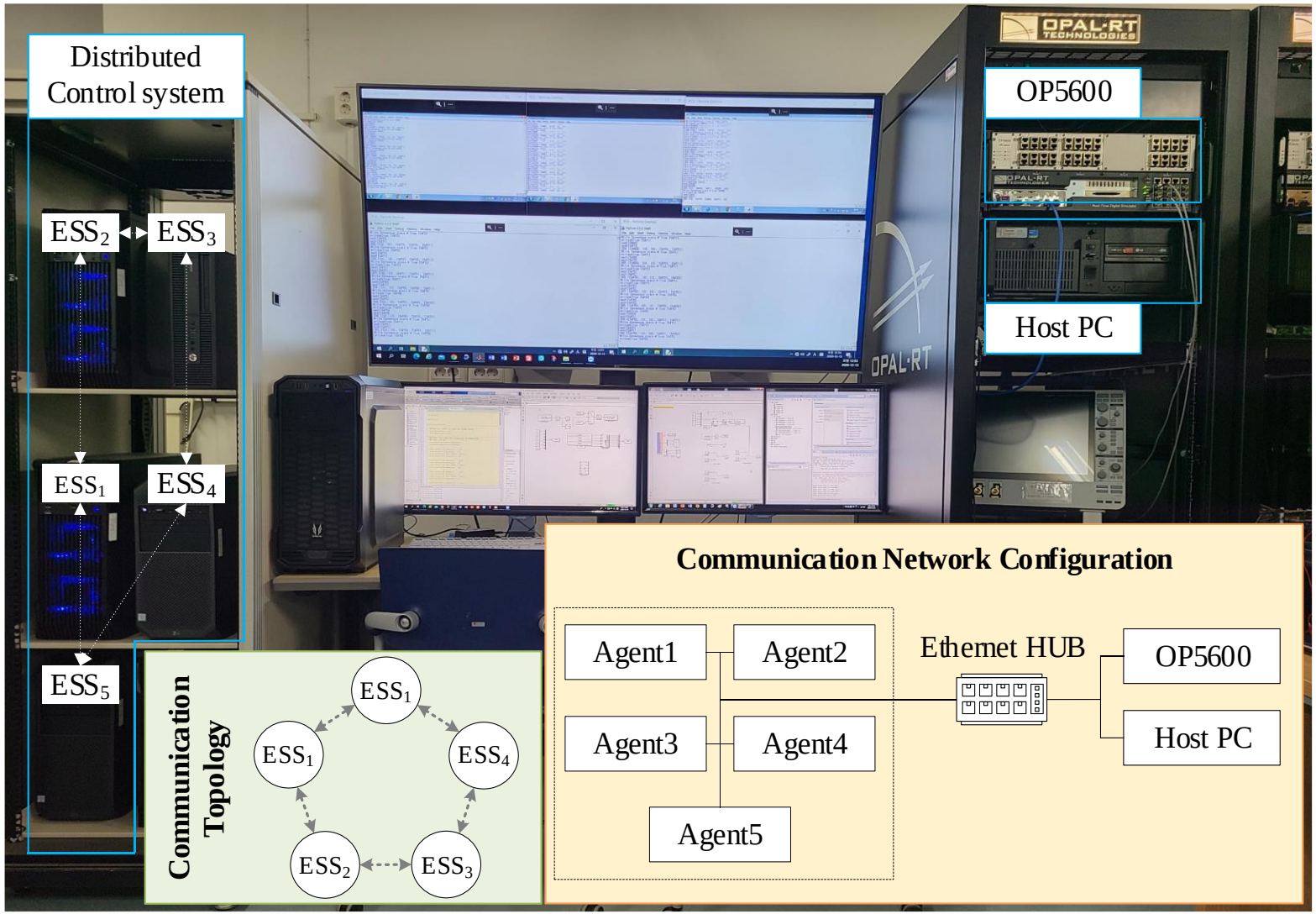




<분산 제어시스템>

연구개발내용 – 분산운영 기술 개발

❖ 인버터 기반 마이크로그리드 분산운영 기술계층 제어 시스템



Agent	A_i ($/kW2H)	β_i ($/kWh)	γ_i ($/kWh)
ESS_1	0.001562	3.95	213
ESS_2	0.00174	3.99	234
ESS_3	0.00186	4.02	246
ESS_4	0.00196	4.05	270
ESS_5	0.00208	4.09	283

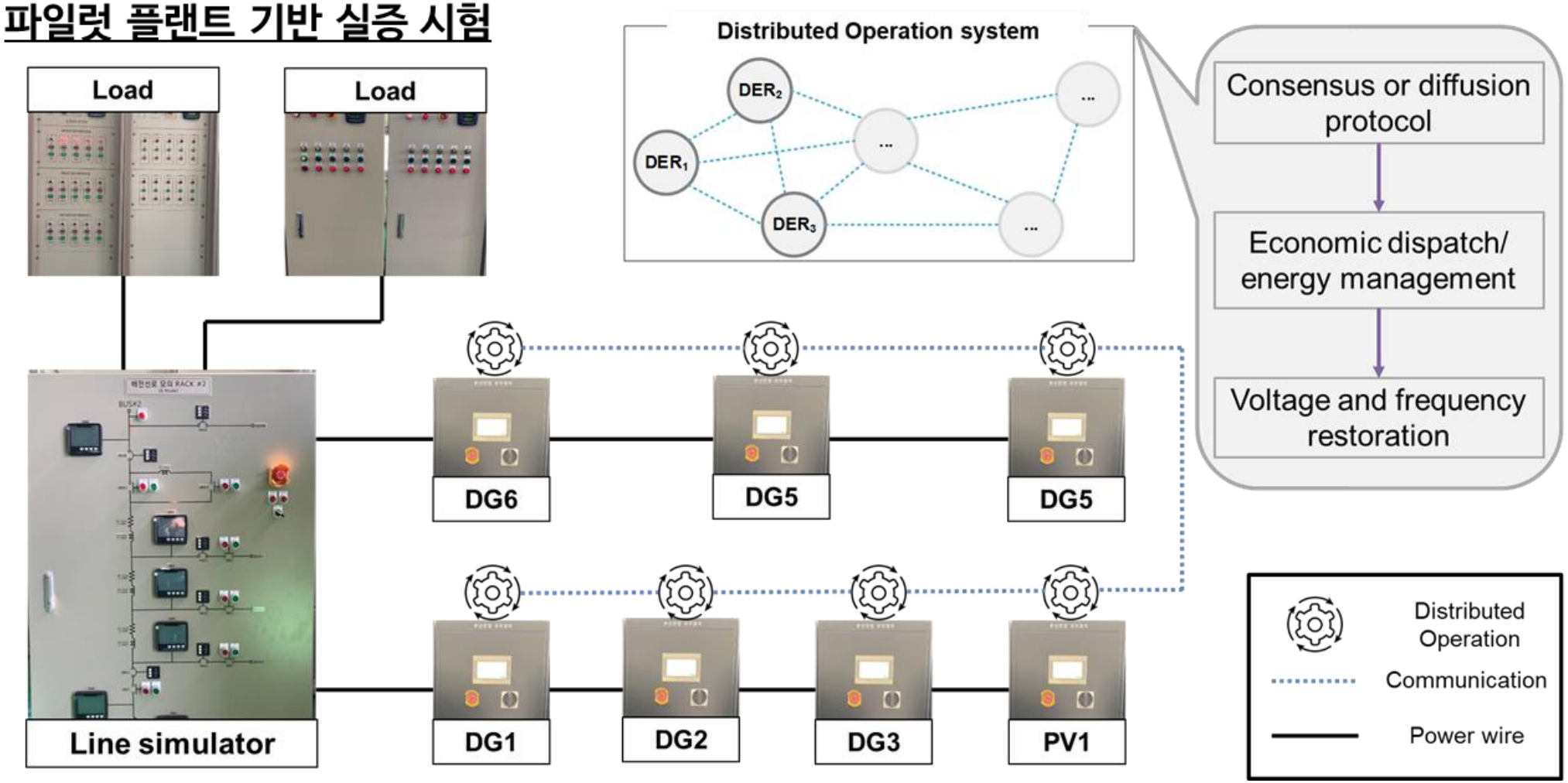
Symbol	PARAMETER	Value
T_s	Sampling time	50 μs
T_{com}	Communication time	0.1 s
T_{EMS}	EMS command time	30 s
k_{sp},k_{si}	PI gains of secondary controller	0.01,6

<테스트 시스템 파라미터>

연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

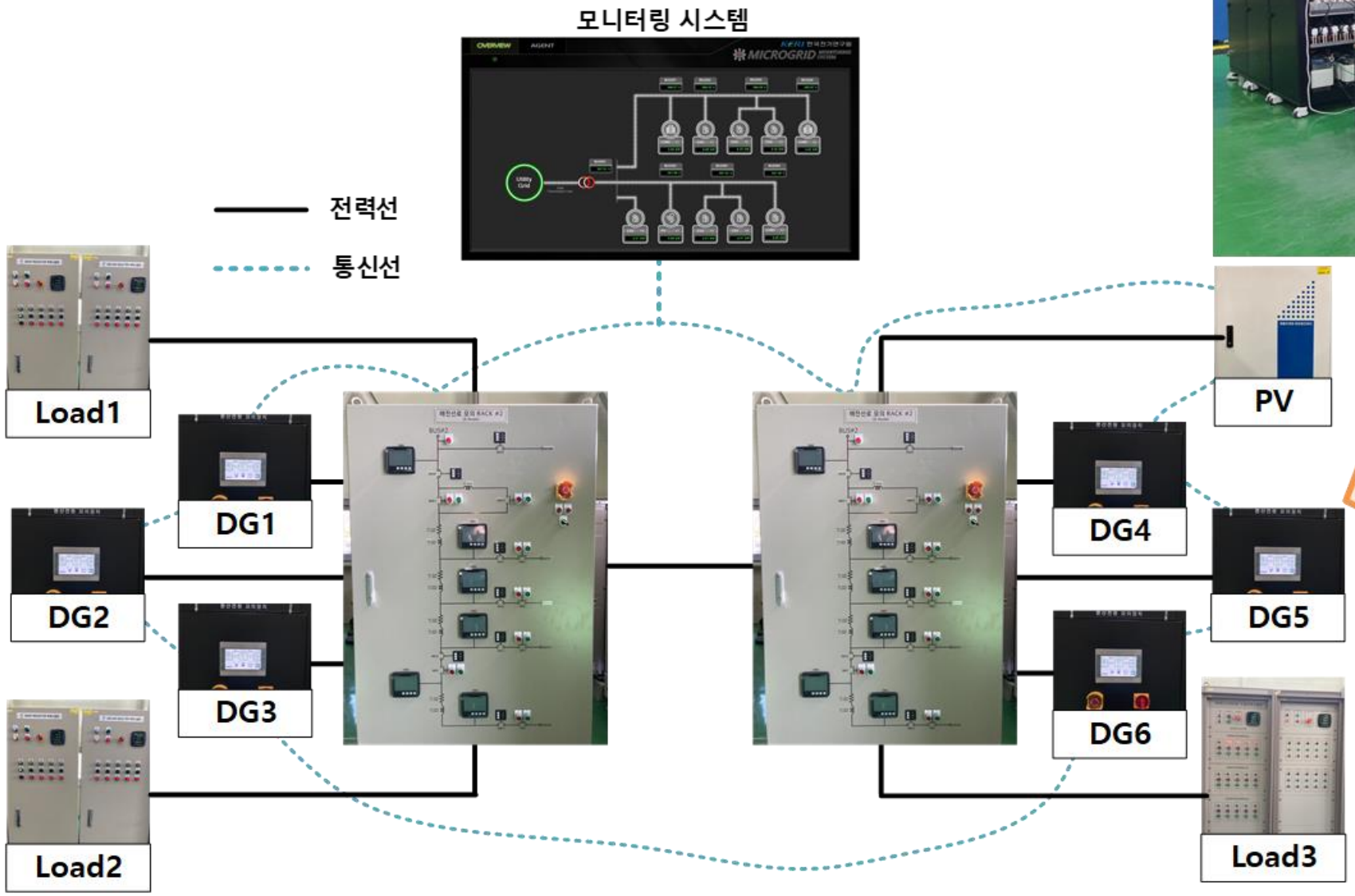
❖ 파일럿 플랜트 적용, 실증 운전을 통한 성능시험 및 보완

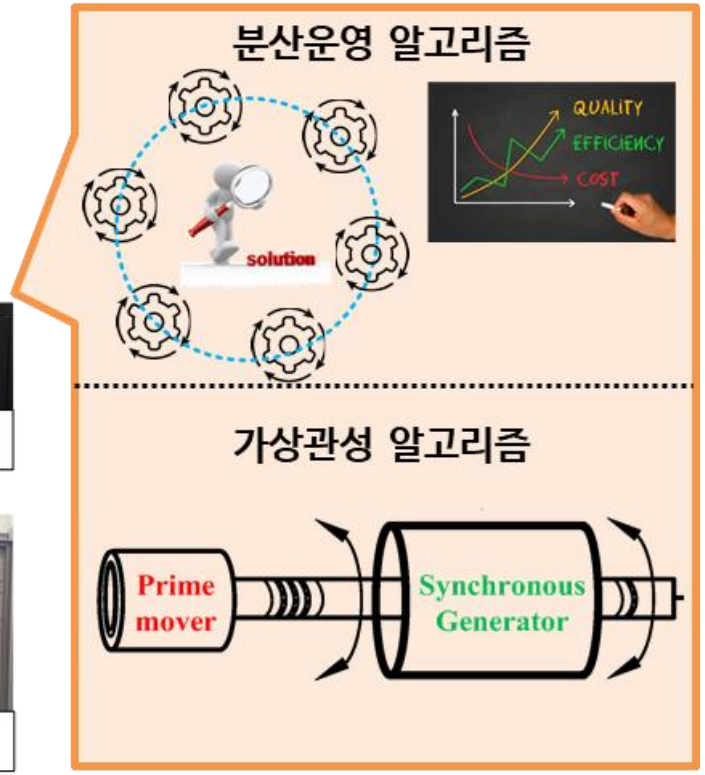
- 계통유지제어 알고리즘 보완 및 실증
- 분산 운영 알고리즘 보완 및 실증
- **파일럿 플랜트 기반 실증 시험**



연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

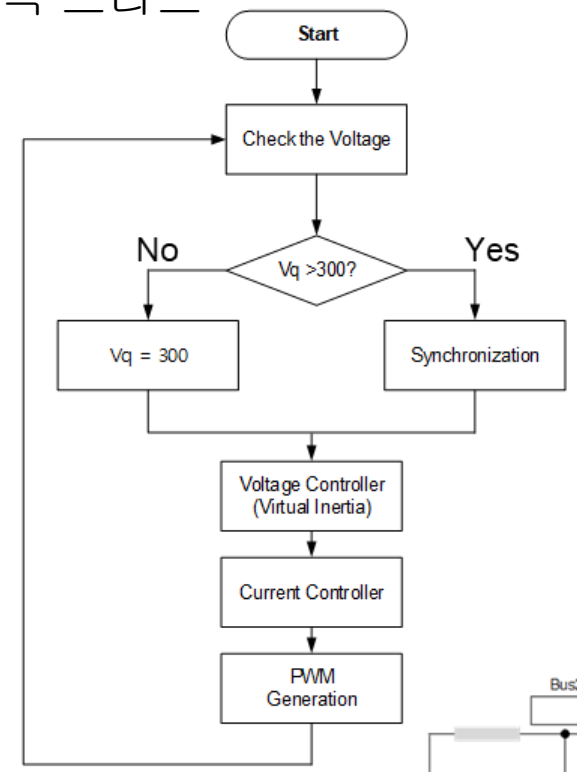
❖ 파일럿 플랜트 구축

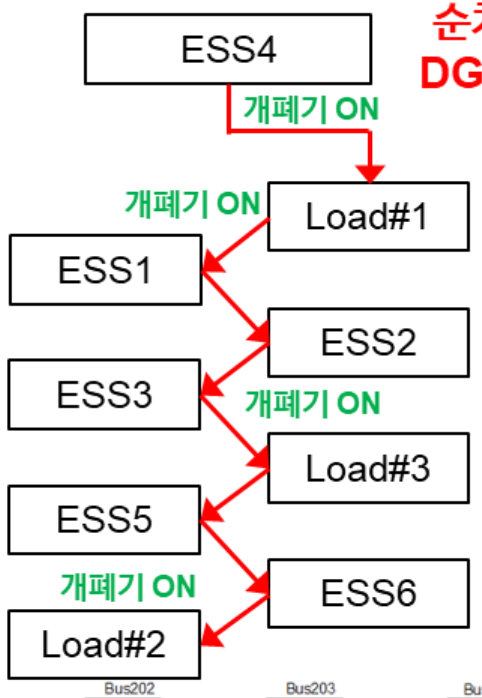


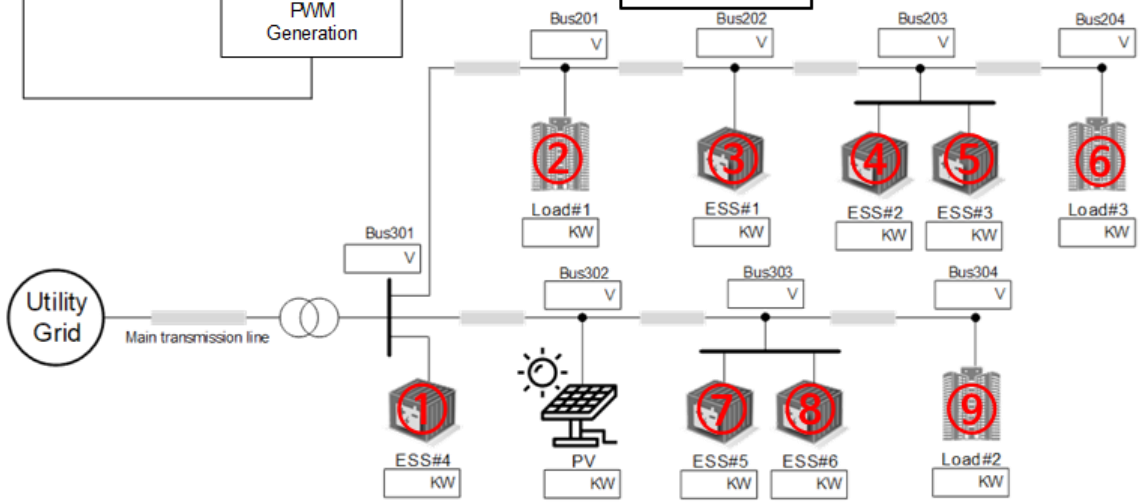


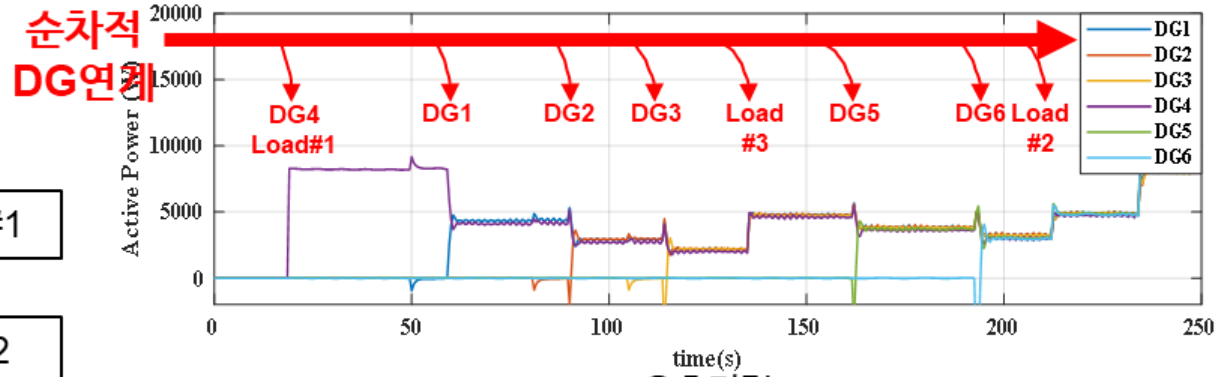
연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

❖ 블랙 스타트

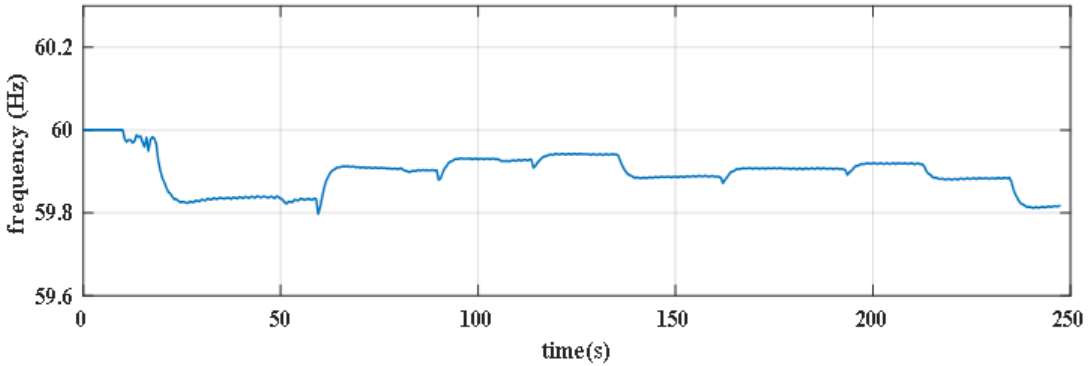




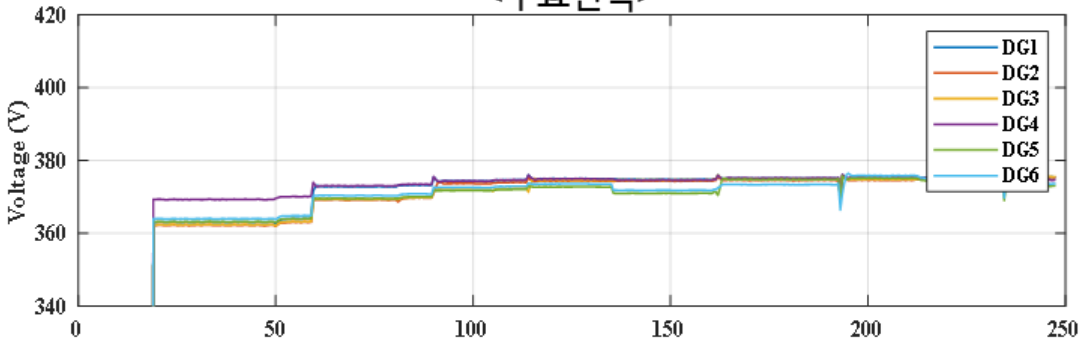




<유효전력>



<무효전력>

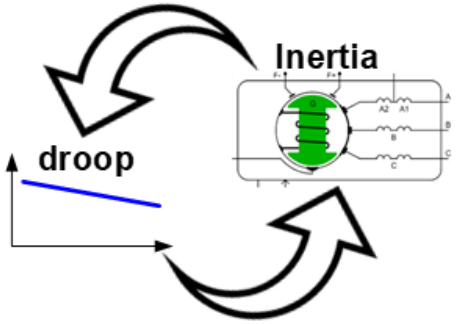


<전압>

연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

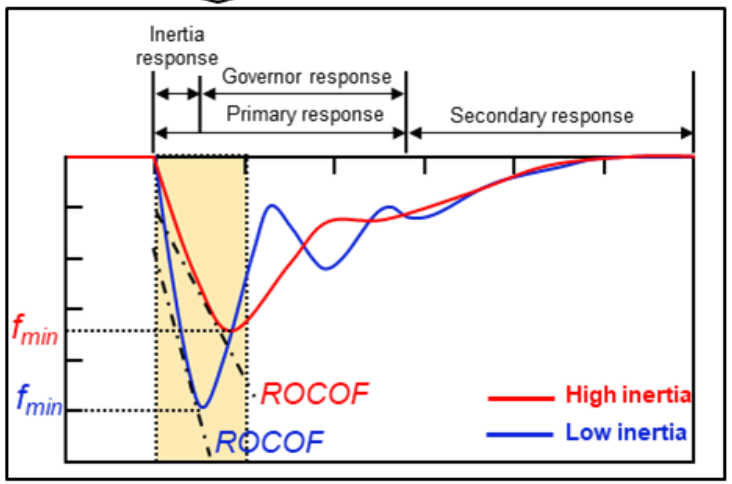
❖ 성능검토 시나리오

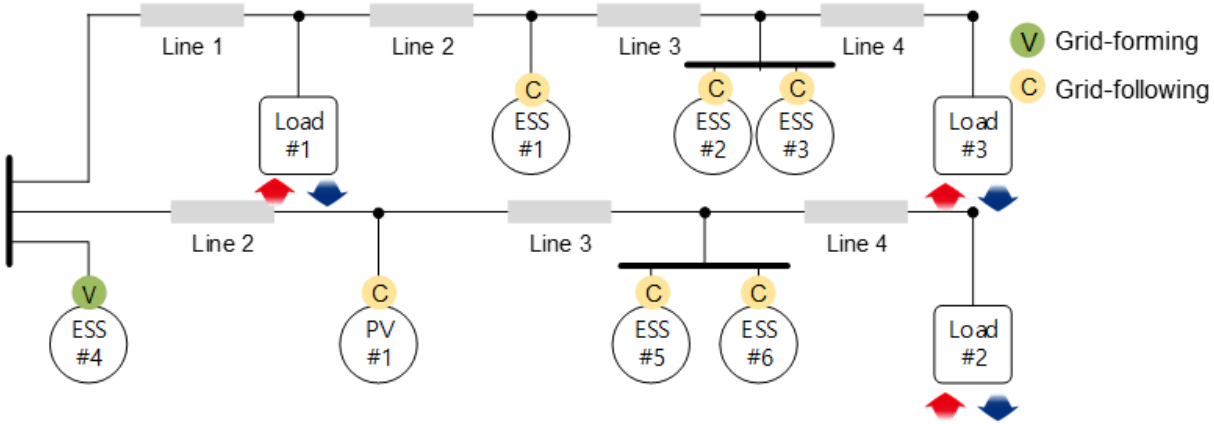
- 가상임피던스 효과 검토
- 비교군 : Droop 제어 vs. 가상관성제어
  - 부하변동 : 저부하 → 고부하
  - Grid-forming 컨버터 탈락 시, 동특성 검토

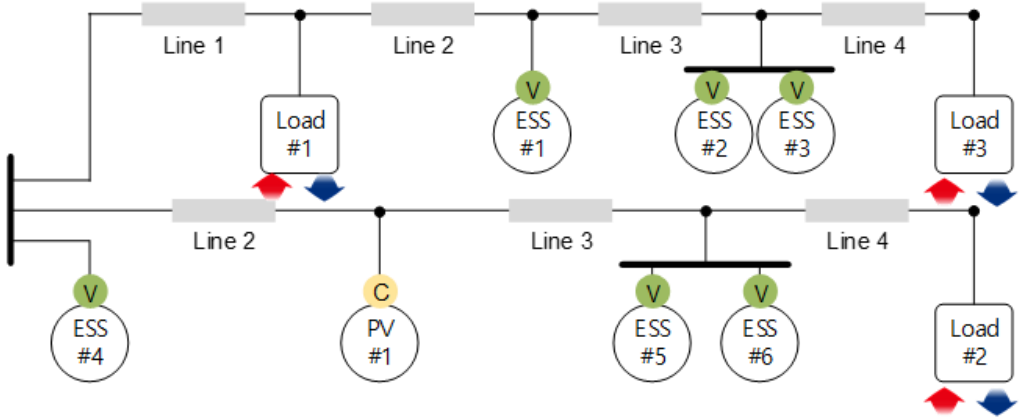


Check Point

1. 주파수 안정도(Nadir, ROCOF)
2. Resiliency(Grid-forming)







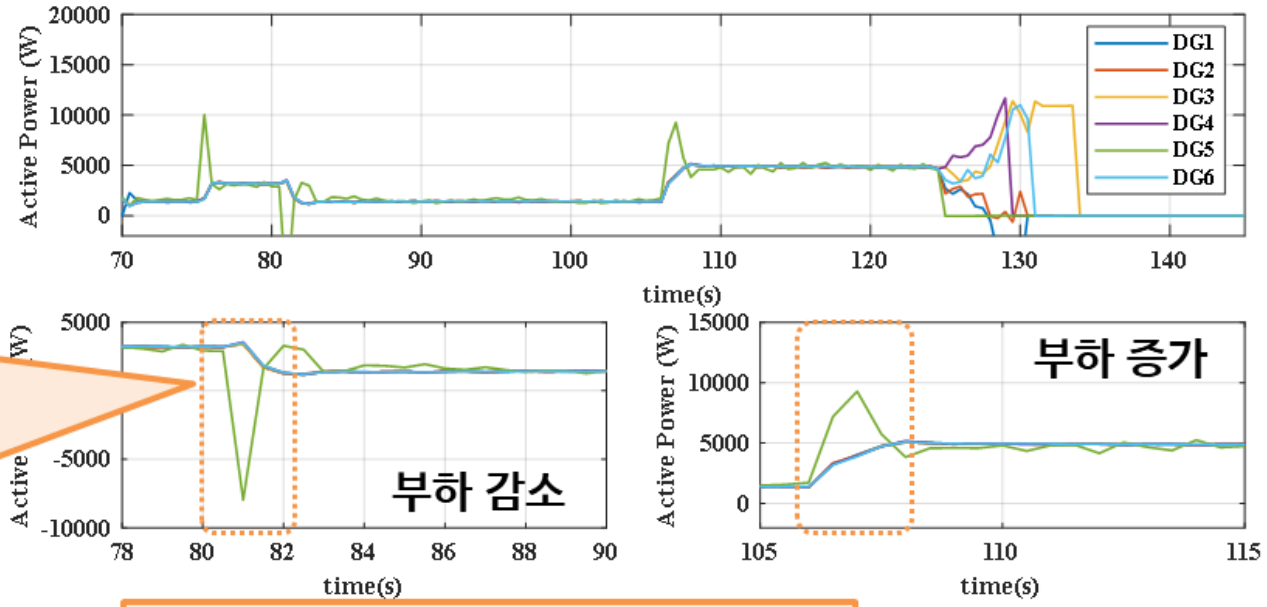
연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

❖ 시나리오
- DG5 : 단일 기준 전압원
- DG(1,2,3,4,6) : Grid-following 기반 droop제어

① 부하변동

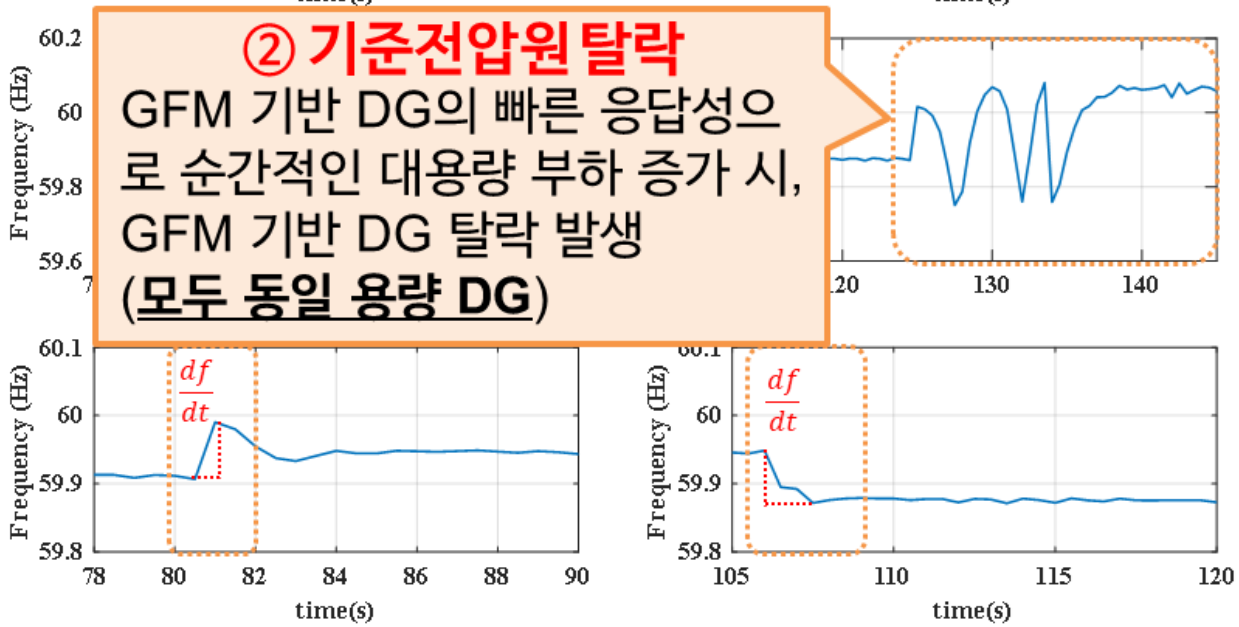
❖ 부하 감소
- GFM 기반 DG의 빠른 응답성으로 부하감소 시 과도 상태 발생

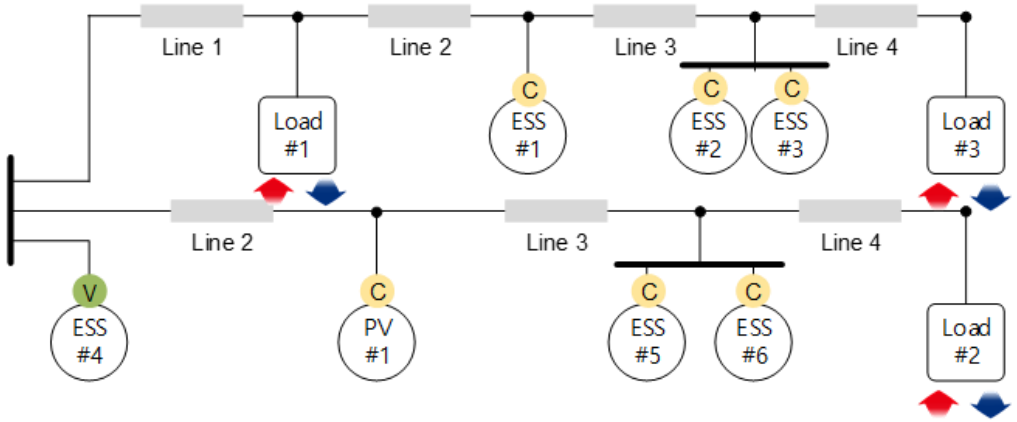
❖ 부하 증가
- GFM 기반 DG의 빠른 응답성으로 부하증가 시 과도 상태 발생



② 기준전압원 탈락

GFM 기반 DG의 빠른 응답성으로 순간적인 대용량 부하 증가 시, GFM 기반 DG 탈락 발생 (**모두 동일 용량 DG**)



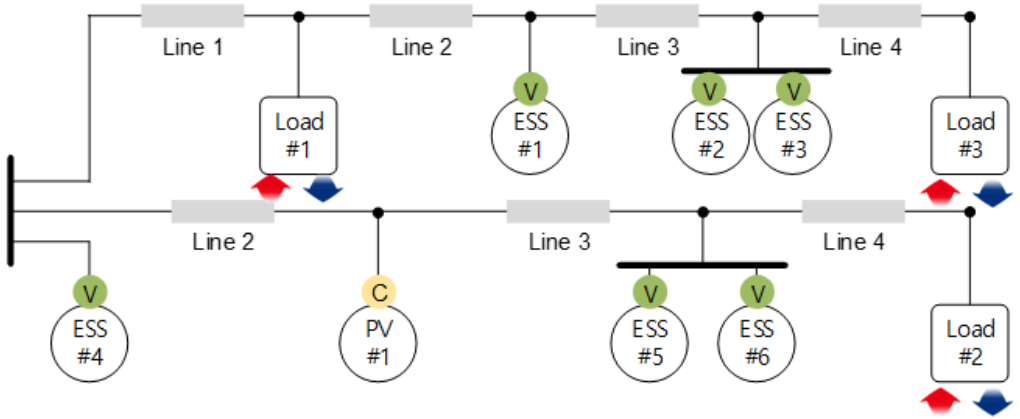


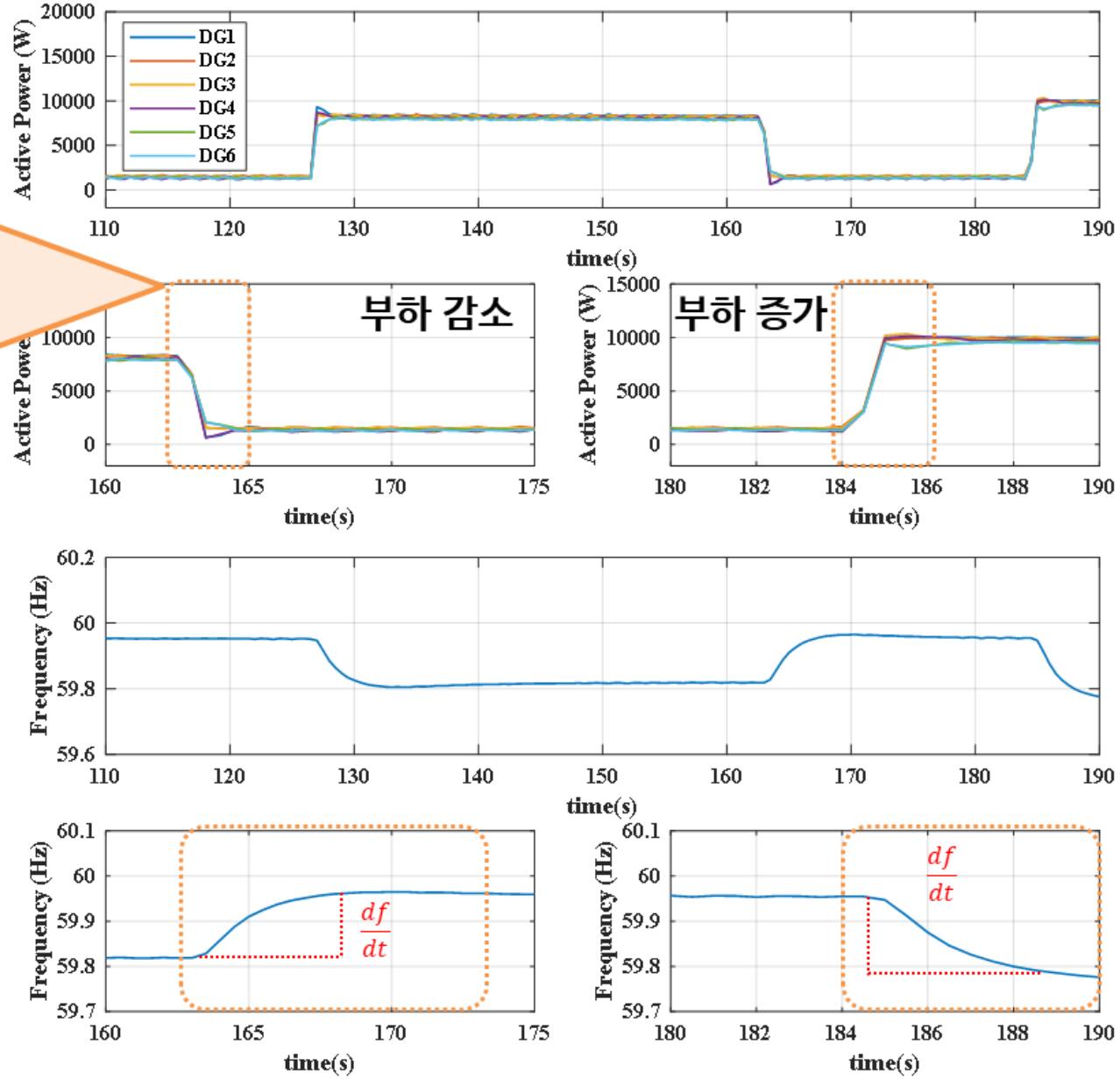
연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

❖ 시나리오
- DG 전체 GFM 기반 가상관성제어

❖ 부하 감소(50kW → 10kW)
- GFM 기반 가상관성제어로 큰 용량의 부하감소에도 안정적인 주파수 제어 가능

❖ 부하 증가 (10kW → 60kW)
- GFM 기반 가상관성제어로 큰 용량의 부하증가에도 안정적인 주파수 제어 가능

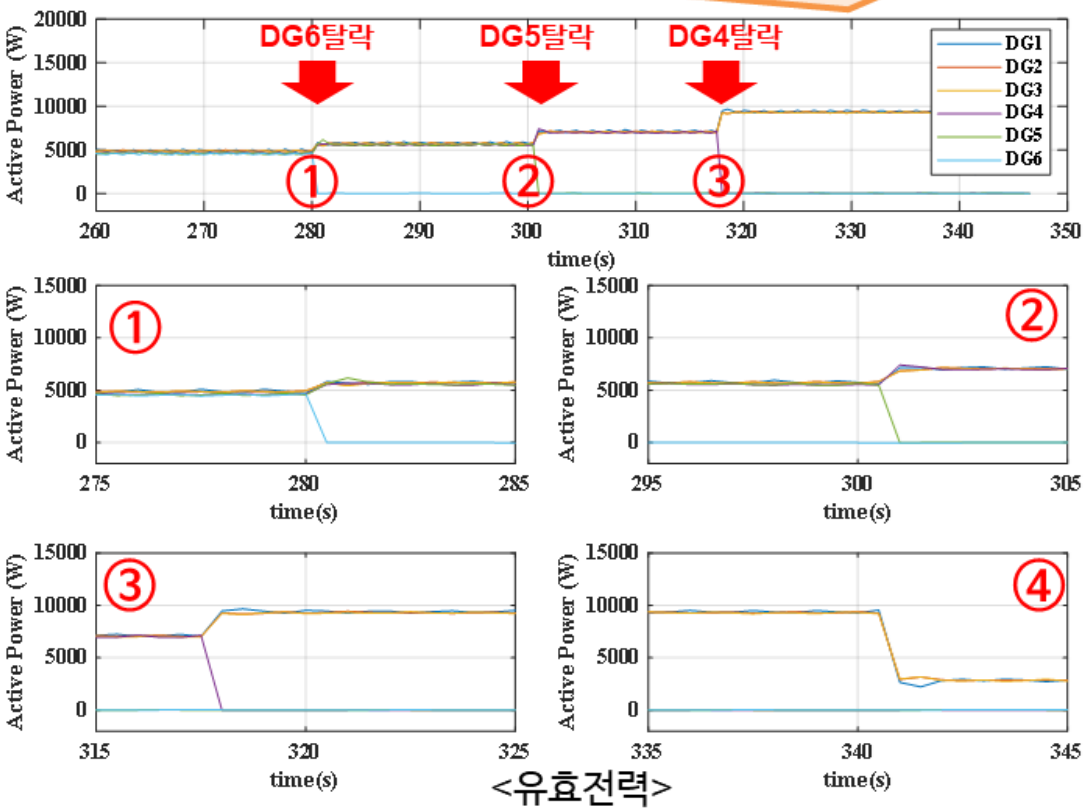




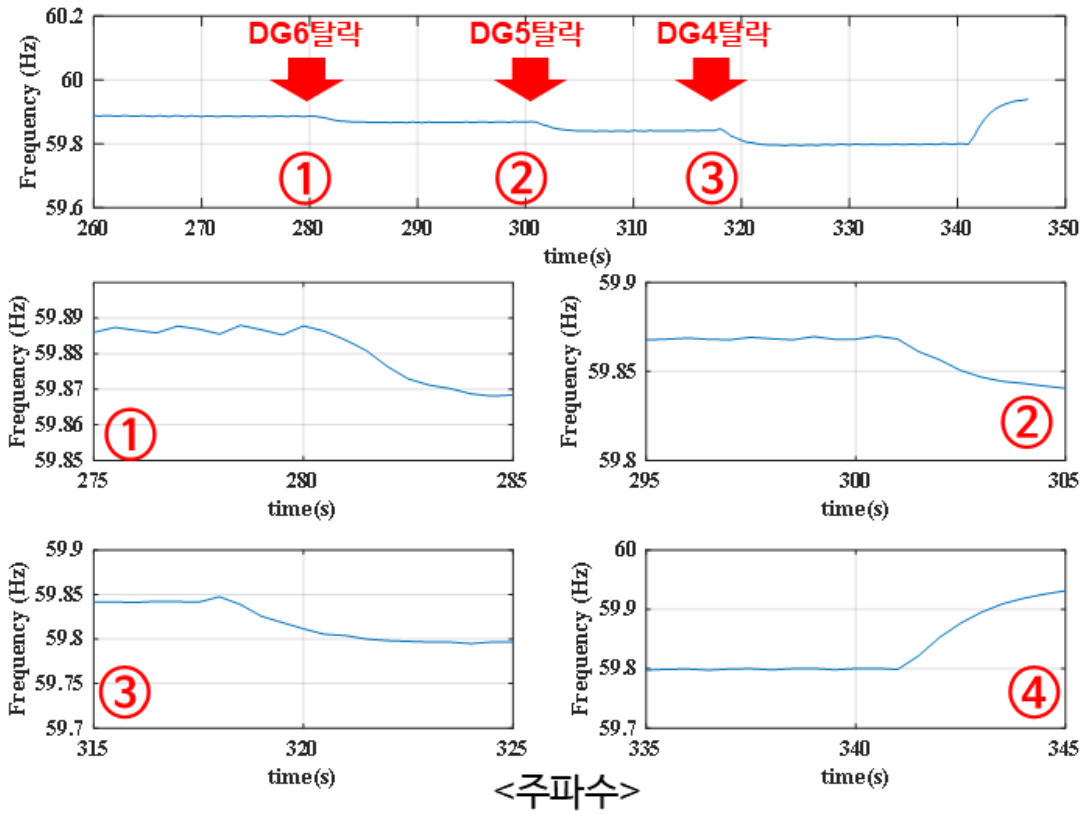
연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

❖ 가상관성제어

- 시나리오 : 약 342초까지 부하량은 동일하며, 순차적 DG 탈락
- GFM 기반 제어를 수행하므로 발전원이 탈락하더라도 안정적인 시스템 주파수 및 전압 유지가 가능함



<유효전력>

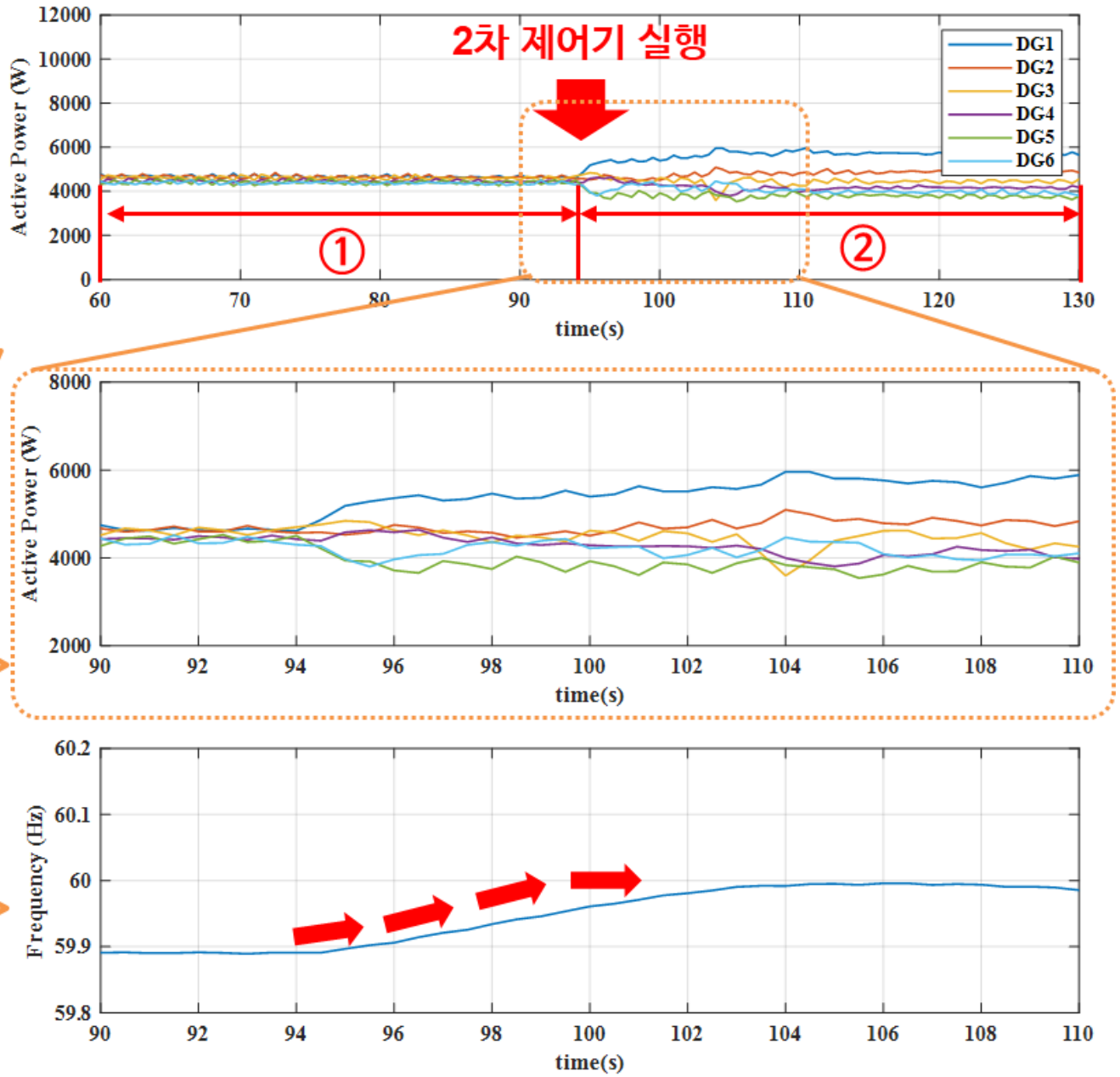


<주파수>

연구개발내용 – 파일럿플랜트에서의 성능검증

증분 비용
$DG_1 < DG_2 < DG_3 < DG_4 < DG_6 < DG_5$

No.	A_i ($/kW2H)	β_i ($/kWh)
DG_1	0.001562	3.82
DG_2	0.00174	3.99
DG_3	0.00186	4.15
DG_4	0.00196	4.53
DG_5	0.00208	5.09
DG_6	0.00219	3.11



❖ ① 구간 (1차 제어기 운전)
- 동일 용량(동일 파라미터) : 동일한 유효전력 출력(가상 조속기 운전)

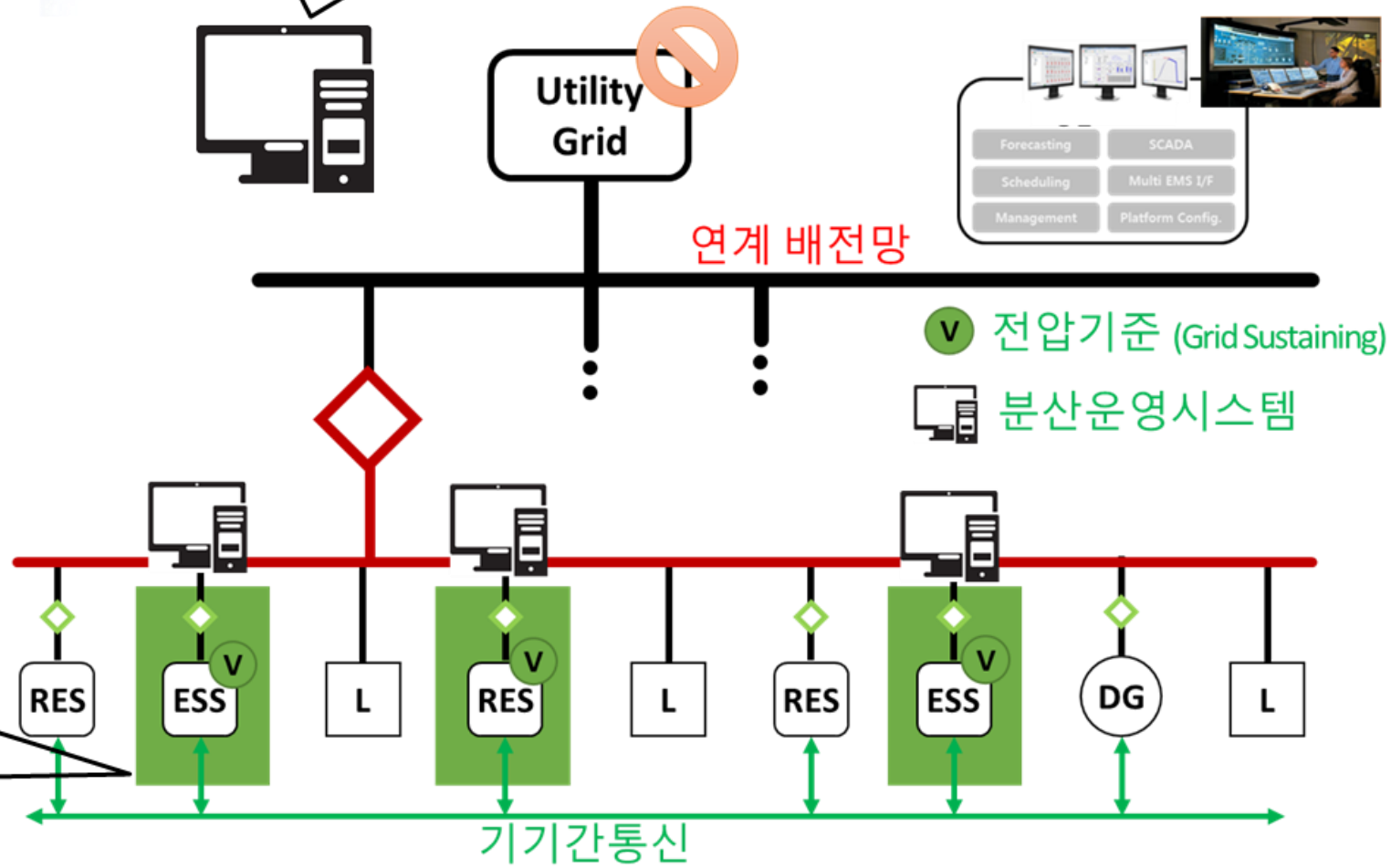
❖ ② 구간 (2차 제어기 실행)
- 2차 제어기 실행 SOC에 따른 증분 비용 차로 인한 출력변동 발생

❖ 주파수 보상
- 1차 제어기 운전 시 발생하는 주파수 정상상태 오차 보상

결론

- **관성제공을 통한 재생전원 수용률 증대**
- **시스템 보완 및 확장이 쉬움(plug&play)**
- **통신 및 마이크로그리드내 사고에 강인**

- 다수의 운영 주체에 의한 **분산 제어&운영**



- **전압 제어 기반** 분산전원 연계
- **가상관성을** 적용한 **주파수 안정도 제고**

Distributed Power System Research Center

Thank you