NOVA

Power/Energy Track

A New Virtual Synchronous Generator-Based Power Control Method for Enhancing the Frequency Stability Contribution of Grid-Forming Inverters

Ki-Hyun Kim1, Obi Stephen Arinze1, Sheng-Hui Cui2, and Jae-Jung Jung†

The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 29, No. 4, August 2024

Contents

01 서론 및 연구 배경

02 그리드포밍 인버터 모델링

03 기존 가상동기발전기 제어법

04 Hybrid PLC

05 시뮬레이션 결과 및 분석

06 결론

01 서론 및 연구배경 : 재생에너지 확대에 따른 전력계통의 변화

연구 배경

1. 재생에너지 발전 비중 증가

- 태양광 및 풍력 발전의 확대에 따라 인덕터 기반 자원(IBR)의 계통 연계 증가

2. 기존 전력계통 구조 변화

- 동기발전기 중심의 전력계통에서 인버터 기반 자원(IBR)의 비중이 증가하는 구조로 변화

3. 계통 안정성 문제

- 동기발전기 비중 감소에 따른 계통 관성 및 댐핑 부족 우려



01 서론 및 연구배경 : 계통 관성 감소와 주파수 안정성

인버터 기반 자원(Inverter-Based Resource)

인버터를 통해 전력계통에 연결되는 에너지 자원

기존의 IBR은 Grid-Following(계통 추종형, GFL) 제어방식 사용하며 기존의 방식은 광성과 댐핑을 제공 안했음

계통 관성(System Inetria)

동기발전기의 회전에 운동에너지에 의해 주파수의 급격한 변화를 억제하는 특성

관성 감소 시 동일한 전력 불균형에 대한 주파수 변화율(RoCoF)증가

댐핑(Damping)

계통에 발생하는 진동을 감쇠 시키는 특성

댐핑 부족 시 주파수 및 전력 진동이 쉽게 느려질 수 있음



01 서론 및 연구배경 : GFL과 GFM 인버터의 차이

Grid–Following (GFL, 계통 추종형)

- PLL(Phase-Locked Loop)을 이용하여 계통의 위상 및 주파수 추종
- 기존 계통 전압을 기준으로 전류 및 전력 제어
- 일반적으로 계통 관성과 댐핑을 자체적으로 제공하지 않음

Grid-Forming (GFM, 계통 형성형)

- PLL 없이 계통과의 전력 교환을 통해 동기화
- 인버터가 전압의 크기 및 주파수를 형성하는 방식
- 동기발전기의 특성을 모사하여 가상 관성과 댐핑 제공 가능

GFL은 계통을 추종하지만, GFM은 계통 전압을 형성하고 주파수 안정성에
능동적으로 기여할 수 있음

01 서론 및 연구배경 : GFL과 GFM 인버터의 차이

	GFL	GFM
동기화	PLL로 계통 추종	전력 교환을 통한 동기화
제어 기준	계통의 전압 위상	자체로 형성되는 주파수
관성 응답	미제공	제공
주파수 하락시	별도 지원 필요	관성 및 드롭 응답으로 구현가능
약계통	PLL에 따라서 불안정	PLL에 따른 불안정 문제 완화

GFM은 논문이 목표로 하는 주파수 안정성 확보에 유리한 제어 기능을 구현할 수 있다는 것

01 서론 및 연구배경 : 기존 제어기법의 한계 및 연구목적

기존 GFM 전력 제어기법의 한계

1. 토크방정식 기반 제어

- 동기발전기의 관성 및 댐핑 특성 모사
- 댐핑과 드룹 특성이 결합되어 독립적인 제어에 한계

2. PI 기반 전력 제어기

- 내재된 드룹을 제거하고 별도의 드룹 제어 적용 가능
- 전력 지령 변화(급변)시 오버슈트 발생 가능

3. IP 기반 전력 제어기

- PI 제어기의 영점 제거로 오버슈트 특성 개선
- 드룹에 따른 주파수 응답이 상대적으로 느림

01 서론 및 연구배경 : 기존 제어기법의 한계 및 연구목적

본 논문의 연구 목적

PI와 IP 제어기의 장점을 결합한 Hybrid PLC 제안

정상 전력 지령 : 안정적인 응답

계통 주파수 교란 : 빠른 유효전력 응답

최종 목표 : 주파수 최저점 개선

이해하기 쉽게 하는 법 BJT + MOSFET = IGBT 와 같은 결합형태

드룹 제어 : 계통 주파수가 떨어지면 유효전력 출력을 늘리고, 주파수가 올라가면 유효전력 출력을 줄이는 제어 방식

02 그리드포밍 인버터 모델링 : GFM 인버터 전체 시트템 구조

그리드포밍 인버터의 기본 구성

1. 전력변환부 (Inverter) : DC를 AC로

2. LC 필터 (LC Filter) : 고주파 성분 제거

3. 내부 제어 루프 (Inner Control Loop) : 출력 전압 제어

4. 외부 전력 제어 루프 (Power Control Loop) : 유효, 무효전력 제어

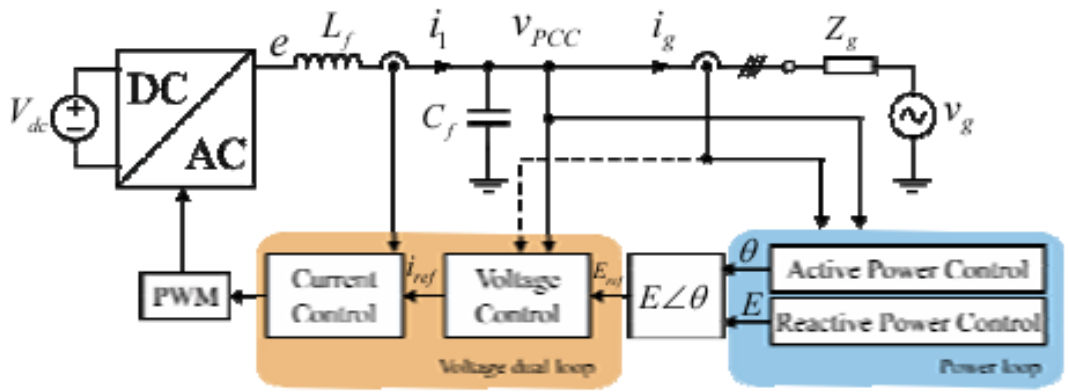


Fig. 1. Grid forming inverter system

V_{dc} : 직류측 전압

e : 인버터 출력 전압

L_f : 필터 인버터

C_f : 필터 커패시터

v_{PCC} : 공통접속점 전압

i_g : 계통 전류

Z_g : 계통 임피던스

v_g : 계통 전압

$E\angle\theta$: 가상 유기기전력 (동기발전기의 내부 유기기전력을 모사하기 위한 제어 지령)

02 그리드포밍 인버터 모델링 : GFM 인버터 전체 시트템 구조

LC 필터 모델링

- 인덕터와 커패시터로 구성된 피드백 루프
- 인버터 출력의 고주파 성분을 억제
- LC 필터의 전기적 특성을 전달함수로 모델링

내부 전압 제어 루프

- 가상 유기기전력 지령을 기준으로 출력 전압 제어
- 전압 피드백을 통해 지령 전압을 추종
- 출력 임피던스 및 전압 응답 특성 분석

목적 : 인버터의 전압 응답과 출력 임피던스를 모델링하여 계통 연계 안정도 분석의 기반 확보

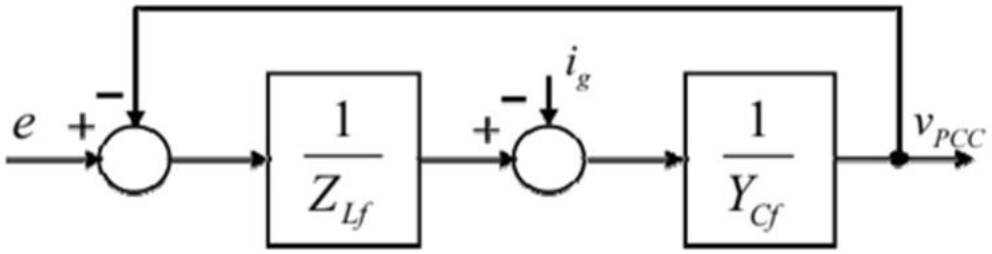


Fig. 2. LC filter open loop block diagram

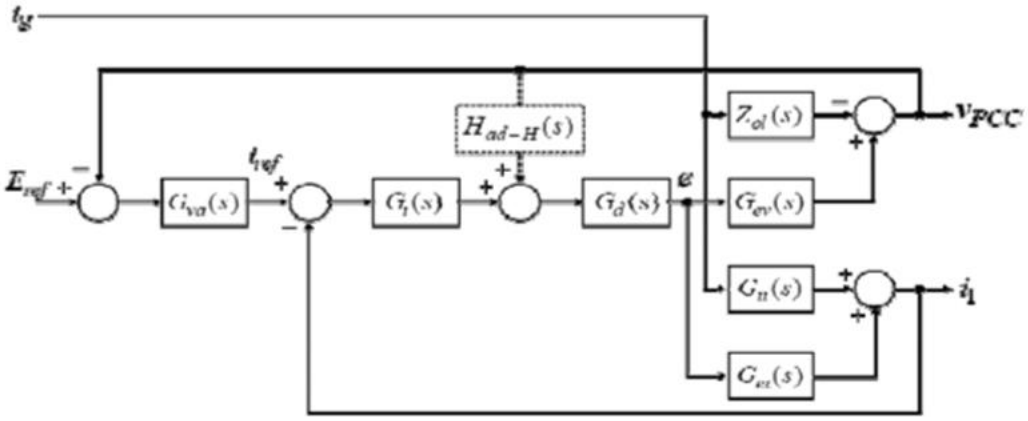


Fig. 3. Voltage close-loop block diagram

02 그리드포밍 인버터 모델링 : 계통 임피던스와 공진 현상

계통 임피던스

- 계통 저항 R과 인덕턴스 L로 구성 = Z
- 계통 전류 및 유효, 무효전력 전달 특성에 영향

인버터와 계통의 임피던스 모델

- 인버터 출력 임피던스와 계통 임피던스를 고려
- 내부 전압 루프를 생략한 등가회로를 이용해 전력 교환 특성 분석
- 빠른 전력전자 시스템에서는 전자기적 과도현상 고려 필요

동기화 공진 문제

- 계통 저항이 매우 작은 경우 동기 주파수 부근에서 공진 발생 가능
- 공진 억제를 위한 능동 댐핑 필요

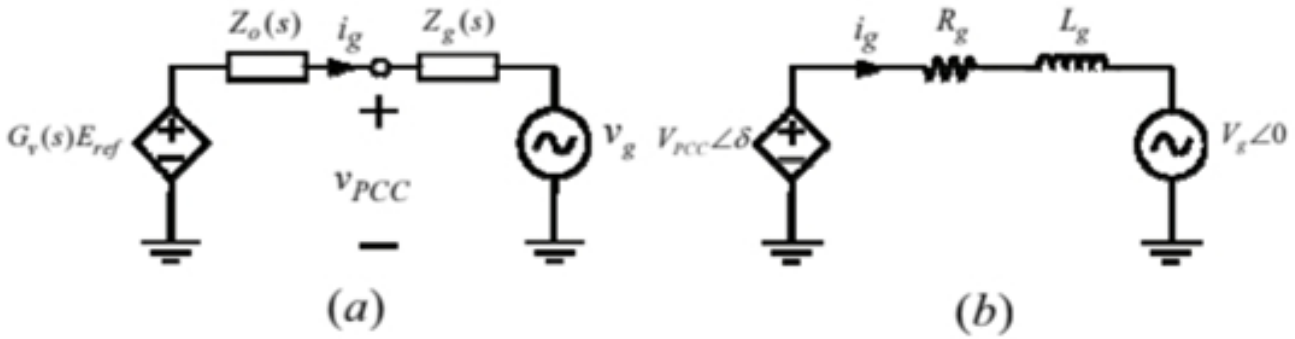


Fig. 4. (a) Impedance model
(b) Simplified model ignoring inner voltage loop

02 그리드포밍 인버터 모델링 : 능동 댐핑의 필요성

가상 임피던스를 제어기에 적용하면 실제 저항을 추가하지 않고도 공진을 감쇠시킬 수 있다.

능동 댐핑의 필요성

- 계통 저항이 작을 경우 동기 주파수 부근에서 공진 발생 가능
- 공진에 따른 전력 진동을 억제하기 위한 댐핑

가상 임피던스를 이용한 능동 댐핑

- 제어 알고리즘으로 가상 저항 및 인덕턴스 구현
- 실제 회로의 수동소자 추가 없이 전력 교환 특성 조절
- 가상 저항이 과도하게 크면 비정상적인 전력 교환 발생 가능

능동 댐핑 적용 효과

- 동기화 공진 성분 억제
- 외부 전력 루프의 공진 안정도 개선

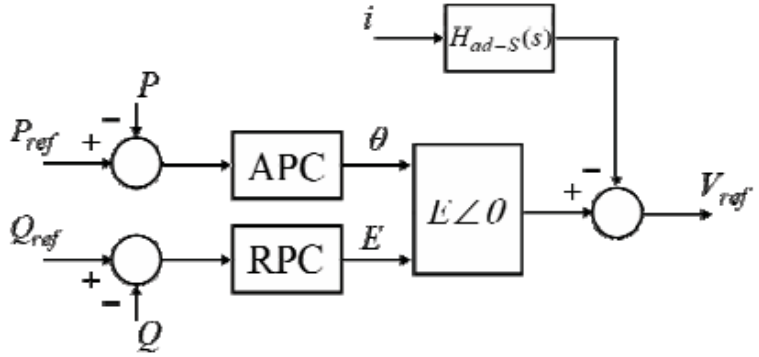


Fig. 5. Active damping method for outer power loop

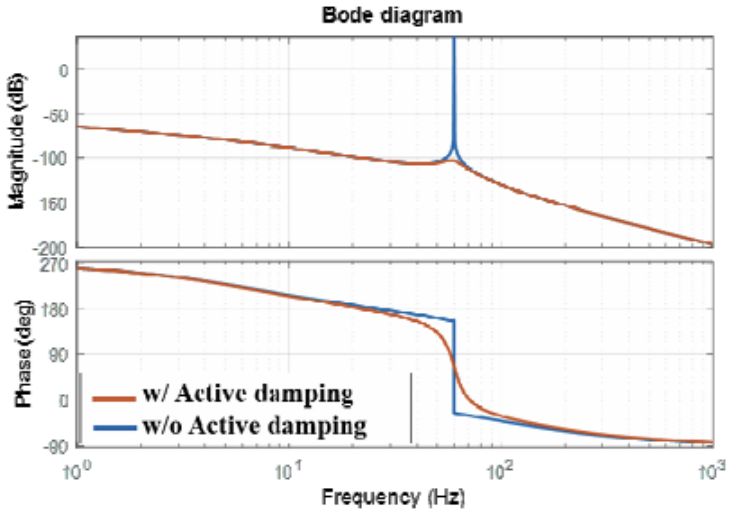


Fig. 7. Bode plot of outer power control loop

03 기존 가상동기발전기 제어법 : 기본 원리

가상동기발전기(VSG)

- 동기발전기의 전기기계적 동특성을 제어 알고리즘으로 모사
- 외부 유효전력 제어기(PLC)를 통해 계통과 동기화

식(23) 동기발전기의 토크방정식

$$\frac{P_m}{\omega_s} - \frac{P_e}{\omega_s} = J\frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \qquad (23)$$

식(24) 유효전력과 위상각의 관계

$$P_e = \frac{EV}{X}\sin\delta \approx \frac{EV}{X}\delta \qquad (24)$$

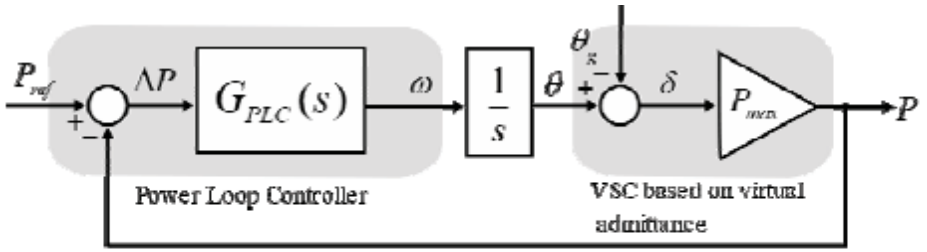


Fig. 8. Close-loop blockdiagram of active power control

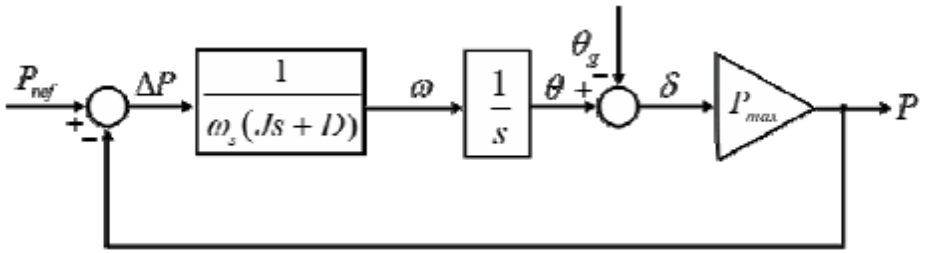


Fig. 9. Close-loop blockdiagram of synchronous generator

전력 불균형 → 관성·댐핑에 따른 동특성(23) → 주파수 및 위상각 변화(24) → 유효전력 조절

03 기존 가상동기발전기 제어법 : 토크방정식 기반 제어와 내재된 드룹 특성

토크방정식 기반 유효전력 제어

- 동기발전기의 관성 및 댐핑 특성 모사
- 2차 시스템 형태의 폐루프 전달함수 도출

$$\frac{\partial P}{\partial P_{ref}}(s) = \frac{\frac{P_{\max}}{J\omega_s}}{s^2 + \frac{D}{J}s + \frac{P_{\max}}{J\omega_s}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (25)$$

내재된 드룹(Inherent Droop) 발생

- 계통 주파수 변화에 따라 유효전력 출력 변화
- 트룹 특성이 댐핑상수 D와 결합됨

$$\frac{\partial P}{\partial \omega_g}(s) = \frac{-P_{\max}(s + 2\xi\omega_n)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \omega_g}(0) = \frac{-2\xi P_{\max}}{\omega_n} \quad (27)$$

개선 할 내용

- PI 기반 전력 제어기로 내제된 드룹 제거
- 별도의 상위 드룹 제어기를 통한 주파수 제어

토크방정식 기반 VSG 제어는 관성과 댐핑을 모사할 수 있지만, 댐핑과 내재된 드룹 특성이 결합되어 독립적인 제어가 어렵다.

03 기존 가상동기발전기 제어법 : PI 기반 전력 제어기와 오버슈트 문제

PI 기반 전력 제어기 (PI-PLC)

- 비례(Proportional) 및 적분(Integral) 제어를 결합
- 적분 제어를 통해 정상상태 전력 오차 제거
- 기존 토크방정식 기반 제어의 내재된 드룹 제거

$$G_{PLC}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \tag{28}$$

$$\frac{\partial P}{\partial P_{ref_new}}(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{29}$$

$$\xi = \frac{K_P}{2}\sqrt{\frac{P_{\max}}{K_I}}, \quad \omega_n = \sqrt{P_{\max} K_I} \tag{30}$$

$$K_I = \frac{\omega_s}{2HS_N}, \quad K_P = \xi\sqrt{\frac{2\omega_s}{P_{\max} HS_N}} \tag{31}$$

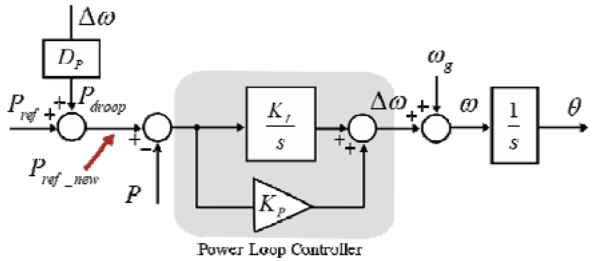


Fig. 10. PI controller based PLC

PI 제어기의 장점

- 댐핑과 내재된 드룹의 결합 문제 해소
- 별도의 상위 드룹 제어기를 통한 독립적인 1차 주파수 제어 가능

PI 제어기의 한계

- 폐루프 전달함수에 좌반평면 영점(LHP Zero) 발생
- 전력 지령 변화 시 오버슈트 발생
- 과도한 전력 응답은 인버터의 과도안정도에 영향 가능

$$\frac{\partial P}{\partial \omega_g}(s) = \frac{-P_{\max} s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{32}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \omega_g}(0) = 0 \tag{33}$$

드룹 제거됨!

03 기존 가상동기발전기 제어법 : IP 기반 전력 제어기의 특성과 한계

IP 기반 전력 제어기

- 적분(Integral) 및 비례(Proportional) 제어를 결합
- 비례 제어를 피드백 경로에 배치
- PI 제어기의 폐루프 영점을 제거하여 오버슈트 특성 개선

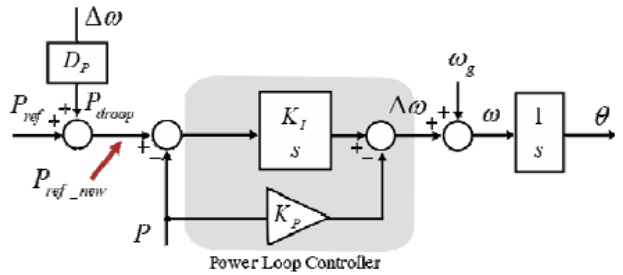


Fig. 11. IP controller based PLC

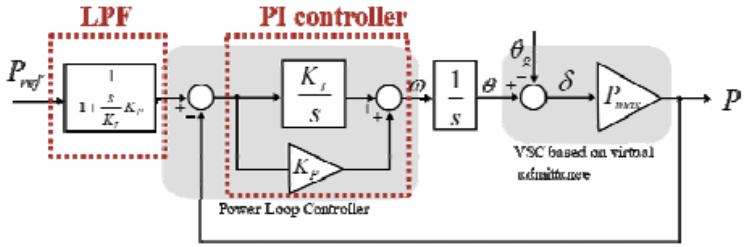


Fig. 12. Equivalent blockdiagram of IP controller based PLC

2. IP 제어기의 등가 구조

- 유효전력 지령에 저역통과필터(LPF)를 적용한 PI 제어기와 수학적으로 동등
- 지령 변화에 대한 급격한 전력 응답을 완화

$$\frac{\partial P}{\partial P_{ref_new}}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \qquad (34)$$

분자가 다르다 PI와 IP

3. IP 제어기의 한계

- 상위 드룹 제어기의 전력 지령도 필터링됨
- 주파수 하락 시 유효전력 공급이 상대적으로 지연
- 빠른 주파수 응답(FFR) 및 주파수 최저점 개선에 불리

IP 기반 PLC는 폐루프 영점을 제거하여 전력 응답을 개선하지만, 드룹 지령의 필터링으로 인해 빠른 주파수 지원에 한계가 있다.

03 기존 가상동기발전기 제어법 : PI·IP 제어기 비교 및 한계

PI 기반 PLC
장점: 빠른 드룹 응답
한계: 전력 오버슈트

IP 기반 PLC
장점: 정상 전력 응답 개선
한계: 드룹 응답 지연

Hybrid PLC
정상 전력 지령은 IP 특성, 드룹 지령은 PI 특성을 활용해보자

04 Hybrid PLC: 제안 배경 및 핵심 아이디어

기존 제어기법의 한계

- PI-PLC : 빠른 전력 응답이 가능하지만 오버슈트 발생
- IP-PLC : 정상 전력 응답은 개선되지만 드룹 응답 지연

Hybrid PLC 제안

- PI와 IP 기반 전력 제어기의 장점을 결합
- 정상 유효전력 지령에는 IP와 유사한 응답 적용
- 주파수 드룹 지령에는 PI와 유사한 빠른 응답 적용

연구 목표

- 정상 운전 시 전력 오버슈트 억제
- 계통 주파수 하락 시 신속한 유효전력 공급
- 주파수 최저점(Frequency Nadir) 개선

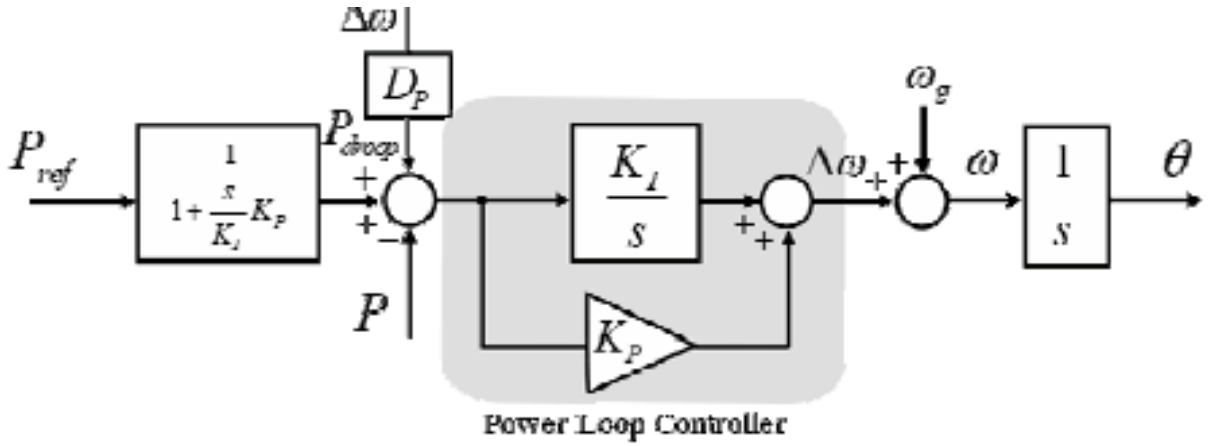


Fig. 13. Proposed Hybrid PLC

Hybrid PLC는 정상 전력 지령에는 IP형 응답을, 드룹 지령에는 PI형 응답을 적용하여 정상 운전 안정성과 빠른 주파수 지원을 동시에 확보한다

04 Hybrid PLC: Hybrid PLC 제어 구조 및 동작 원리

1. 정상 유효전력 지령

- 저역통과필터(LPF)를 통과하여 제어기에 전달
- 페루프 영점 제거 → IP 기반 PLC와 동일한 응답 특성
- 정상 운전 시 전력 오버슈트 억제

2. 주파수 드룹 지령

- 계통 주파수 편차에 따라 생성
- LPF를 거치지 않고 제어기에 전달
- PI 기반 PLC와 동일한 빠른 전력 응답

3. Hybrid PLC의 핵심

- 전력 지령별로 서로 다른 페루프 응답 구현
- 정상 운전 안정성 확보 + 빠른 1차 주파수 제어

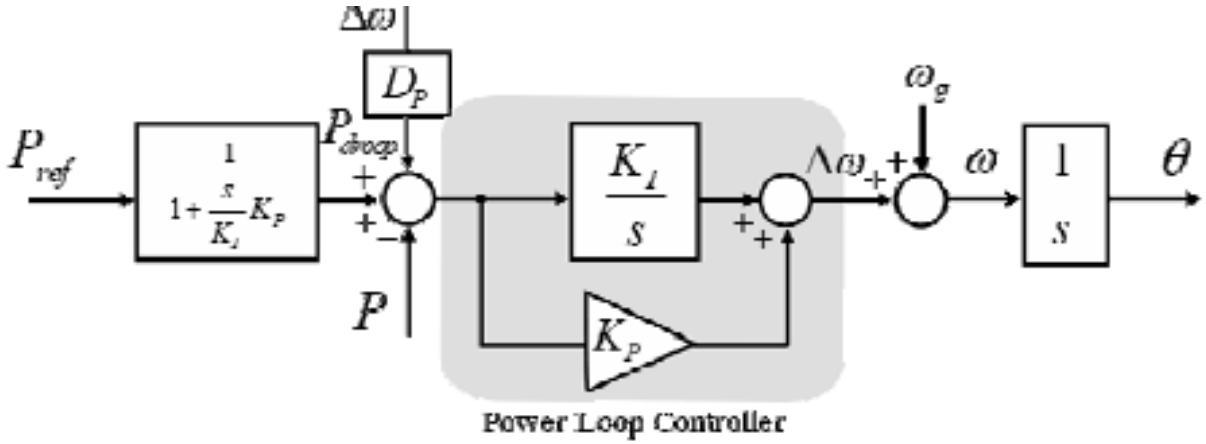


Fig. 13. Proposed Hybrid PLC

$$\frac{\partial P}{\partial P_{ref}}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (36)$$

$$\frac{\partial P}{\partial P_{droop}}(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (37)$$

Hybrid PLC는 정상 전력 지령만 LPF를 통과시키고 드룹 지령은 우회시켜, 하나의 제어기에서 안정적인 전력 응답과 빠른 주파수 지원을 구현한다.

04 Hybrid PLC: Hybrid PLC의 전달함수 및 동작 특성

1. 정상 유효전력 지령 응답 – 식 (36)

- IP 제어기와 동일한 폐루프 전달함수
- 영점이 없어 PI 제어기에서 나타나는 영점 유발 오버슈트 억제

$$\frac{\partial P}{\partial P_{ref}}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{36}$$

2. 주파수 드룹 지령 응답 – 식 (37)

- PI 제어기와 동일한 폐루프 전달함수
- 좌반평면 영점을 활용한 빠른 전력 응답

$$\frac{\partial P}{\partial P_{droop}}(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{37}$$

3. Hybrid PLC의 기대 효과

- 정상 운전: 불필요한 전력 오버슈트 억제
- 주파수 교란: 신속한 유효전력 공급
- 주파수 최저점(Frequency Nadir) 개선 기대

Hybrid PLC는 입력별로 영점의 유무를 달리하여 정상 운전에서는 안정적인 IP형 응답을, 주파수 교란 시에는 빠른 PI형 응답을 구현한다.

05 시뮬레이션 및 결과 분석: 시뮬레이션 환경 및 조건

시뮬레이션 환경

- PLECS 기반 오프라인 시뮬레이션
- 250kW급 GFM 인버터 모델
- PI / IP / Hybrid PLC 성능 비교

계통 조건

- 강계통(Strong Grid) : SCR = 20
- 약계통(Weak Grid) : SCR = 2
- 계통 강도 변화에 따른 제어 응답 검증

검증 시나리오

- 정상 전력 지령 변화 : 전력 오버슈트 및 응답 비교
- 부하 투입에 따른 주파수 하락 : 유효전력 지원 및 주파수 최저점 비교

TABLE I
SIMULATION PARAMETER OF GRID FORMING INVERTER

Parameters	Values
Rated network line-to-line voltage	22.9 [kVrms]
Rated power	250 [kW]
Rated frequency	60 [Hz]
Filter inductance	300 [μH]
Filter capacitance	40 [μF]
Inertia time constant	5 [s]
Droop coefficient	0.67 [pu/Hz]
SCR	20, 2

결론 : 250kW급 GFM 인버터를 대상으로 강·약계통에서 정상 전력 응답과 주파수 교란 응답을 비교하여 Hybrid PLC의 성능을 검증한다.

05 시뮬레이션 및 결과 분석: 정상 전력 지령 응답 비교

시뮬레이션 조건

- 2.5초: GFM 인버터 계통 연결
- 3초: 유효전력 지령을 250kW로 변경
- 강계통(SCR = 20) 및 약계통(SCR = 2)에서 비교

PI 기반 PLC

- 전력 지령 변화 시 오버슈트 발생
- 페루프 영점에 따른 과도응답 특성 확인

IP 및 Hybrid PLC

- IP: PI 대비 오버슈트 억제
- Hybrid: IP와 유사한 정상 전력 응답
- 강·약계통 모두에서 정상 전력 응답 개선 확인

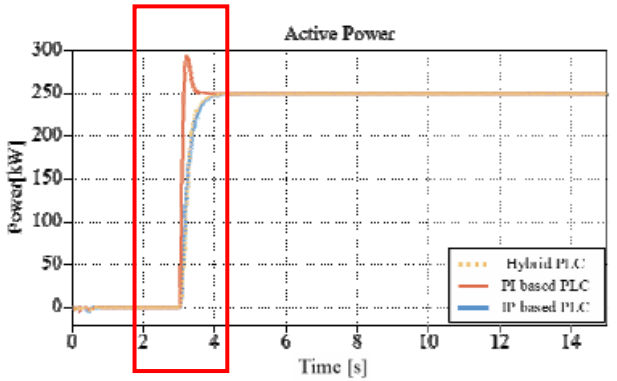


Fig. 14. Active power output according to PLC in strong grid(SCR=20)

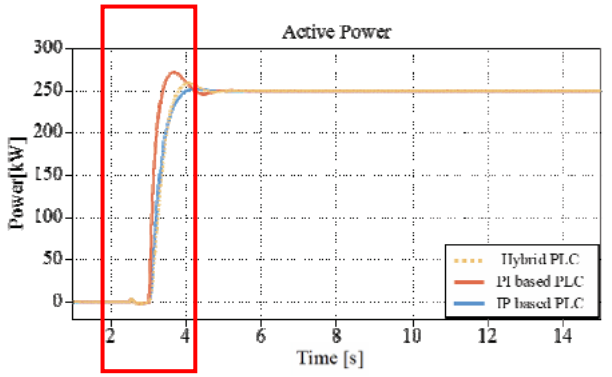


Fig. 16. Active power output according to PLC in weak grid(SCR=2)

오버슈트를 크게 억제하는 것을 알 수 있음.

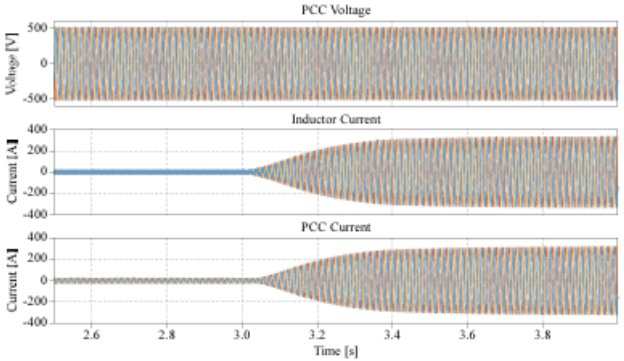


Fig. 15. Output Voltage and Current of GFMI using hybrid PLC in strong grid(SCR=20)

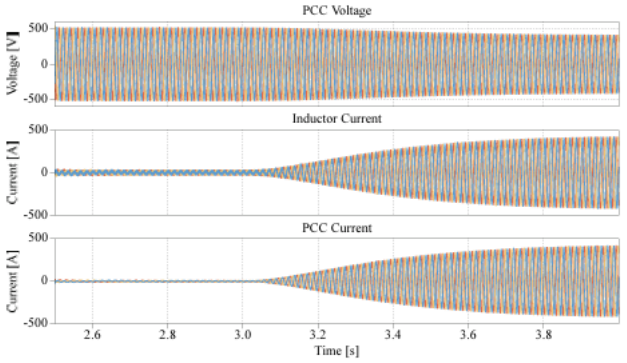


Fig. 17. Output Voltage and Current of GFMI using hybrid PLC in weak grid(SCR=2)

05 시뮬레이션 및 결과 분석: 부하 변동에 따른 주파수 응답 비교

시뮬레이션 조건

- 3초에 계통 부하 250kW 투입 → 주파수 하락 발생
- 유효·무효전력 지령은 각각 0kW, 0var 유지
- 강계통(SCR=20), 약계통(SCR=2) 비교

유효전력 응답 비교

- PI·Hybrid PLC: IP보다 빠른 예비력 투입
- 세 제어기 모두 계통 동기 유지
- 동일한 크기의 관성 에너지 제공

계통 주파수 응답 비교

- 빠른 1차 주파수 제어 → 주파수 하락 완화
- Hybrid PLC의 주파수 최저점 개선 확인
- 정상 운전 안정성과 빠른 주파수 지원을 동시에 구현

강계통

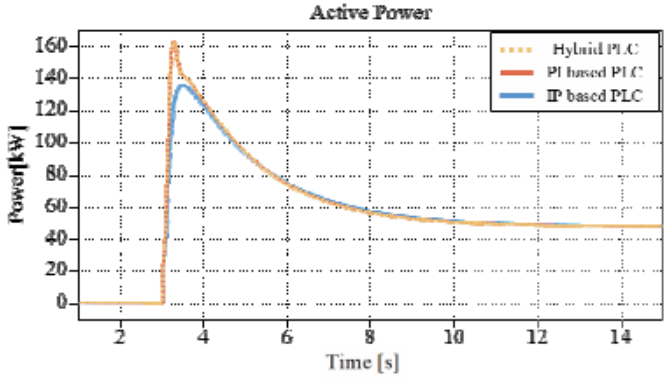


Fig. 18. Active power output according to PLC in strong grid(SCR=20) under load transient

약계통

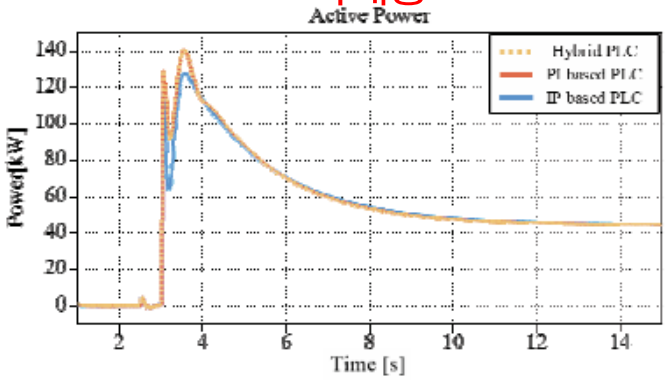


Fig. 20. Active power output according to PLC in weak grid(SCR=2) under load transient

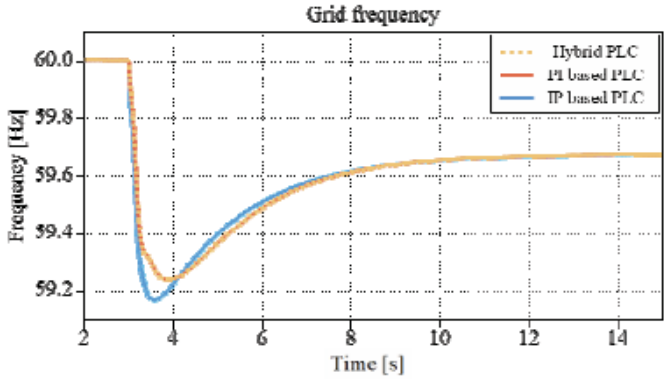


Fig. 19. Grid frequency according to PLC in strong grid(SCR=20) under load transient

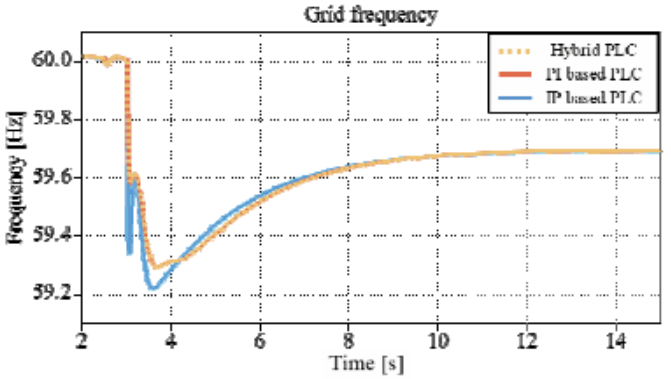


Fig. 21. Grid frequency according to PLC in strong grid(SCR=20) under load transient

Hybrid PLC는 정상 운전 시 IP 제어기의 안정성을 유지하면서, 주파수 교란 시 PI 제어기와 같은 빠른 예비력 투입을 통해 주파수 최저점을 개선한다.

06 결론 : 결론 및 연구의 의의

GFM 인버터 모델링 및 안정도 분석

- GFM 인버터의 계통 연계 모델 구성
- 임피던스 기반 공진 안정도 분석 및 능동 댐핑 적용

Hybrid PLC 제안

- PI 및 IP 기반 PLC의 장점 결합
- 정상 전력 지령: 오버슈트 억제
- 드룹 지령: 빠른 1차 주파수 제어

시뮬레이션 검증

- 강계통(SCR=20) 및 약계통(SCR=2)에서 성능 비교
- 정상 운전 시 안정적인 전력 응답 확인
- 빠른 예비력 공급을 통한 주파수 최저점 개선

연구의 의의 및 한계

- GFM 인버터의 정상 운전 성능과 주파수 지원 성능을 함께 개선하는 제어 전략 제시
- PLECS 오프라인 시뮬레이션 기반 검증으로, 실험적 검증은 추가 연구 과제

Hybrid PLC 제안: PI와 IP 제어기의 장점을 결합하여 정상 운전 시 안정적인 전력 응답 확보

주파수 안정도 향상: 빠른 1차 주파수 제어를 통해 계통 주파수 최저점 개선

연구 성과: 강·약계통 PLECS 시뮬레이션을 통해 제안 제어기의 유효성 검증

NOVA

Power/Energy Track

Thank you

숭실대학교 전기공학부 학술 소모임 NOVA
발표자 : 이태현