

Control / Robotics

Primary Voltage and Frequency Regulation in Inverter Based Islanded Microgrids through a Model Predictive Control Approach

Daniele Mestriner, Alessandro Rosini, Iris Xhani , Andrea Bonfiglio and Renato Procopio

Energies (MDPI), Vol. 15, No. 14, 2022

Contents

01 Introduction

02 MPC Controllers: Theory and Design

03 Operation Modes

04 Simulations and Results

05 Conclusions

01 Introduction

글로벌 환경 목표, 재생 에너지 통합, 시스템 유연성의 중요성 -> **마이크로 그리드**

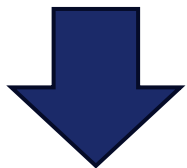
마이크로 그리드 -> 기존의 제어 방식의 문제,

1. droop control

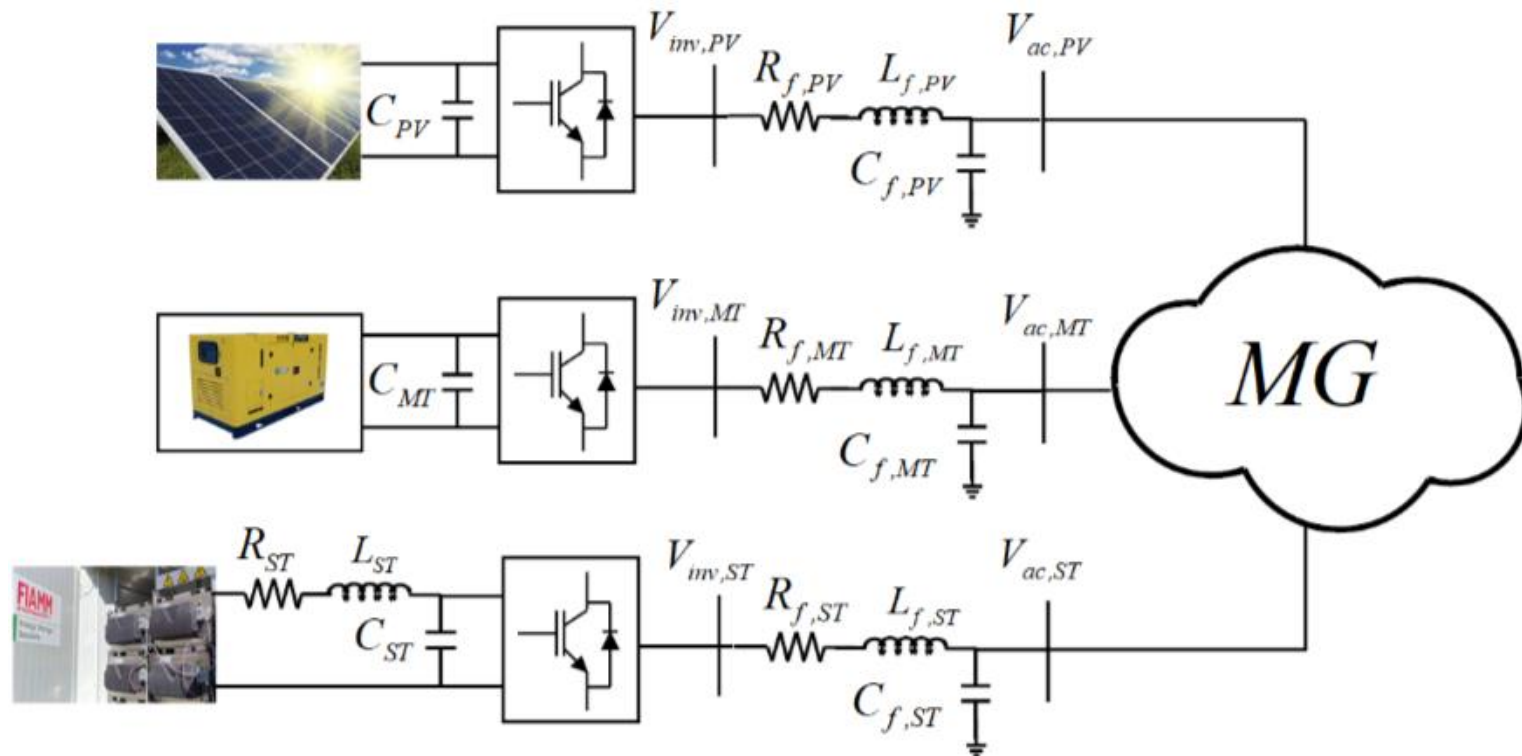
(통신필요없지만 전압과 주파수 오차),

2. master slave control

(통신이 필요해 복잡성 상승)



MPC기반제어 사용

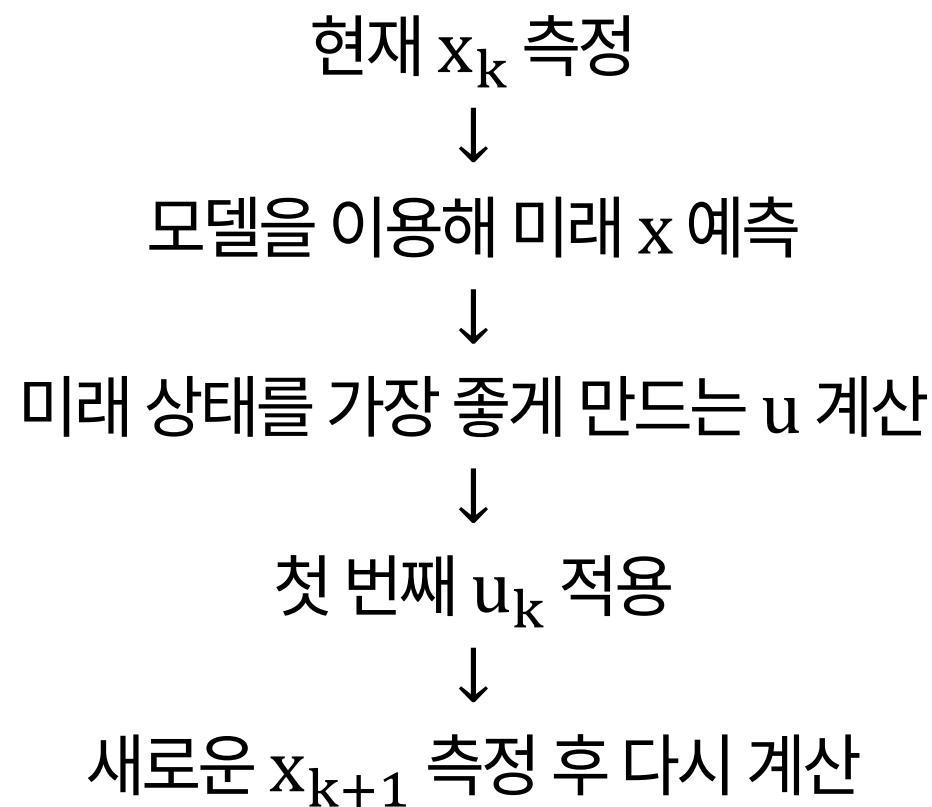


02 MPC Controllers: Theory and Design

MPC 이론(MPC란?)

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + f_k$$

현재 상태와 제어 입력을 이용하여 다음 시점의 시스템 상태를 예측한다.



02 MPC Controllers: Theory and Design

MPC 목적함수와 제약조건

$$\min_U \sum_{i=0}^{N-1} \overset{\text{상태 오차 최소화}}{(x - x_{ref})_{k+i|k}^T Q (x - x_{ref})_{k+i|k}} + \overset{\text{과도한 제어 입력 방지}}{(u - u_{ref})_{k+i}^T R (u - u_{ref})_{k+i}} + \overset{\text{출력 오차 최소화}}{(y - y_{ref})_{k+i}^T S (y - y_{ref})_{k+i}}$$

목적함수 : DC 전압과 발전 전력(x)을 잘 유지하면서, 주파수(u)를 정격으로 맞추고, 결과적으로 원하는 무효 전력(y)을 공급하라

$$\begin{aligned} H_u U_{k+i} &\leq K_u, \quad i = 0, \dots, N-1 \\ H_x X_{k+i} &\leq K_x, \quad i = 0, \dots, N-1 \\ H_y Y_{k+i} &\leq K_y, \quad i = 0, \dots, N-1 \end{aligned}$$

제약조건 : H, K를 사용해 U, X, Y의 범위를 제한

02 MPC Controllers: Theory and Design

MPC 제어기 설계 – 마이크로터빈

마이크로터빈 → DC전력 → DC-link 커패시터 → 인버터 → AC 마이크로그리드

$$P_{ac,MT} = \frac{3m_{a,MT}V_{dc,MT}V_{ac,MT}}{2\sqrt{2}x_f} \sin\left(\theta_{MT0} - \varphi_{f,MT} + \int_0^t (\omega_{MT} - \omega_{f,MT})d\tau\right)$$

$$\delta_{MT} = \int_0^t (\omega_{MT}(\tau) - \omega_{f,MT}(\tau)) d\tau$$

$$P_{dc,MT} - P_{ac,MT} = V_{dc,MT}C_{MT} \frac{dV_{dc,MT}}{dt}$$

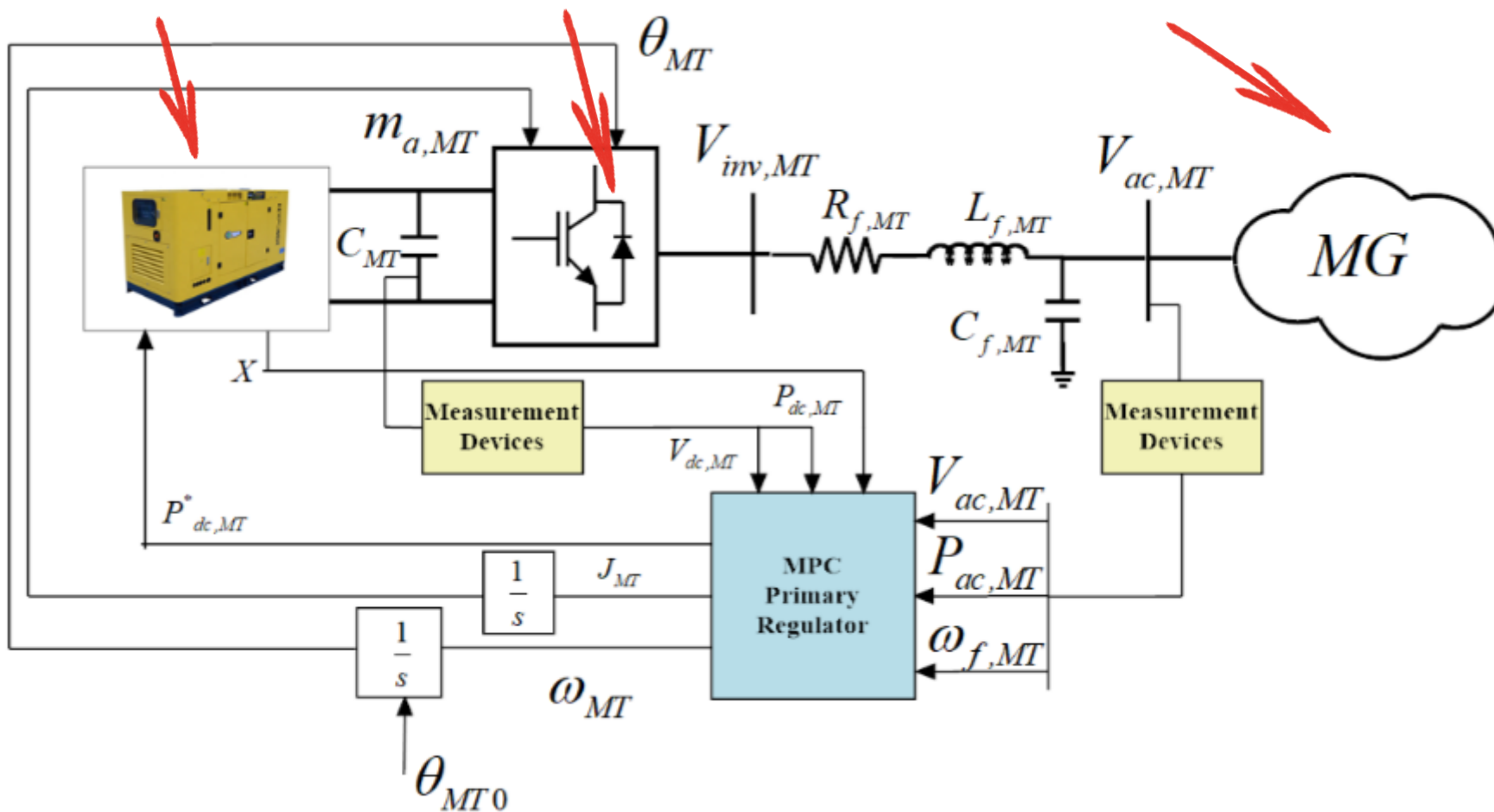
따라서 **DC-link 전압**을 보면 마이크로터빈 쪽에서 **전력이 남는지 부족한지** 알 수 있다.

이 논문에서 말하는 통신 없이 제어할 수 있는 이유가 있는 중요한 수식

그럼 MPC는 뭐하는가

02 MPC Controllers: Theory and Design

마이크로터빈 → DClink → 인버터 → 필터 → AC 마이크로그리드



1. MPC 측정 : $v_{dc}, P_{dc}, v_{ac}, p_{ac}, w_f$
2. 미래 예측
3. 최적 명령 계산
4. MPC 출력 : P_{dc}^*, w_{MT}, J_{MT}
5. 반복

02 MPC Controllers: Theory and Design

1. MPC 측정 : $v_{dc}, P_{dc}, v_{ac}, p_{ac}, w_f$

2. 미래 예측

3. 최적 명령 계산

4. MPC 출력 : P_{dc}^*, w_{MT}, J_{MT}

5. 반복

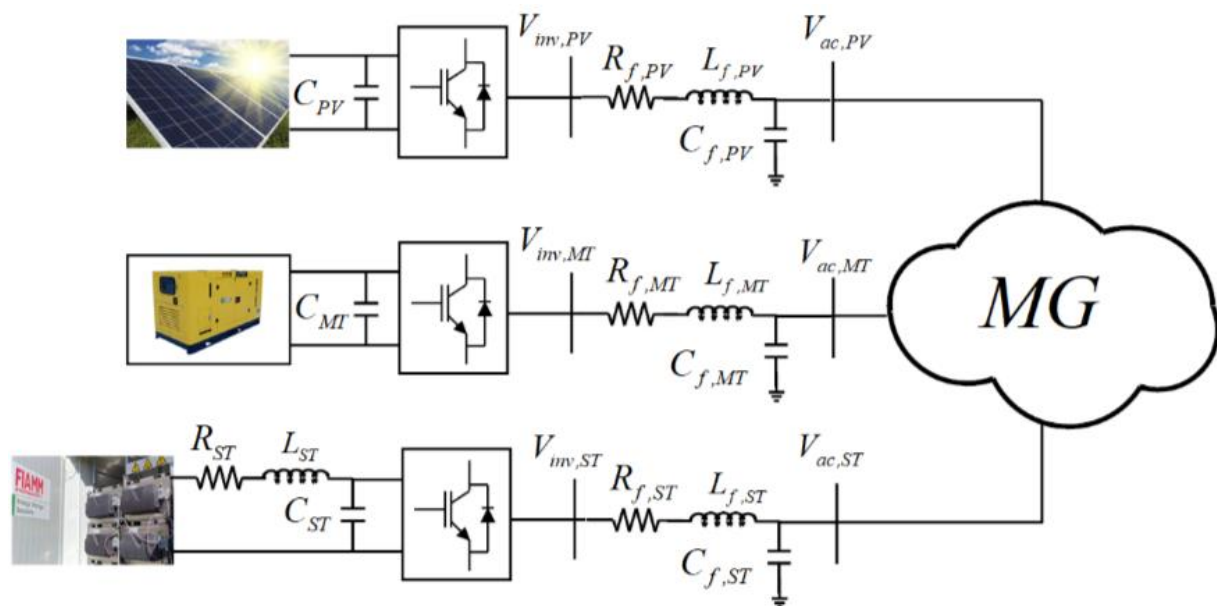
$$P_{dc}^* \text{ (마이크로 터빈 출력)} : P_{dc,MT} - P_{ac,MT} = V_{dc,MT} C_{MT} \frac{dV_{dc,MT}}{dt}$$

w_{MT} (인버터 주파수, 위상 조절) vs droop control

J_{MT} (변조지수, 전압 조절) vs droop control

02 MPC Controllers: Theory and Design

ST, PV, MT의 운전모드



Slack VS PQ

Source

Slack Bus

PQ Bus

ST 배터리

전압·주파수 유지, 부족·과잉 전력 보상

정해진 총·방전 전력 유지

PV 태양광

사용 x

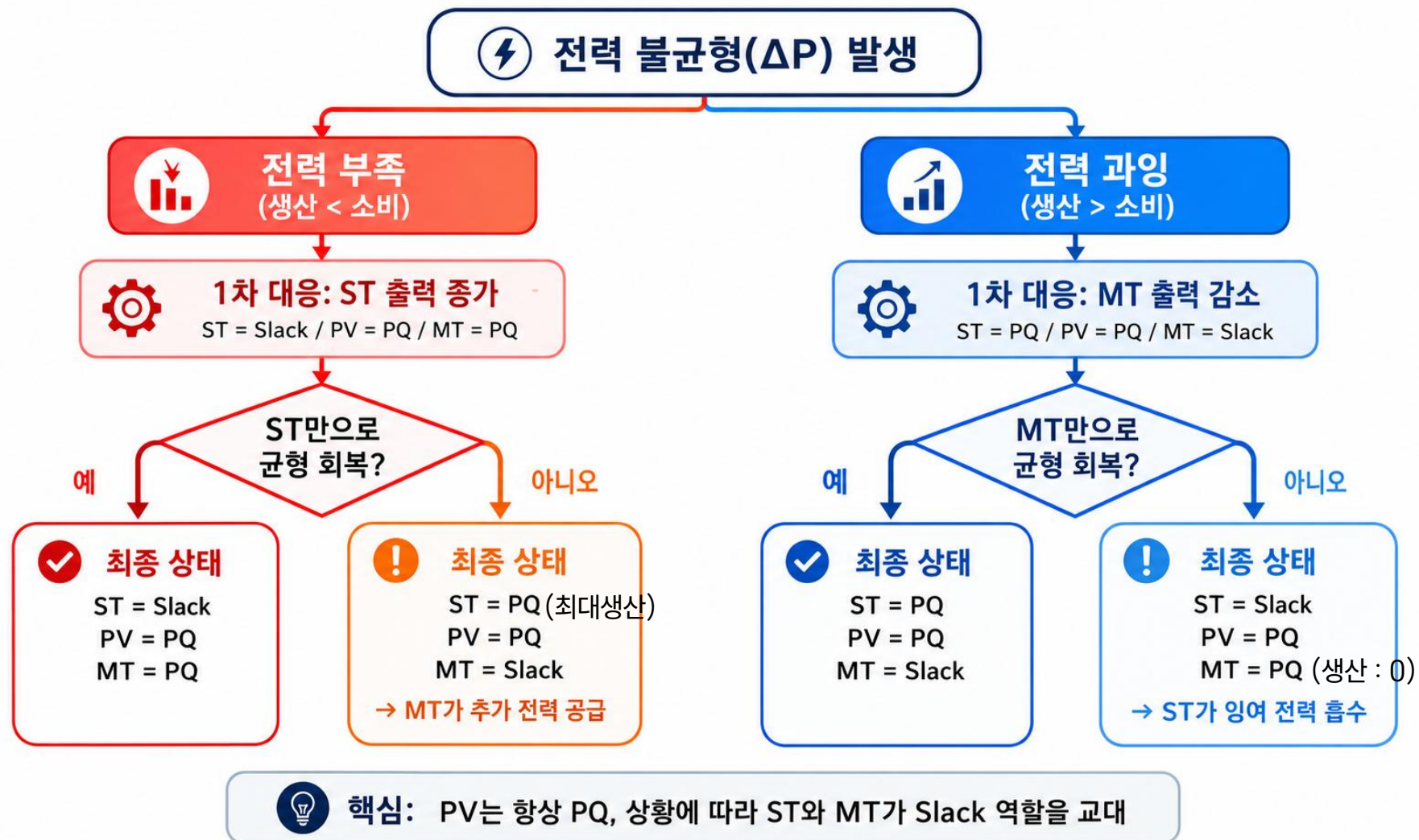
최대 태양광 전력 공급

MT 마이크로터빈

전압·주파수 유지, 발전량 자동 조절

정해진 발전량 유지

03 Operation Modes



04 Simulations and Results

SimulationA : 전력이 약간 부족한 상태에서의 실험 결과

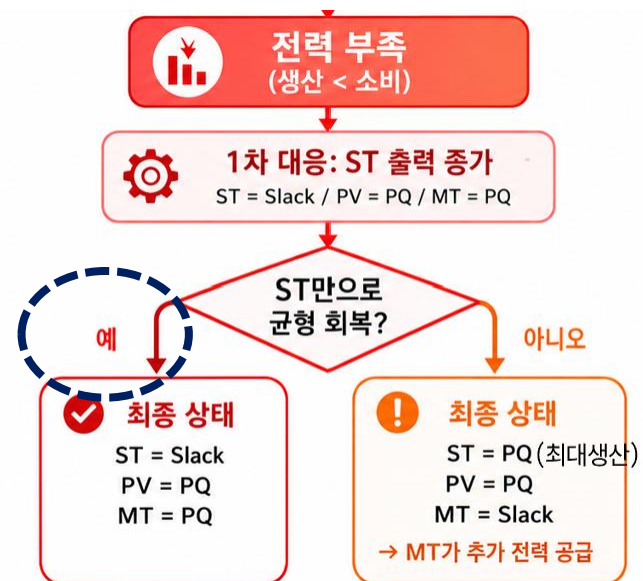
SimulationB : 전력이 매우 부족한 상태에서의 실험 결과

SimulationC : 전력이 약간 남는 상태에서의 실험 결과

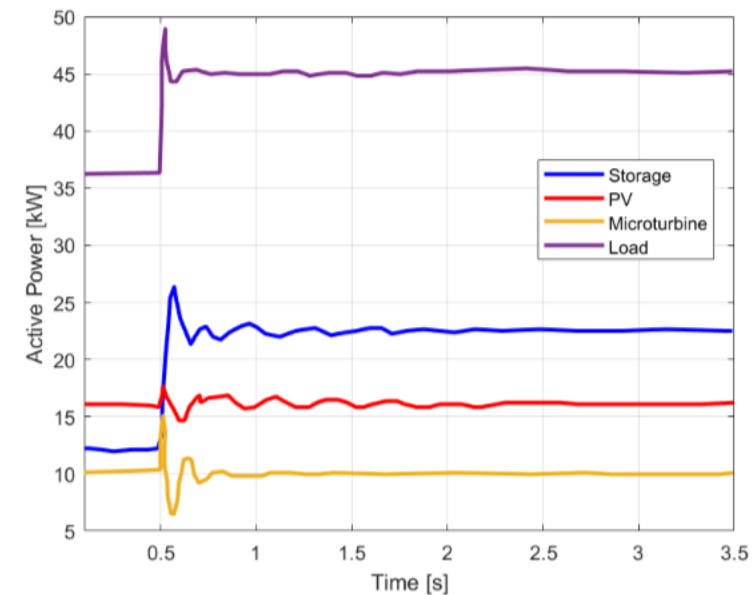
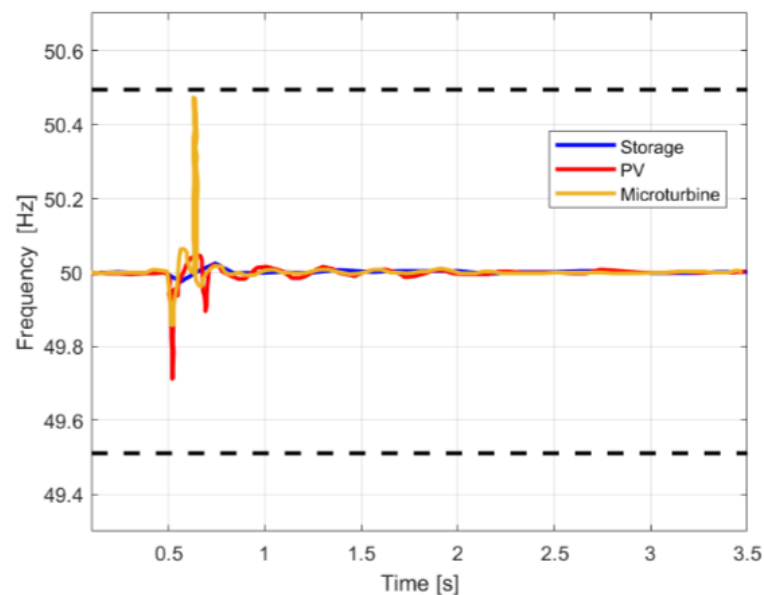
SimulationD : 전력이 매우 남는 상태에서의 실험 결과

시뮬레이션 조건 : 주파수 제한: 49.5 – 50.5 Hz, 목표 주파수: 50 Hz, ST 최대 방전: 60 kW, MT 최대 출력: 30 kW

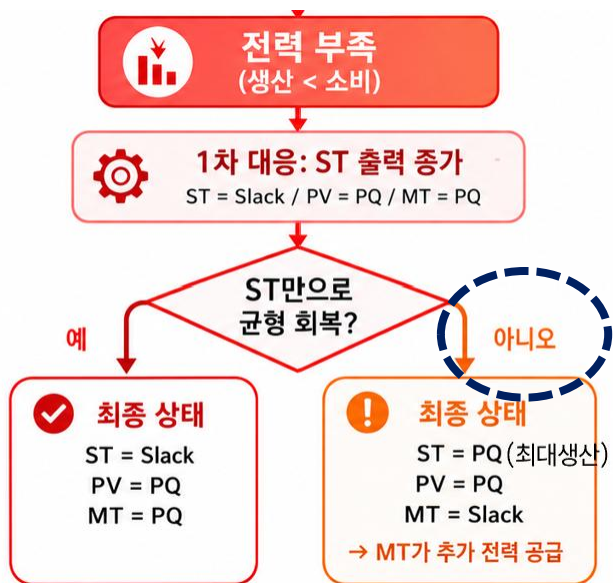
04 Simulations and Results



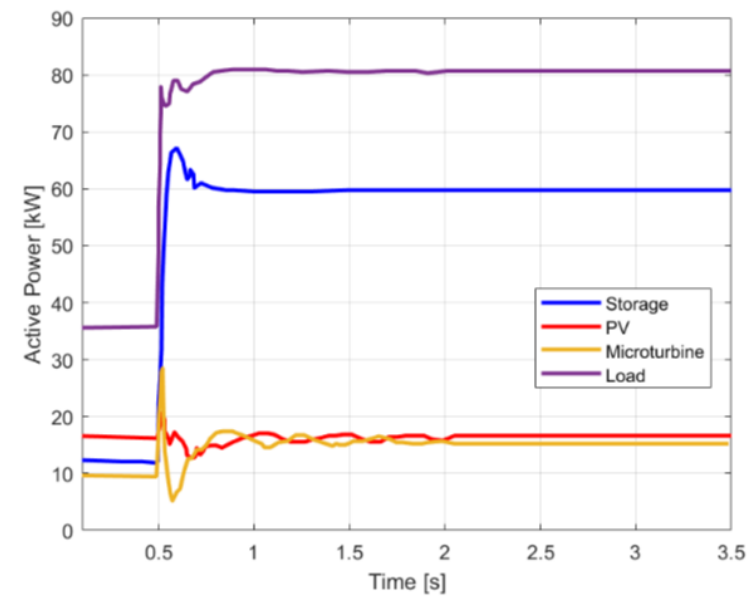
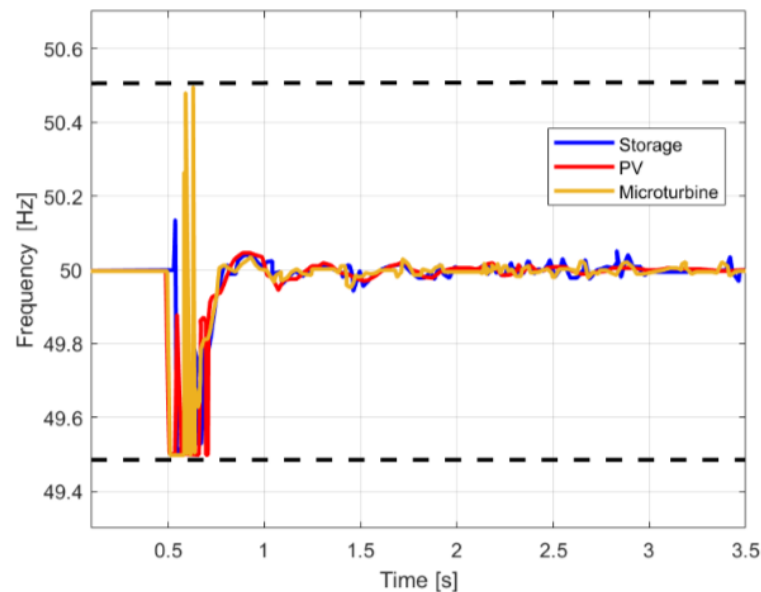
	Initial Value	Final Value
P_{load}	36 kW	45 kW
Load resistance	4 Ω	3 Ω
$P_{MT,DC}$	10 kW	10 kW
$P_{ST,DC}$	12 kW	23 kW
$P_{PV,DC}$	15.8 kW	15.8 kW



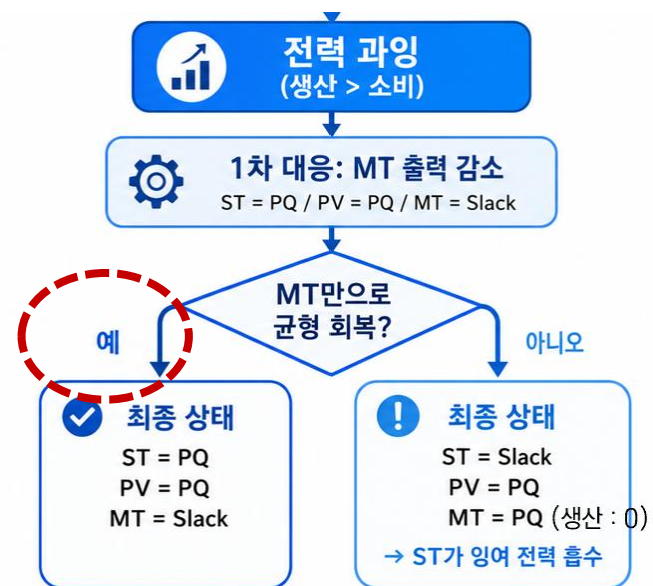
04 Simulations and Results



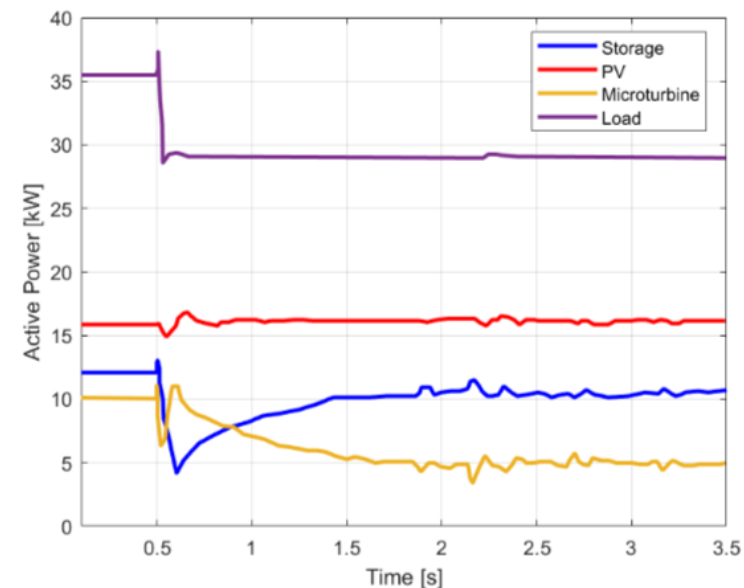
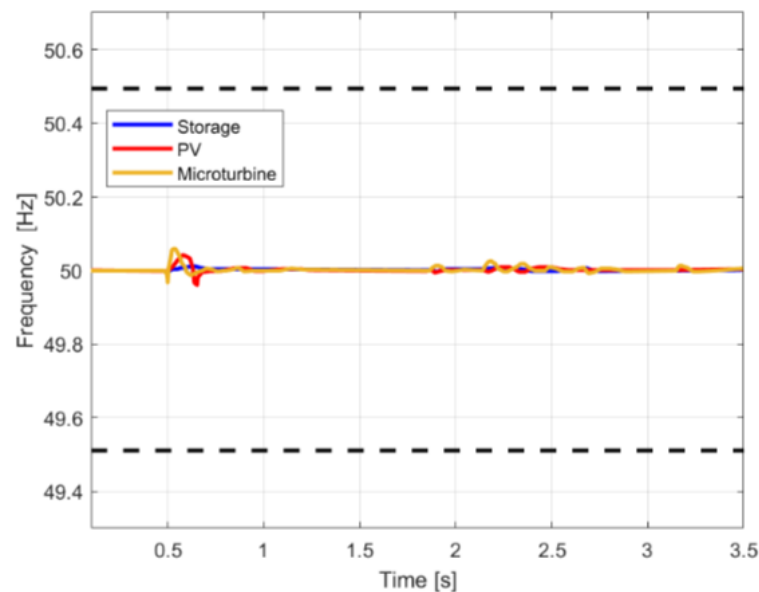
	Initial Value	Final Value
P_{load}	36 kW	80 kW
Load resistance	4 Ω	1.5 Ω
$P_{MT,DC}$	10 kW	16 kW
$P_{ST,DC}$	12 kW	60 kW
$P_{PV,DC}$	15.8 kW	15.8 kW



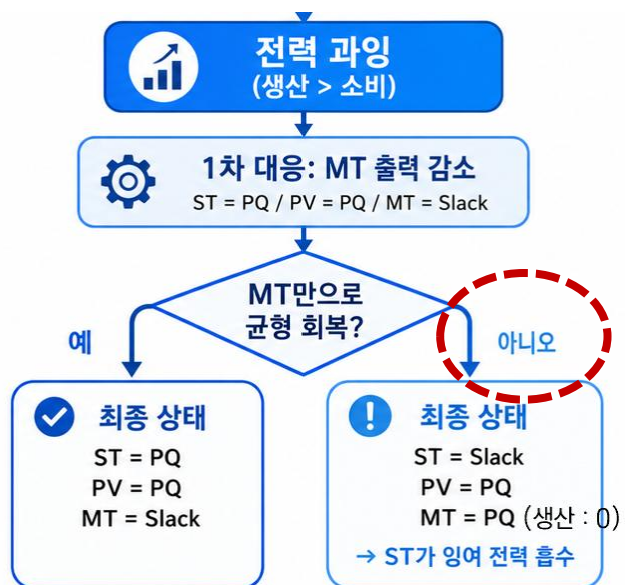
04 Simulations and Results



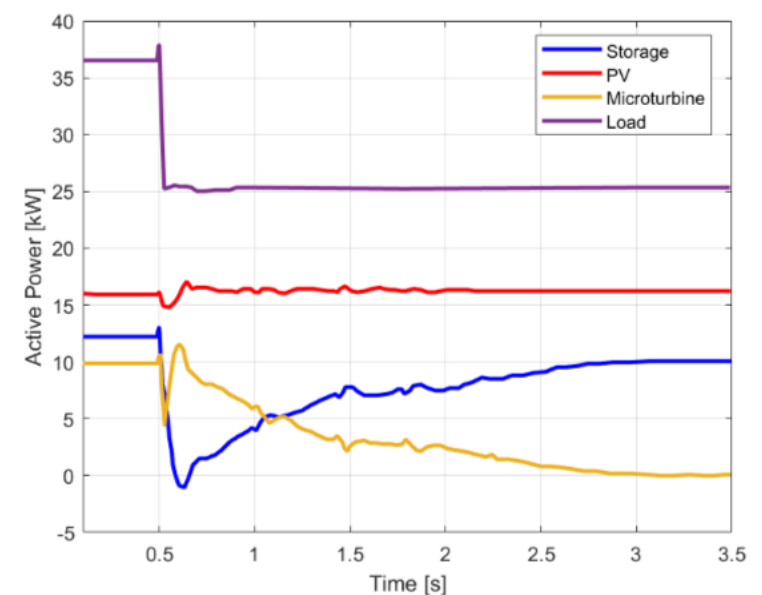
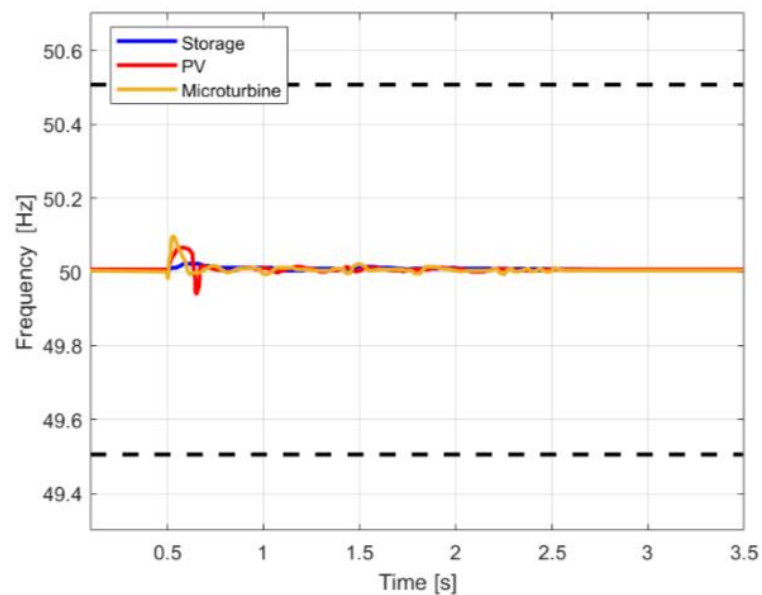
	Initial Value	Final Value
P_{load}	36 kW	19 kW
Load resistance	4 Ω	5 Ω
$P_{MT,DC}$	10 kW	4.8 kW
$P_{ST,DC}$	12 kW	12 kW
$P_{PV,DC}$	15.8 kW	15.8 kW



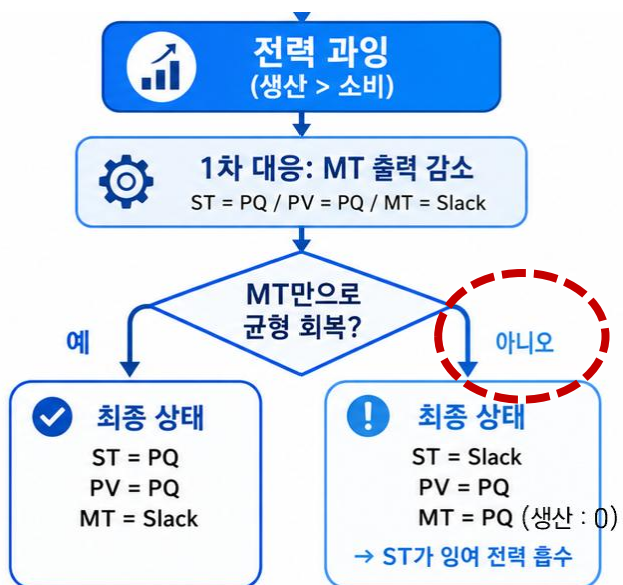
04 Simulations and Results



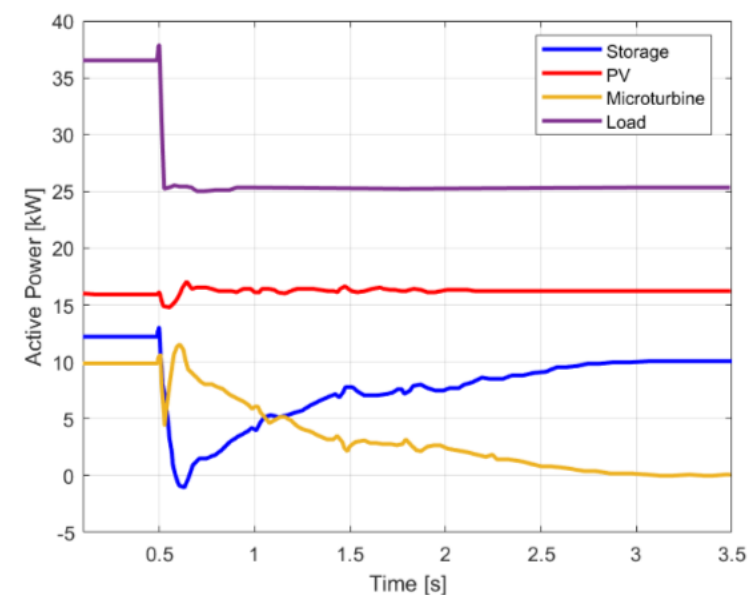
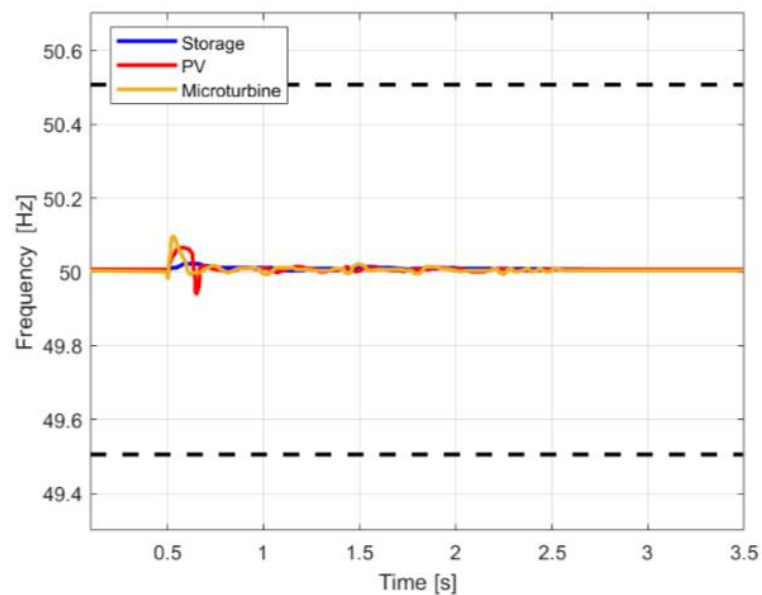
	Initial Value	Final Value
P_{load}	36 kW	25 kW
Load resistance	4 Ω	6 Ω
$P_{MT,DC}$	10 kW	0 kW
$P_{ST,DC}$	12 kW	10 kW
$P_{PV,DC}$	15.8 kW	15.8 kW



04 Simulations and Results



	Initial Value	Final Value
P_{load}	36 kW	25 kW
Load resistance	4 Ω	6 Ω
$P_{MT,DC}$	10 kW	0 kW
$P_{ST,DC}$	12 kW	10 kW
$P_{PV,DC}$	15.8 kW	15.8 kW



04 Simulations and Results

MPC의 역할?????

1. 전력이 부족하면 많이 생산하게 하고 남으면 적게 생산하게 하는 역할
2. ST가 slack 역할, MT가 pq역할을 하게 명령을 내리는 역할
3. ST,MT가 명령에 따라 출력을 제어 할 때 주파수, 전압이 안정적으로 출력하게 하는 역할

$$P_{ST} \leftarrow P_{ST} + 20 \text{ kW}$$

+20, 0, 0

+10, +6, +3, +1

05 Conclusions

실험 결과

전력 상황	대응 과정	최종 Slack
소규모 전력 부족	ST 출력 증가	ST
대규모 전력 부족	ST 한계 도달 → MT 증가	MT
소규모 잉여 전력	MT 출력 감소	MT
대규모 잉여 전력	MT 출력 0 → ST 조절	ST

최종 결론

제어 방식	장점	한계
Droop Control	통신 불필요	정상상태 전압·주파수 오차
Master-Slave	정상상태 오차 없음	통신 필요
제안된 MPC	통신 불필요, 정상상태 오차 제거	모델 필요

Control / Robotics

Thank you

송실대학교 전기공학부 학술 소모임 NOVA

발표자 : 권용현