

그리드 포밍 컨버터의 전류 제한을 통한 FRT 제어 전략

2023년도 전력전자학술대회
Wednesday, July. 5th, 2023

박 가 영 , 최 성 휘

SPEC (SNU Power Electronics Center)
Dept. of Electrical and Computer Engineering
Seoul National University, Seoul, S. Korea



SNU Power Electronics Center

OUTLINE

- 1 연구 배경 및 목적
- 2 계통 연계 FRT (Fault Ride-Through)
- 3 그리드 포밍 컨버터의 FRT 제어 전략
- 4 HILS 검증 결과
- 5 결론

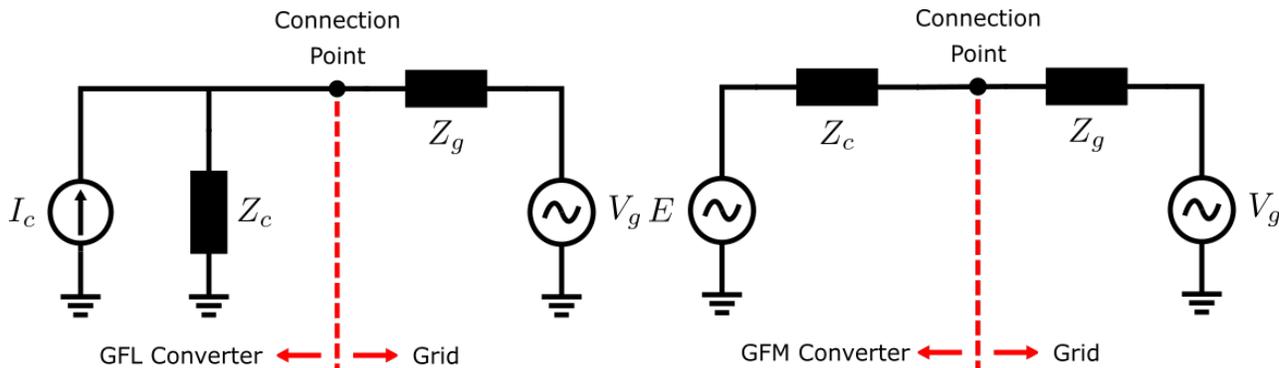
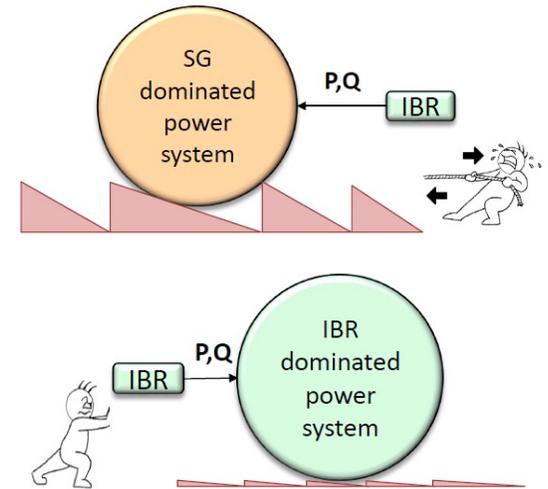
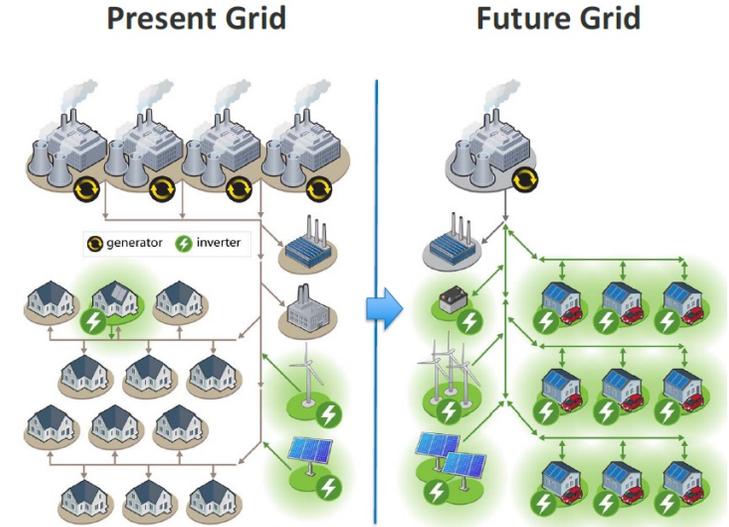
1. 연구 배경 및 목적

❖ 전력 계통의 변화

- ▶ 신재생에너지 기반 분산 전원 증가 → 인버터 기반 전원(IBR)의 비중 증가
- ▶ 계통의 SCR (Short Circuit Ratio) 감소 및 계통 약화 추세

❖ 계통 연계 컨버터의 제어 토폴로지

- ▶ 그리드 팔로잉 (Grid-Following) 제어
 - ✓ 전류원 동작을 통해 계통에 유무효전력 주입
 - ✓ 약계통 (Low SCR) 연계 시 전압 기반 동기화 방식이 불안정성 야기
- ▶ 그리드 포밍 (Grid-Forming) 제어
 - ✓ 전압원 동작을 통해 계통 전압 형성 및 계통 안정화
 - ✓ 약계통 (Low SCR) 연계 시 파워 기반 동기화 방식으로 안정적 동작 가능



< 계통 연계형 컨버터 제어 방법 비교 : (좌) GFL (우) GFM >

< 기존 동기 발전기 기반 계통과 전력 전자 발전원 기반 계통의 비교 [*,]** >

❖ 계통 사고 시 FRT (Fault Ride-Through) 요구 사항

- ▶ 출력 전류 제한 (Current Limitation)
 - ✓ 컨버터 출력 전류를 제한치 이내로 제한하며 운전 유지 필요
- ▶ 무효 전류 주입 (Fault Current Contribution)
 - ✓ 계통에 요구되는 유무효 전류 주입 필요
- ▶ 사고 복구 동특성 (Fault Recovery Capability)
 - ✓ 사고 복구 직후 빠르게 정상상태 회복 필요

❖ 그리드 포밍 컨버터의 계통 사고 시 대응 방안

- ▶ 동기 발전기와 과전류 주입 한계에서의 차이점 존재
 - ✓ 동기 발전기: 5-7 p.u.의 과전류 주입 가능
 - ✓ 그리드 포밍 컨버터: 1.2-1.5 p.u.의 과전류 주입 가능

➔ 연구 목표: 그리드 포밍 컨버터의 과전류 주입 한계를 고려한 FRT 제어 전략 제안



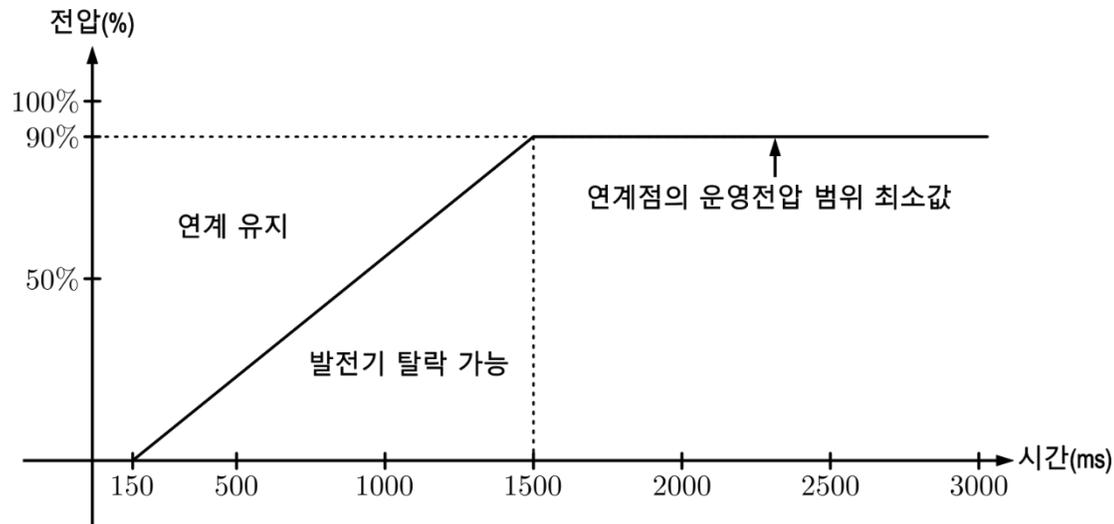
<계통 연계 컨버터의 계통 사고 시 FRT 비유>

2. 계통 연계 FRT (Fault Ride-Through)

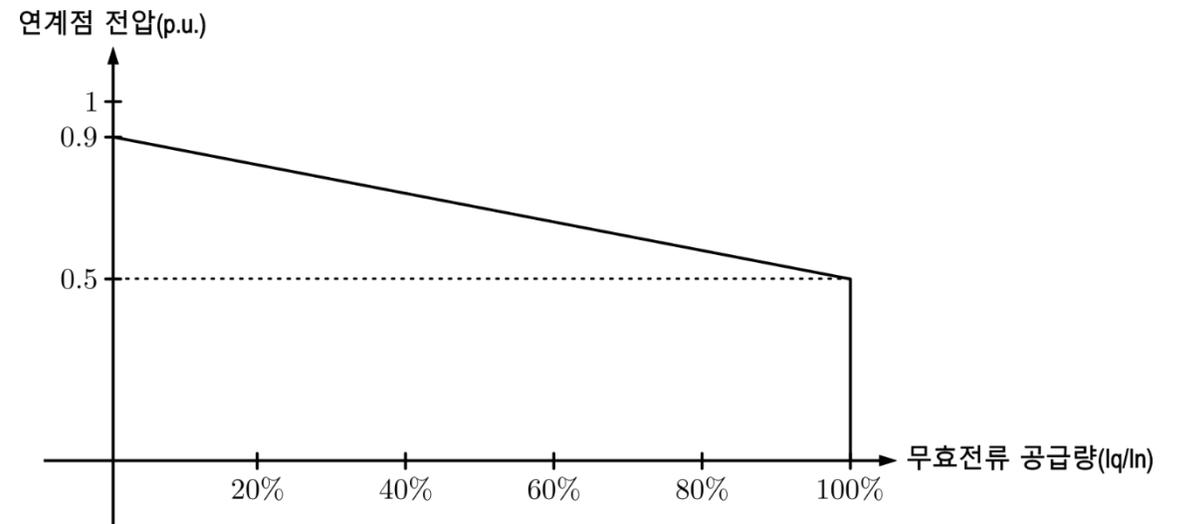
2 계통 연계 FRT (Fault Ride-Through)

❖ 계통 연계 신재생발전기의 계통 연계 유지 조건

- ▶ 순시전압 강하시 고장 시 및 고장 발생 후 연계 운전 유지
- ▶ 고장 중 무효전류 공급
 - ✓ 고장 발생 후 3 cycle 이내에 요구되는 무효전류 공급
- ▶ 고장 후 유효전력 회복
 - ✓ 연속운전 전압유지 범위로 복구 이후 5초 이내에 정상 상태 회복



<한국전력공사 신재생발전기 계통연계기준: FRT 능력 곡선 [*]>

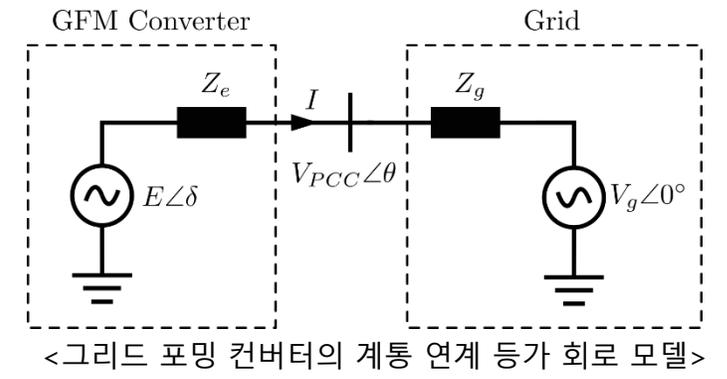


<한국전력공사 신재생발전기 계통연계기준: 고장발생 후 무효전류 공급능력 [*]>

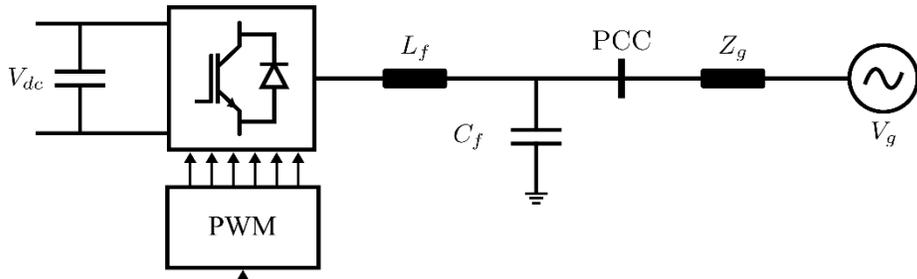
2 계통 연계 FRT (Fault Ride-Through)

❖ 그리드 포밍 컨버터의 제어 구조

- ▶ 내부 제어 루프: 계통 접속점에서의 전압, 전류 제어
 - ✓ 동기발전기 전자기적 특성 모의
 - ✓ 가상 임피던스: 계통접속점 전압, 가상 EMF로부터 전류 지령 생성
 - ✓ 전류 제어기: 전압 변조 지령 생성
 - ✓ 상대적으로 빠른 동특성



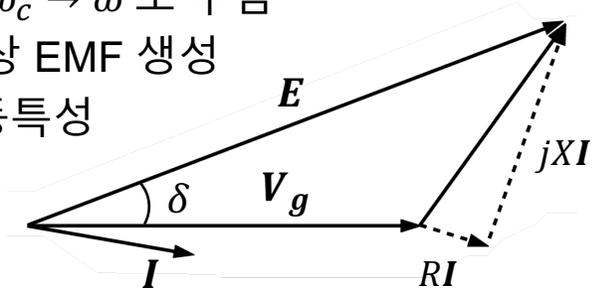
- ▶ 외부 제어 루프: 계통에 주입되는 파워 제어
 - ✓ 동기발전기 전기기계적 특성 모의
 - ✓ 유효전력 제어: 파워 기반 동기화
 - 유효전력 지령과 출력의 차이로부터 컨버터 주파수 산출
 - $\Delta P \rightarrow 0$ 이면 $\omega_c \rightarrow \omega$ 로 수렴
 - ✓ 무효전력 제어: 가상 EMF 생성
 - ✓ 상대적으로 느린 동특성



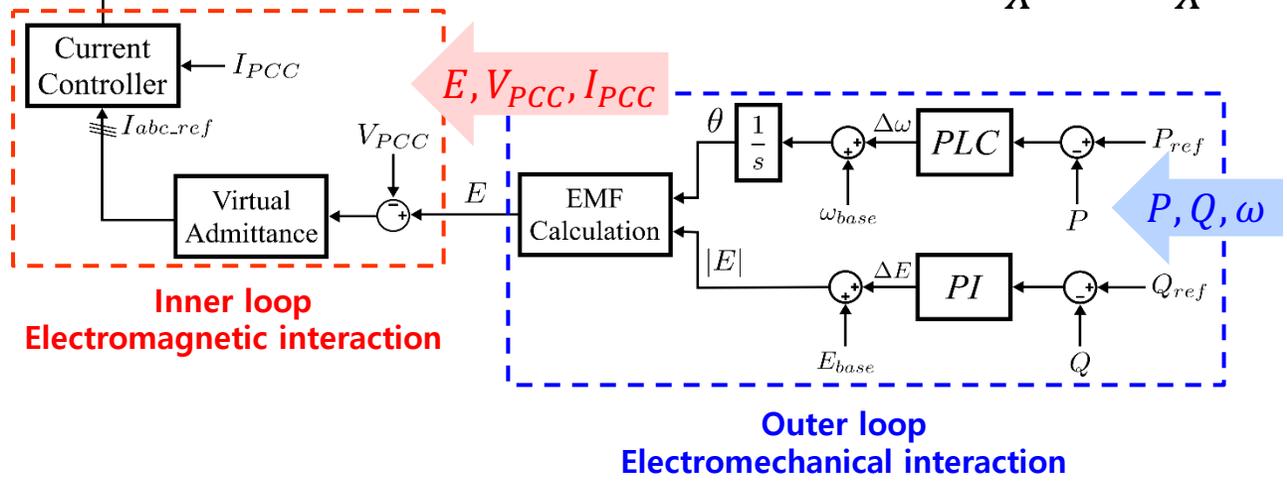
$$E = (R + jX)I + V_g$$

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta$$

$$Q = \frac{EV \cos \delta}{X} - \frac{V^2}{X}$$



<그리드 포밍 컨버터의 가상 EMF 페이지도>



<그리드 포밍 컨버터의 외부 및 내부 제어 루프 개략도>

2 계통 연계 FRT (Fault Ride-Through)

❖ 그리드 포밍 컨버터의 FRT

▶ 고장 중 무효전류 공급

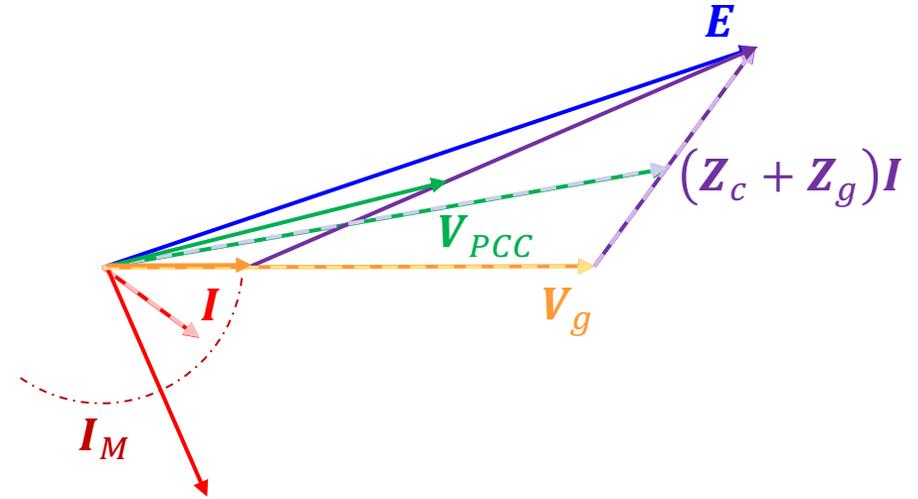
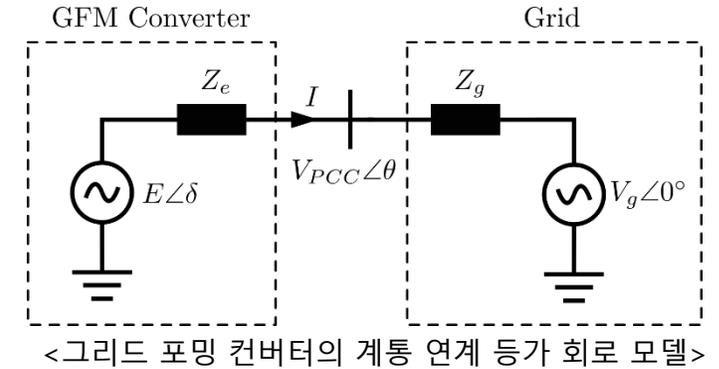
- ✓ 컨버터 내부 가상 EMF E 유지
 - 외부 제어 루프의 느린 동특성 → 계통 사고 시 무효전류 주입 가능

▶ 순시전압 강하시 고장 시 및 고장 발생 후 연계 운전 유지

- ✓ 전압에 의해 결정되는 전류 I 변화
- ✓ 순시전압강하 및 위상 점프 시 **과전류 위험** 존재
 - 연계 운전 유지를 위해 컨버터 최대 허용 전류 I_M (통상 1.2 p.u.) 이내로 **전류 제한 필요**

▶ 고장 후 유효전력 회복

- ✓ 전류 제한 시 외부 제어 루프에 포화 현상 발생
- ✓ 적절한 포화 현상 해소 (Anti-windup) 대책 필요



<그리드 포밍 컨버터의 사고 시 전압 페이지도>

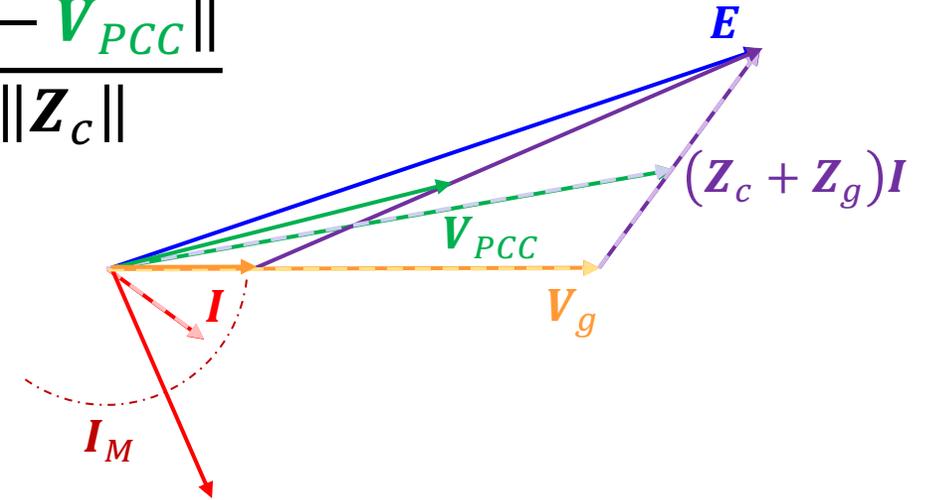
$$\|I\| = \frac{\|E - V_{PCC}\|}{\|Z_c\|}$$

3. 그리드 포밍 컨버터의 FRT 제어 전략

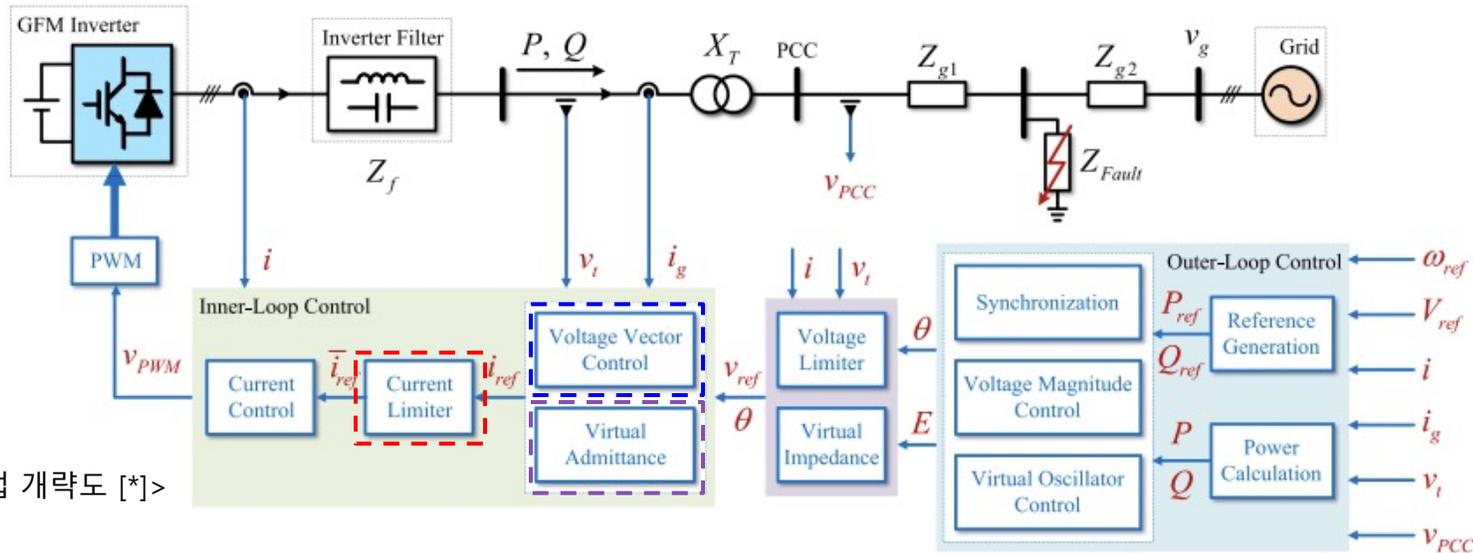
❖ 그리드 포밍 컨버터의 전류 제한 기법

- ▶ 전류 제한기 (Current Limiter)
 - ✓ 전류 벡터의 크기를 직접 제한
 - ✓ 외부 제어 루프에서 포화 현상 발생
- ▶ 가상 임피던스 (Virtual Impedance)
 - ✓ 가상 임피던스의 크기를 증가시켜 전류의 크기 제한
 - ✓ 일정 수준 이상으로 증가 시 불안정성 야기
- ▶ 전압 제한기 (Voltage Limiter)
 - ✓ 가상 EMF와 컨버터 출력 전압의 차이 벡터를 제한
 - ✓ 가상 임피던스의 감소 특성 이용 X → 과전류 억제 능력 부족

$$\|I\| = \frac{\|E - V_{PCC}\|}{\|Z_c\|}$$



<그리드 포밍 컨버터의 사고 시 전압 페이저도>

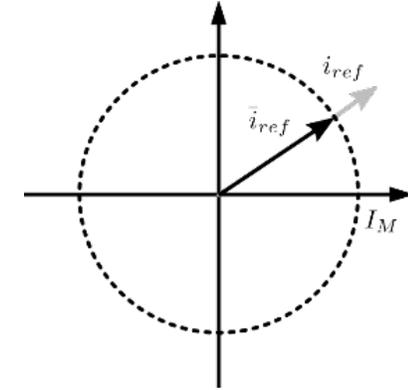


<그리드 포밍 컨버터의 전류 제한 기법 개략도 [*]>

[*] B. Fan et al., "A Review of Current-Limiting Control of Grid-Forming Inverters Under Symmetrical Disturbances," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 3, pp. 955-969, 2022.

❖ 전류 제한기 (Current Limiter)

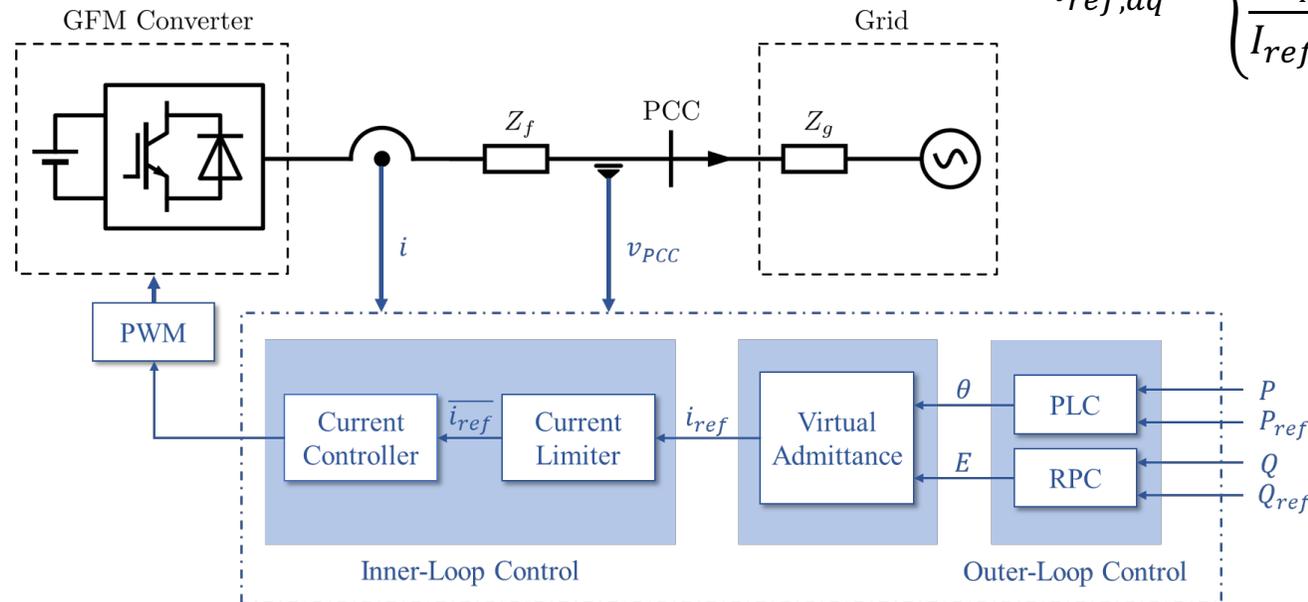
- ▶ 전류 지령 벡터의 크기를 직접적으로 제한하여 전류 제어기에 전달
 - ✓ 직관적이며 사고 감지에 따른 제어방식의 절환 없이 빠르게 전류 제한 가능
 - ✓ 전류 지령 벡터의 d, q축 성분 비를 유지하며 크기를 I_M 이내로 제한
 - ✓ 전류 제어기는 새로운 전류 지령을 추종



<그리드 포밍 컨버터의 전류 벡터 크기 제한>

- ▶ 내부 제어 루프에 위치
 - ✓ 전류 제어기에서는 포화 현상 발생하지 않음
 - ✓ 외부 제어 루프에서 포화 현상 발생

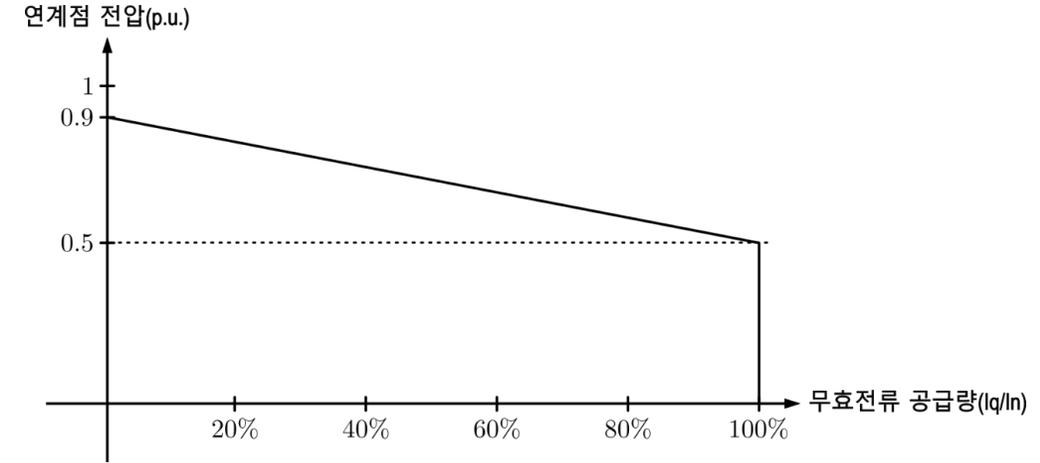
$$\bar{i}_{ref,dq} = \begin{cases} i_{ref,dq}, & I_{ref,dq} \leq I_M \\ \frac{I_M}{I_{ref,dq}} i_{ref,dq}, & I_{ref,dq} > I_M \end{cases}$$



<전류 제한기가 적용된 그리드 포밍 제어 개략도>

❖ 유무효전력 지령 변화 (Power Reference Modification)

- ▶ 사고 감지 알고리즘에 기반하여 동작
 - ✓ 계통 접속점 전압 크기 V_{pu} 계산
 - ✓ V_{pu} 에 따라 새로운 정격 파워 산출



<한국전력공사 신재생발전기 계통연계기준: 고장발생 후 무효전류 공급능력 [*]>

▶ 순시전압강하 정도에 비례하여 유무효전력 지령을 변화

- ✓ 계통 접속점 전압 크기를 기준으로 새로운 정격 파워의 유무효전력 지령 분배비율 변화
 - $V_{pu} > 0.9$: 기존의 무효전력 지령 유지
 - $0.5 < V_{pu} < 0.9$: 순시전압강하에 비례하여 무효전력지령의 비중 증가
 - $V_{pu} < 0.5$: 새로운 정격 파워를 모두 무효전력에 할당

▶ 무효전력에 우선적으로 정격 파워 분배

- ✓ 순시전압강하 발생 시 빠르게 무효전류 주입 가능
- ✓ 전류 제한기로 인한 외부 제어 루프에서의 포화 현상 완화

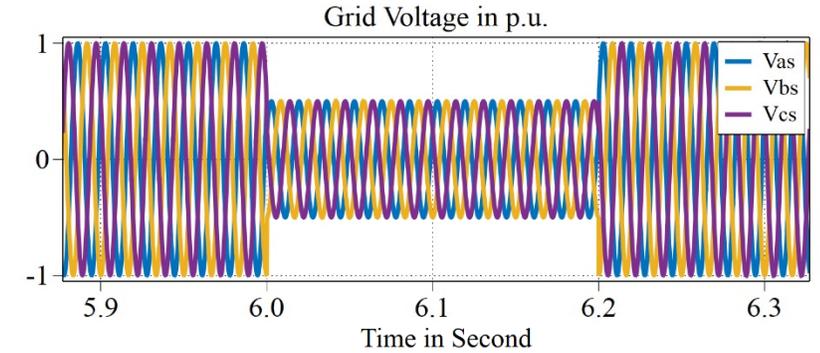
$$S_{new} = V_{pu} S_n$$

$$Q_{ref} = \begin{cases} Q_{droop} & \text{if } V_{pu} > 0.9 \\ 2S_{new}(1 - V_{pu}) & \text{if } 0.5 < V_{pu} < 0.9 \\ S_{new} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$P_{ref} = \sqrt{S_{new}^2 - Q_{ref}^2}$$

❖ 계통 사고 시나리오

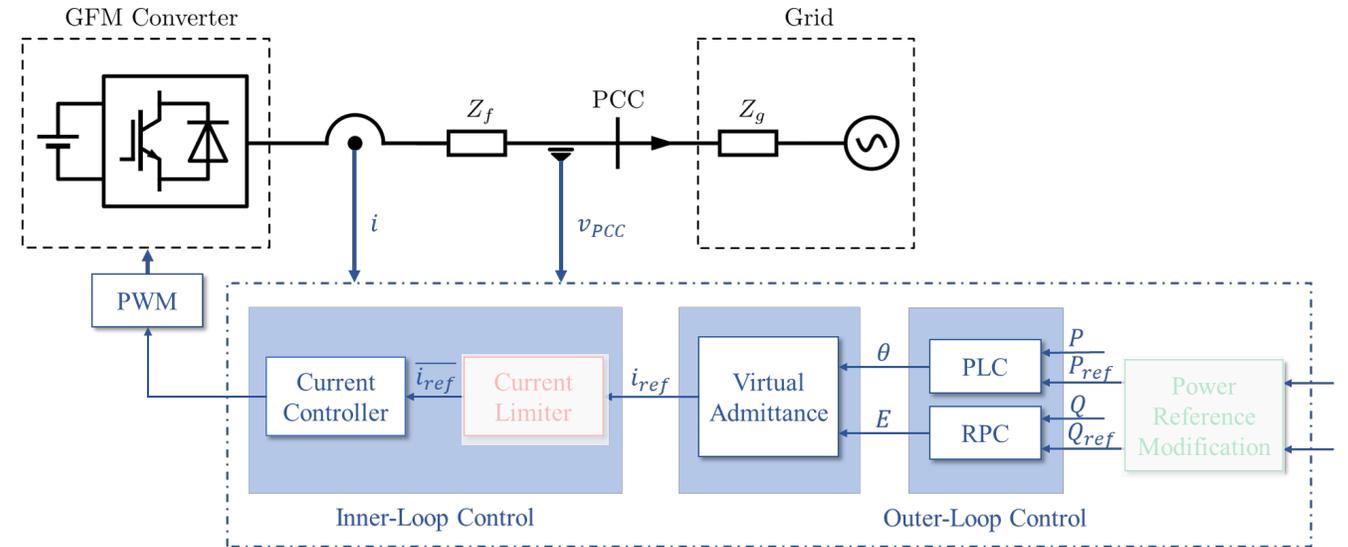
- ▶ 강계통 연계 (SCR = 20)
- ▶ 5초 이후 정상상태 진입 및 유효전력 지령 추종
 - ✓ 유효전력 지령 1 p.u.
 - ✓ 무효전력 지령 0.2 p.u.
- ▶ 6초에 3상 순시전압강하 발생
 - ✓ 6.2초까지 200ms 간 50% 계통 전압 강하 후 복구



<계통 3상 순시전압강하 사고 시나리오>

❖ 그리드 포밍 컨버터 FRT 제어 전략의 성능 비교

- ▶ 전류 제한 기법을 적용하지 않은 경우
- ▶ 전류 제한기만을 적용한 경우 (①)
- ▶ 전류 제한기 + 유효전력 지령 변화 모두 적용한 경우 (①+②)

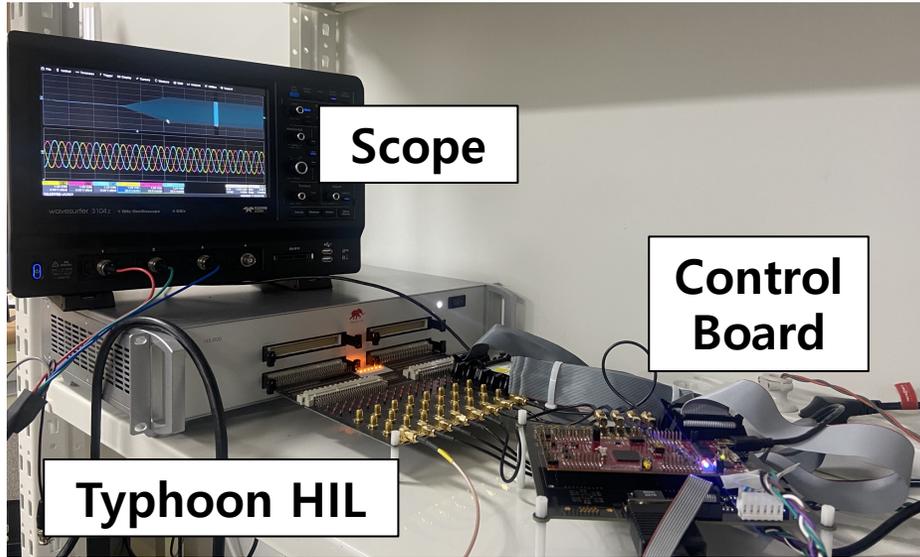
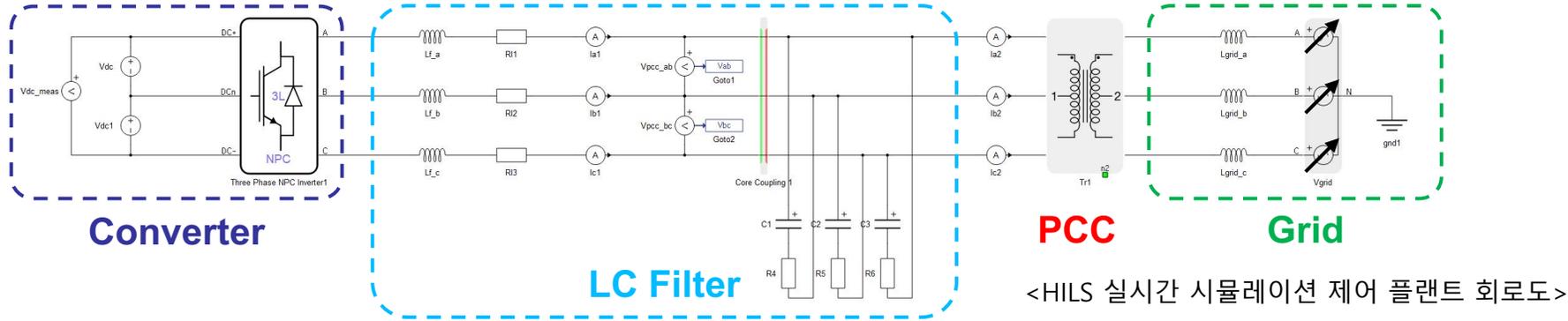


<제안하는 전류 제한을 통한 FRT 제어 전략이 적용된 제어 개략도>

4. HILS 검증 결과

❖ Hardware-In-the-Loop Simulation 구성 및 Hardware Setup

▶ HILS 실시간 시뮬레이션을 통한 제어 성능 검증

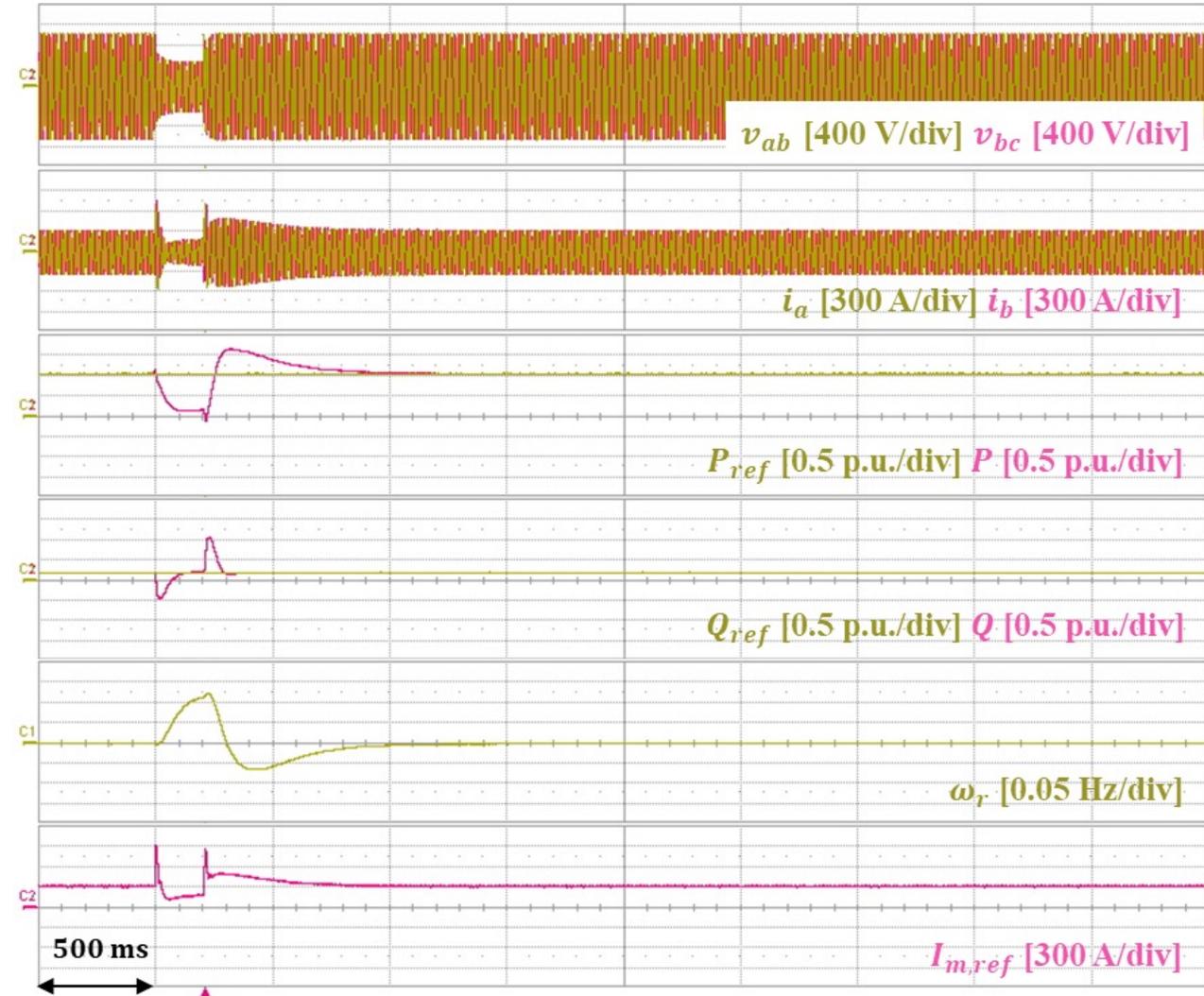
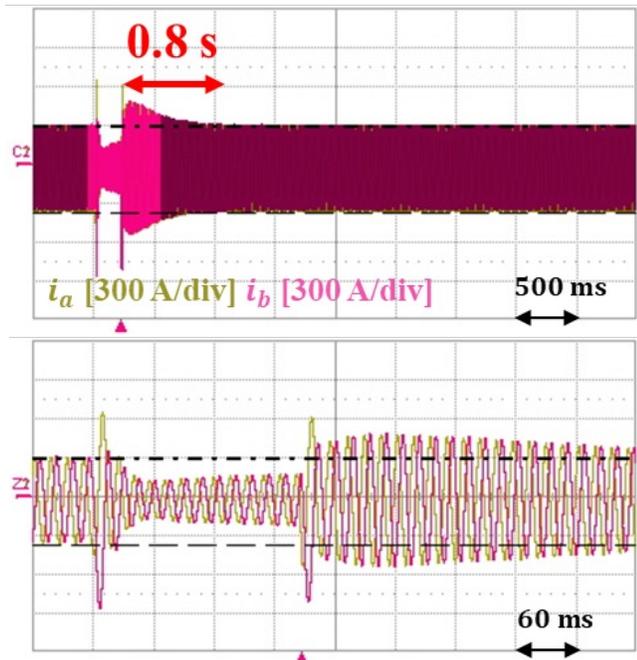


Simulation Parameters											
Converter			Controller			LC Filter			Grid		
S_{conv}	250	kW	f_{sw}	4.5	kHz	L_f	300	μ H	SCR	20	-
V_{dc}	1100	Vdc	f_s	9	kHz	Z_{L_f}	0.059	(p.u.)	V_{pn}	22900	Vac
V_{ac}	690	Vac				C_f	40	μ F	V_{sn}	690	Vac
						G_{C_f}	0.029	(p.u.)	f_o	60	Hz

<그리드 포밍 컨버터 및 계통 파라미터>

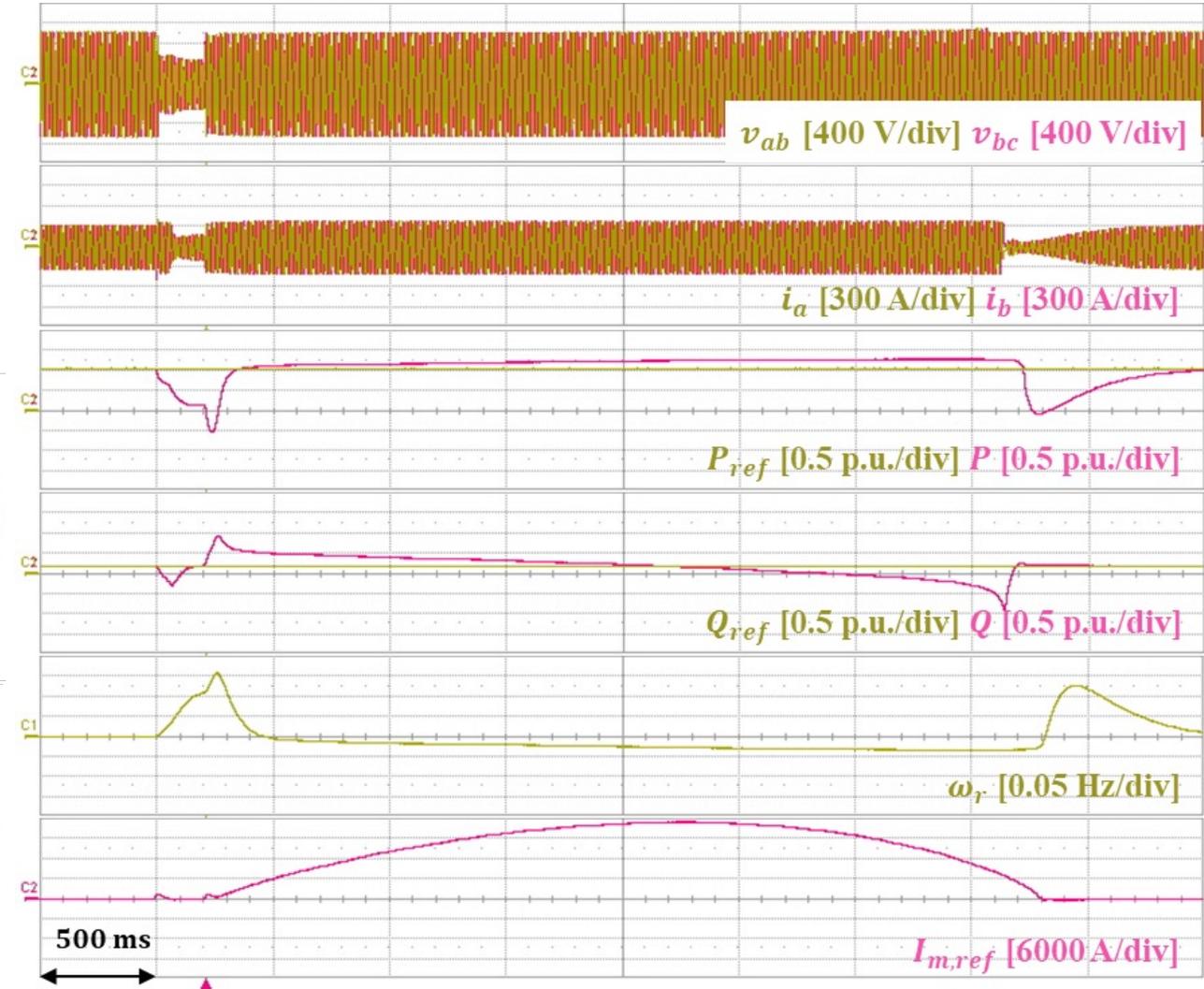
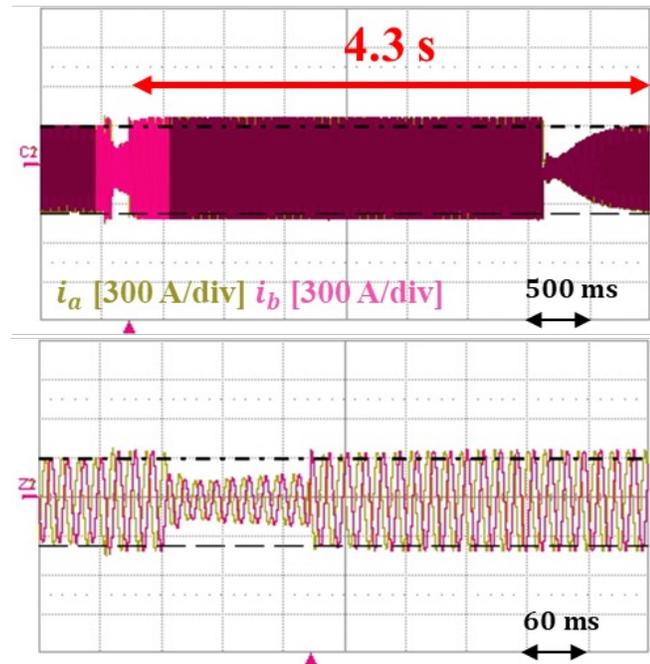
❖ 전류 제한 기법을 적용하지 않은 경우

- ▶ 과전류 최대 2.8 p.u. 발생
 - ✓ 컨버터 허용 전류 초과
- ▶ 무효전력 0.1초 이내로 추종
 - ✓ 외부 제어 루프에 포화 현상 발생하지 않음
- ▶ 전압강하 복구 후 정상상태 회복에 0.8초 소요



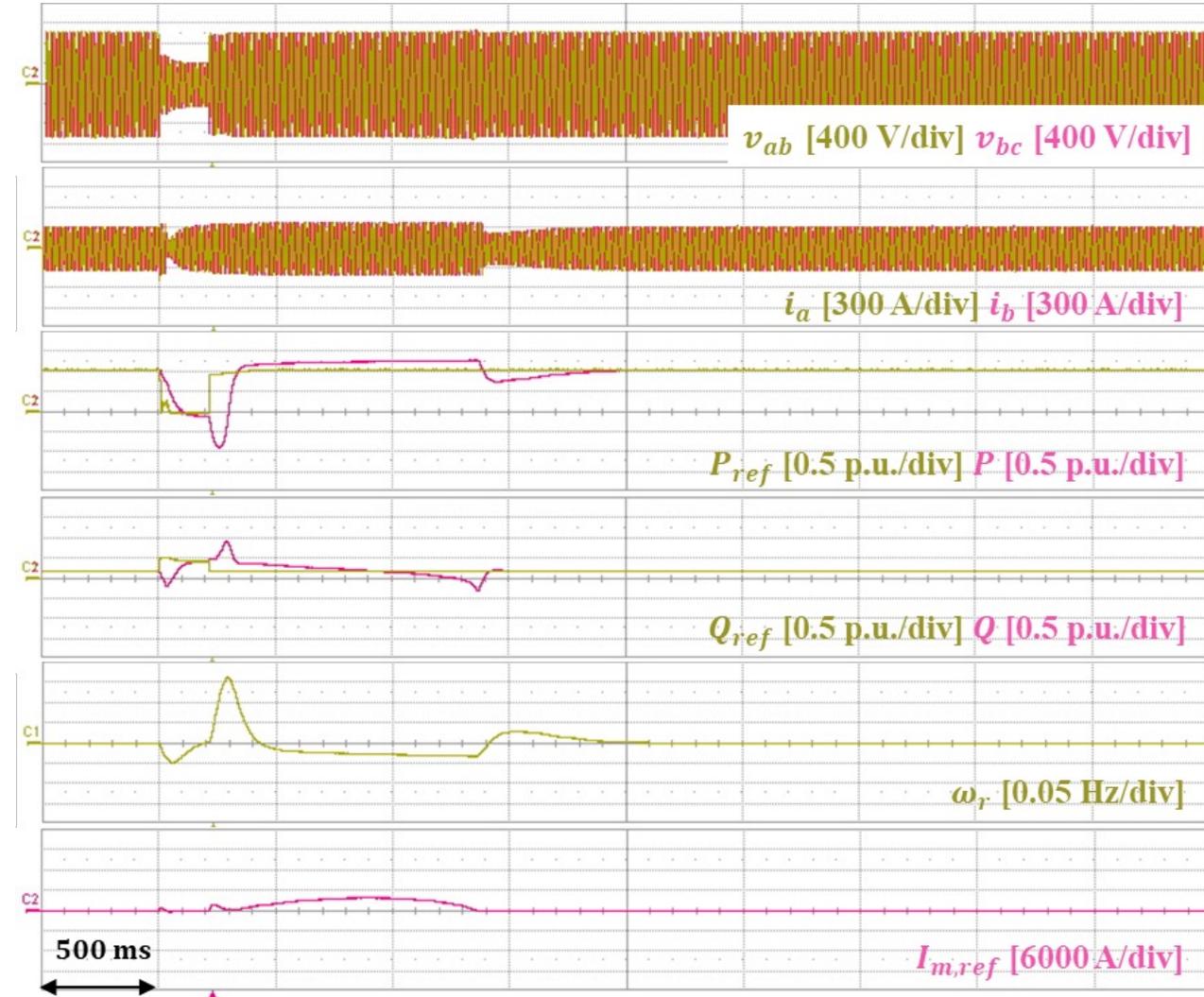
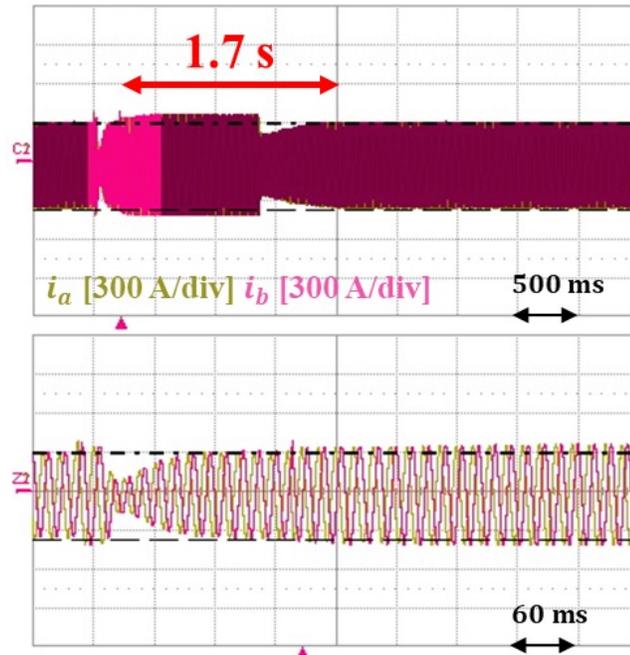
❖ 전류 제한기만을 적용한 경우

- ▶ 과전류 1.2 p.u. 이내로 제한
- ▶ 무효전력 0.2초 이내로 추종
 - ✓ 외부 제어 루프에 포화 현상 발생
 - ✓ 고장 중 무효전류 공급 위해 지령 변화 필요
- ▶ 전압강하 복구 후 정상상태 회복에 4.3초 소요
 - ✓ 정상상태 회복에 요구되는 시간 증가



❖ 전류 제한기 + 유무효전력 지령 변화를 모두 적용한 경우

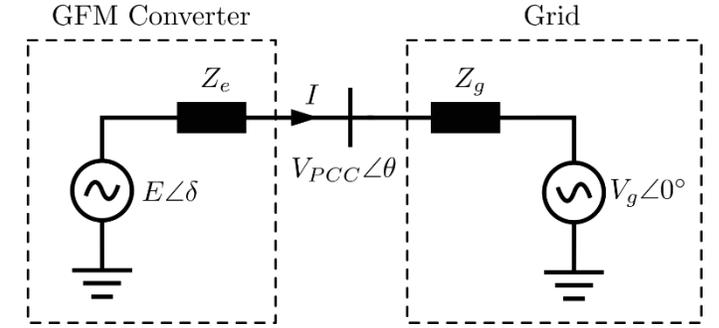
- ▶ 과전류 1.2 p.u. 이내로 제한
- ▶ 변화된 무효전력을 0.1초 이내로 추종
 - ✓ 외부 제어 루프의 포화 현상 완화
 - ✓ 고장 중 무효전류 공급 가능
- ▶ 전압강하 복구 후 정상상태 회복에 1.7초 소요
 - ✓ 정상상태 회복에 요구되는 시간 감소



5. 결론

❖ 계통 연계 유지 조건

- ▶ 순시전압 강하시 고장 시 및 고장 발생 후 연계 운전 유지
- ▶ 고장 중 무효전류 공급
- ▶ 고장 후 유효전력 주입 정상상태 회복



<그리드 포밍 컨버터의 계통 연계 등가 회로 모델>

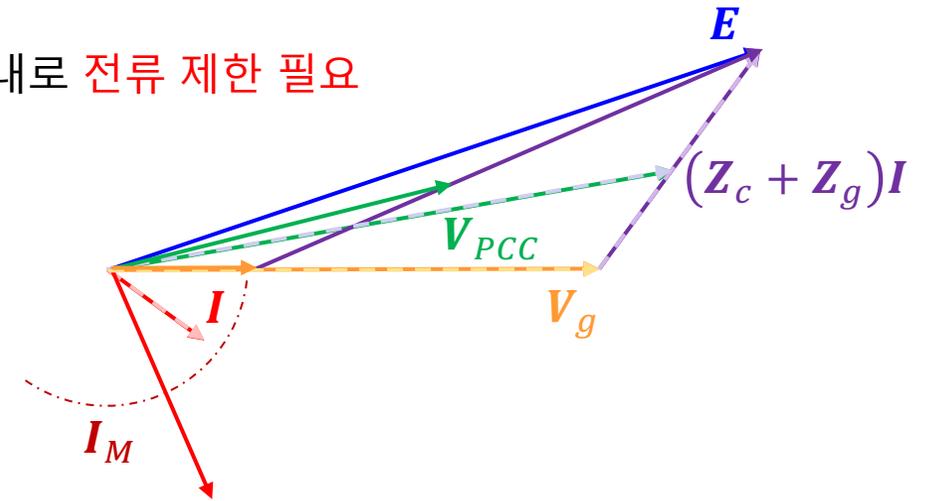
❖ 그리드 포밍 컨버터의 제어 특성

- ▶ 내부 제어 루프: 전자기적 특성 모의, 전류 및 전압 제어
- ▶ 외부 제어 루프: 전기기계적 특성 모의, 유무효전력 제어
- ▶ 전압원과 등가 직렬 임피던스를 모의
 - ✓ 순시전압강하 및 위상 점프 시 **과전류 위험** 존재
 - ✓ 연계 운전 유지를 위해 컨버터 최대 허용 전류 I_M (통상 1.2 p.u.) 이내로 **전류 제한 필요**

❖ 그리드 포밍 컨버터의 전류 제한 기법

- ▶ 전류 제한기
- ▶ 가상 임피던스
- ▶ 전압 제한기

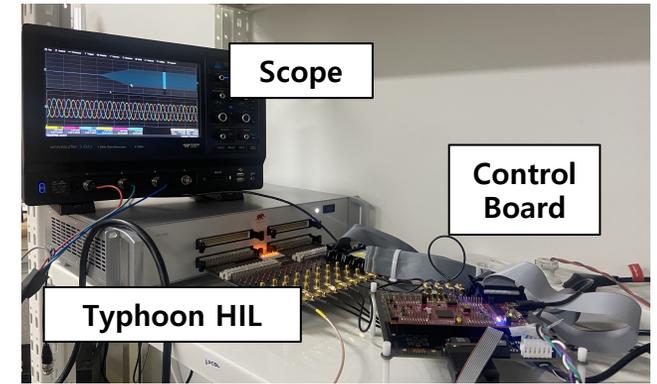
$$\|I\| = \frac{\|E - V_{PCC}\|}{\|Z_c\|}$$



<그리드 포밍 컨버터의 사고 시 전압 페이저도>

❖ 그리드 포밍 컨버터의 전류 제한을 통한 FRT 제어 전략

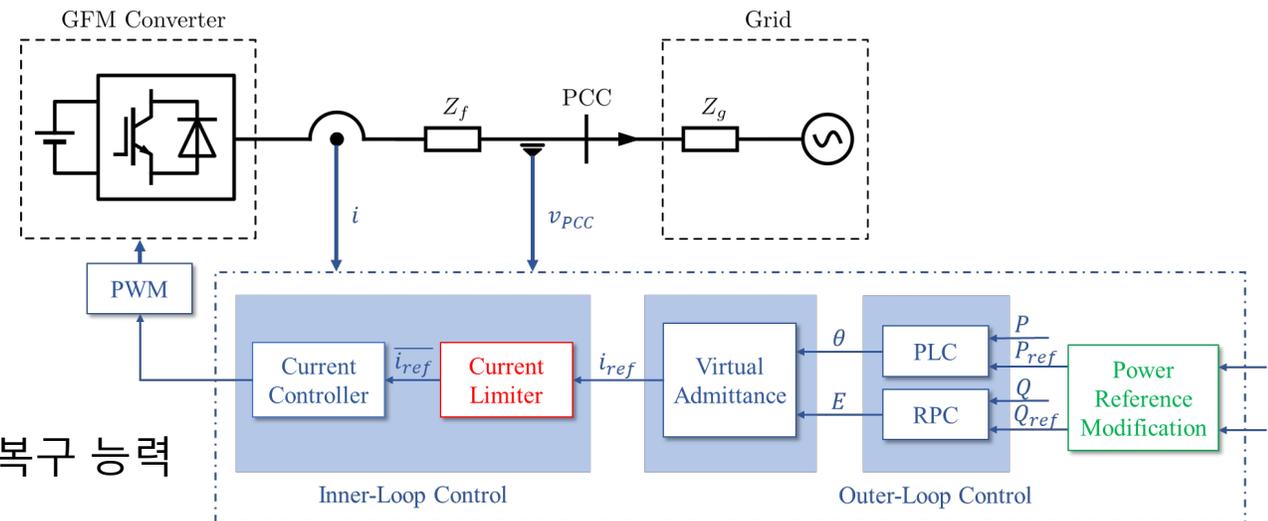
- ▶ 전류 제한기
 - ✓ 직관적이며 빠르게 전류 제한 가능
 - ✓ 외부 제어 루프에 포화 현상 (Wind-up) 발생
- ▶ 유무효전력 지령 변화
 - ✓ 계통 사고 시 유무효전력 지령 분배비율 변화



<HILS 실시간 시뮬레이션 하드웨어 구성>

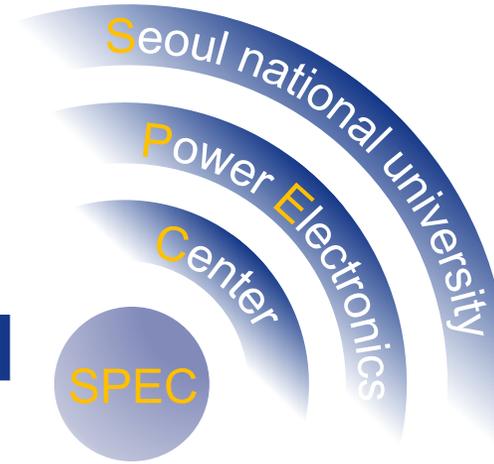
❖ HILS 검증 결과

- ▶ 계통 3상 순시전압강하 사고 모의 시 전류 제한기와 유무효전력 지령 변화의 효과 확인
- ▶ FRT 제어 전략을 적용하지 않은 경우
 - ✓ 과전류 발생
- ▶ 전류 제한기만을 사용한 경우
 - ✓ 출력 전류를 제한
 - ✓ 외부 제어 루프의 포화 현상 발생
- ▶ 제안하는 FRT 제어 전략을 사용한 경우
 - ✓ **출력 전류를 제한**하여 연계 운전 유지
 - ✓ **외부 제어 루프의 포화 현상 완화**로 빠른 정상상태 복구 능력
 - ✓ 계통 순시전압강하 시 빠르게 **무효전류 공급**



<제안하는 전류 제한 및 유무효전력 지령 변화를 통한 FRT 전략이 적용된 제어 개략도>

Thank you



SNU Power Electronics Center