
태양광 발전 시스템 계통연계와 고조파 분석 및 절감 방안

5조

201910906 이학민

201910898 박태현

CONTENTS

/

01

태양광 발전 시스템 설계

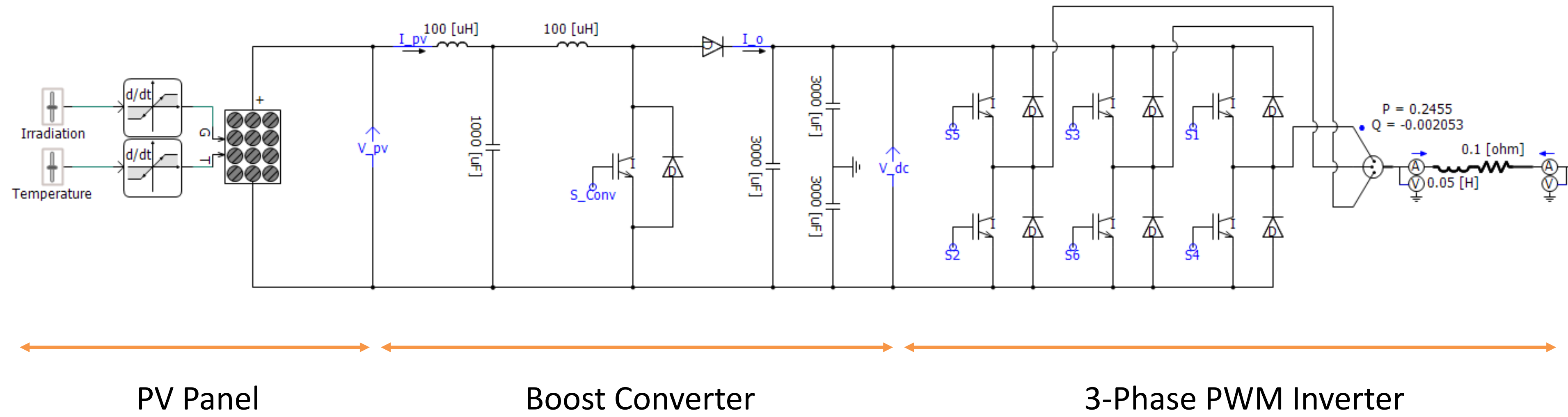
02

전력변환설비 제어 과정

03

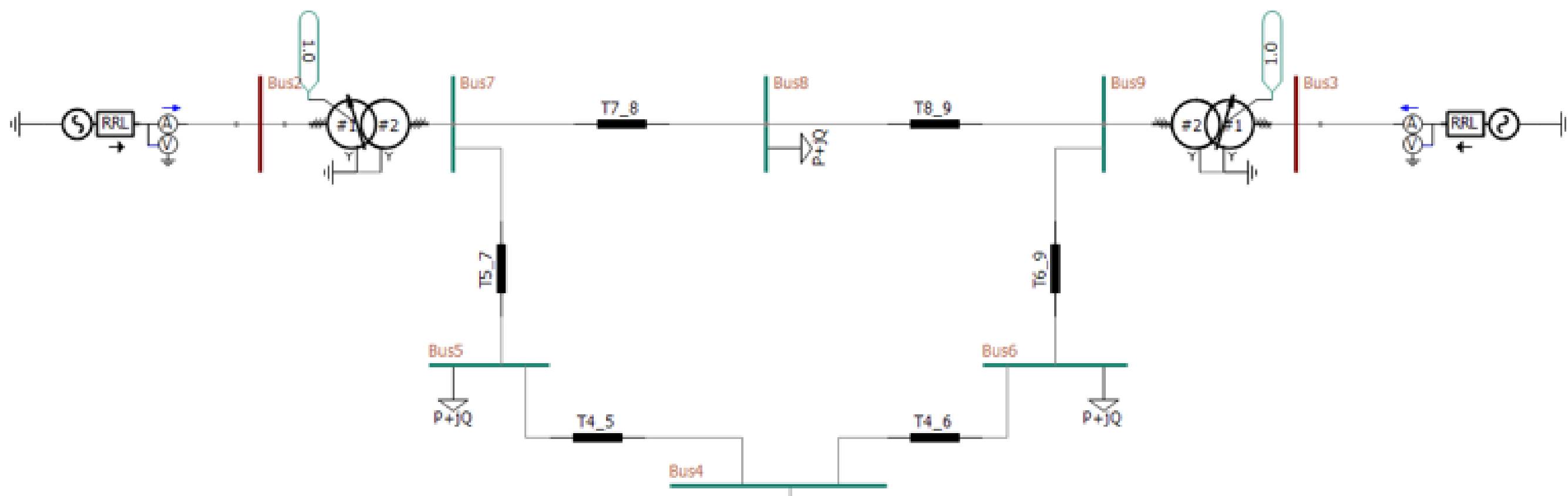
고조파 분석 및 절감 과정

1) 태양광 발전 시스템 설계도



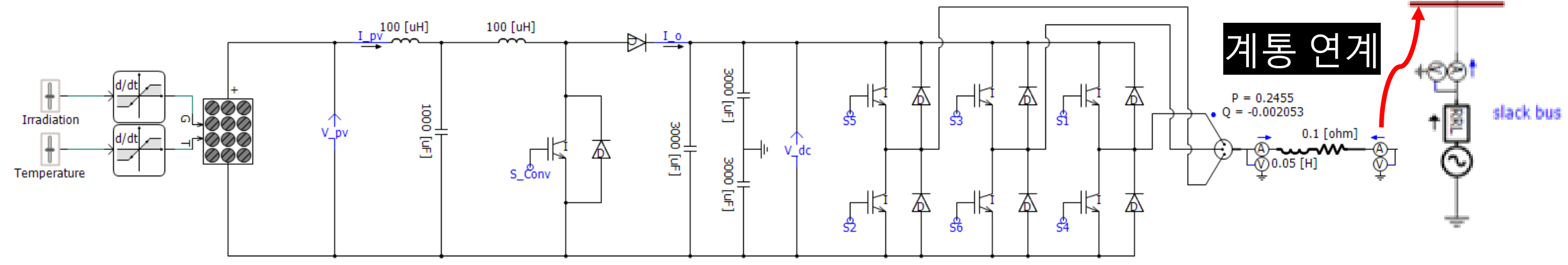
2) IEEE 9 Bus 연계 과정

—



IEEE 9 Bus System

PV System

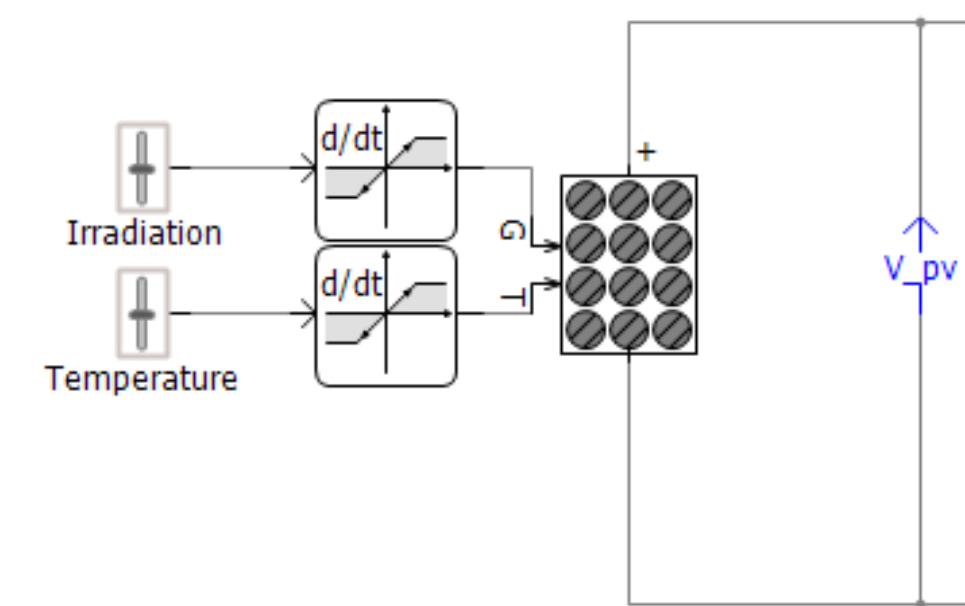


계통 연계

slack bus

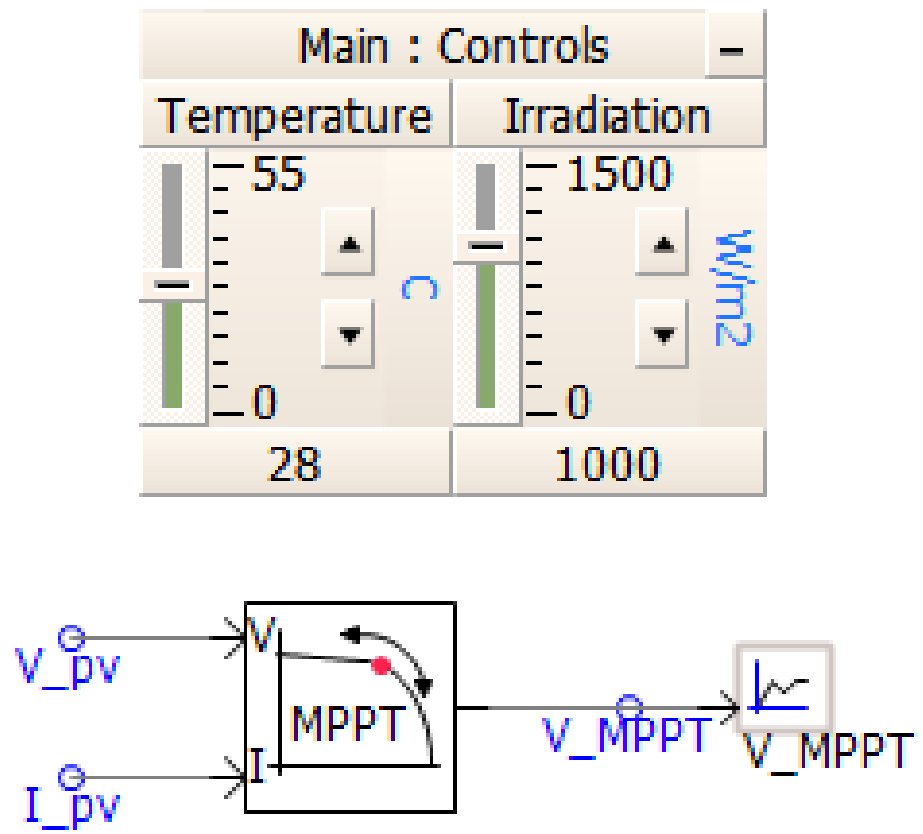
1) PV Panel 제어

—



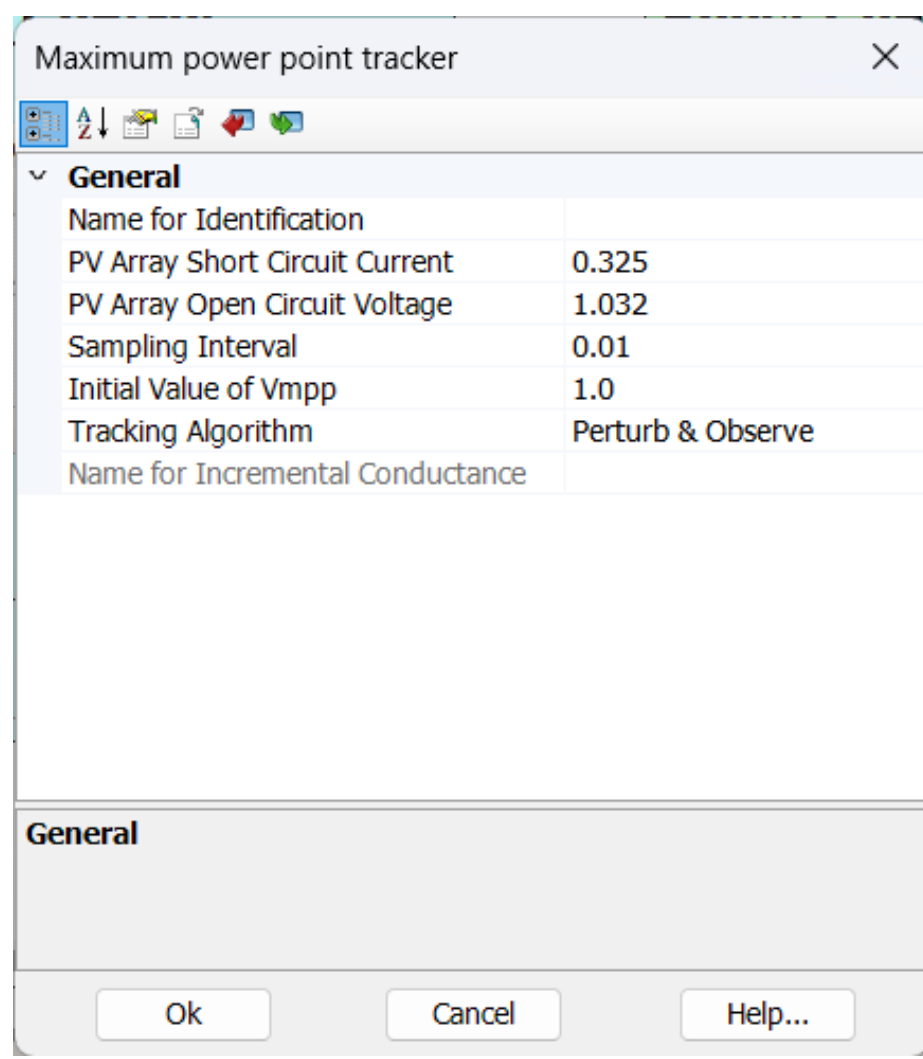
PV Panel

250[kW]의 전력을 출력하는 PV Panel 설정



<PV Panel Specification>

- Temperature(온도) : 28°C
- Irradiation(조사량) : 1000W/m²



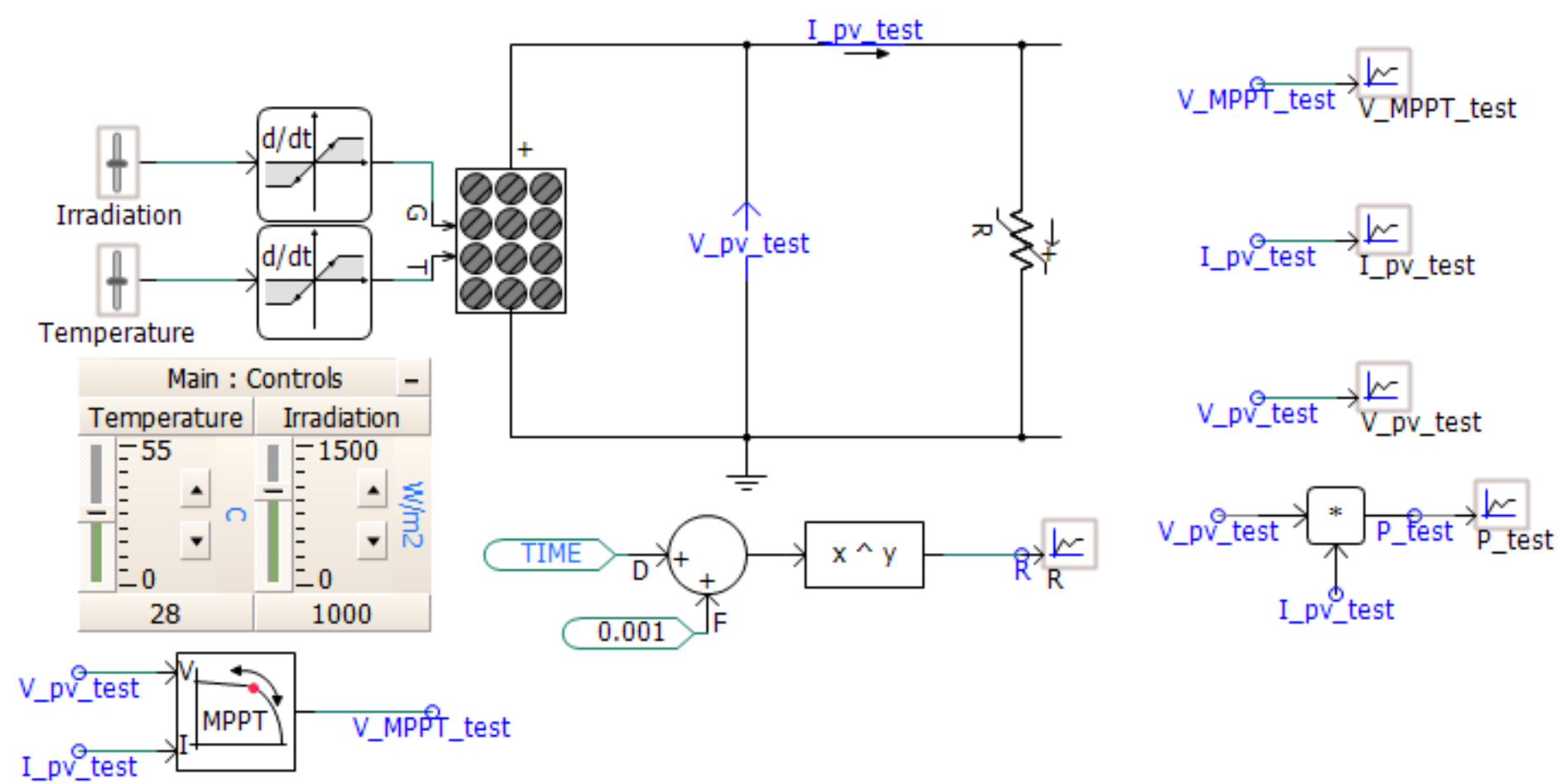
<MPPT Control Setting>

- PV Array Short Circuit Current : 0.325 [kA]
- PV Array Open Circuit Voltage : 1.032 [kV]
- Tracking Algorithm : Perturb & Observe

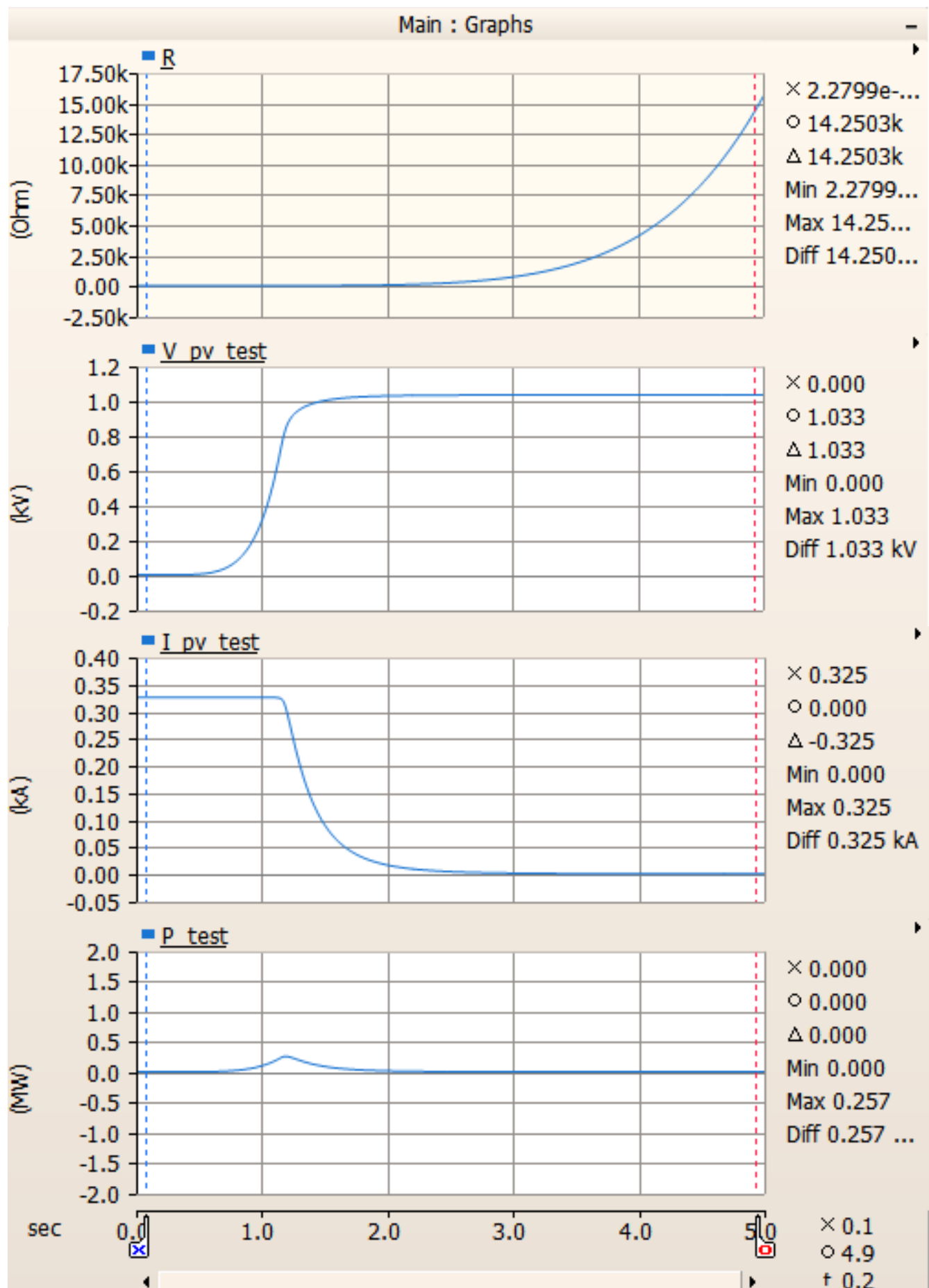
→ V_MPPT 계산

1) PV Panel 제어

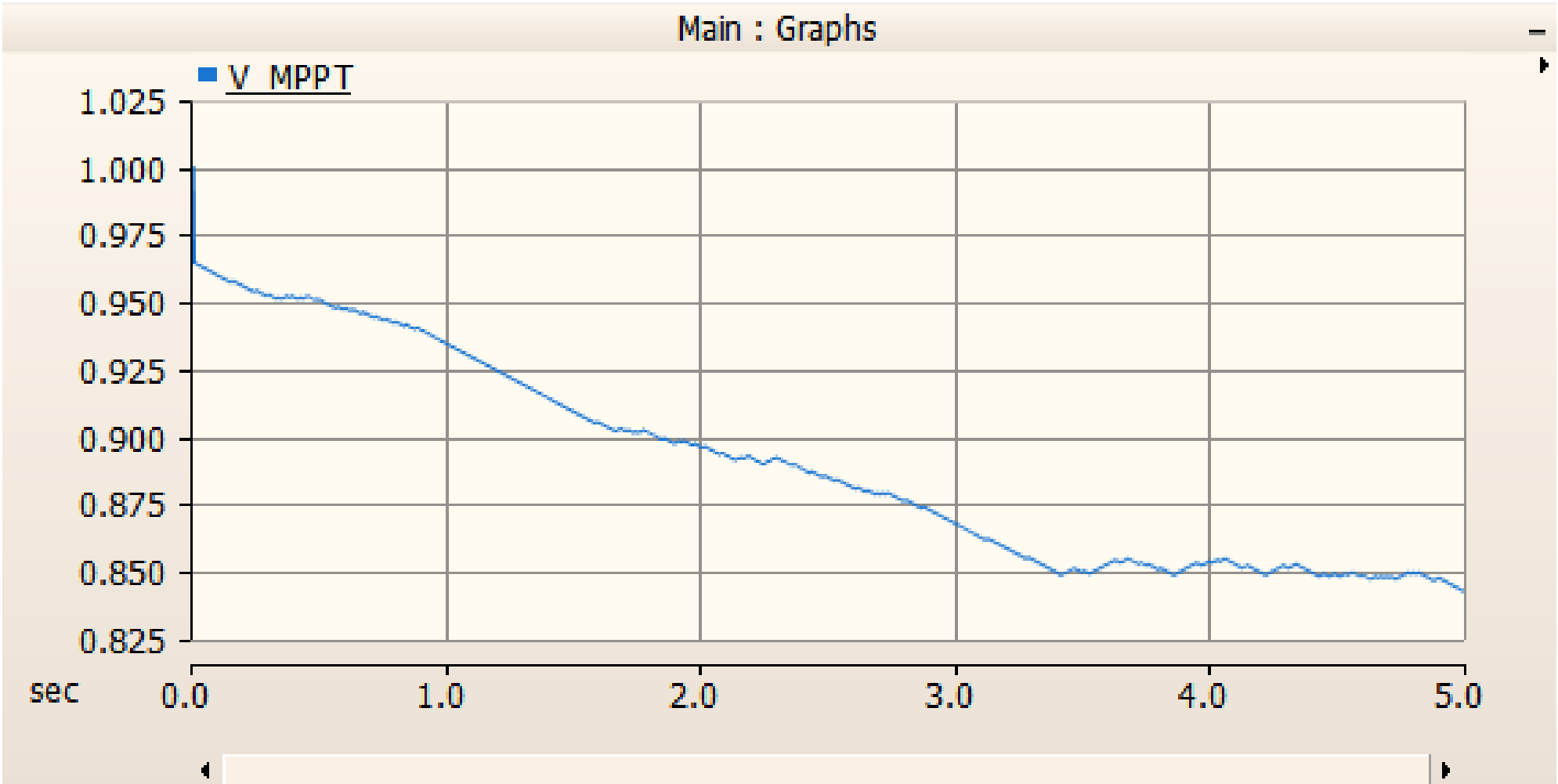
—



V_{MPPT} 테스트 과정

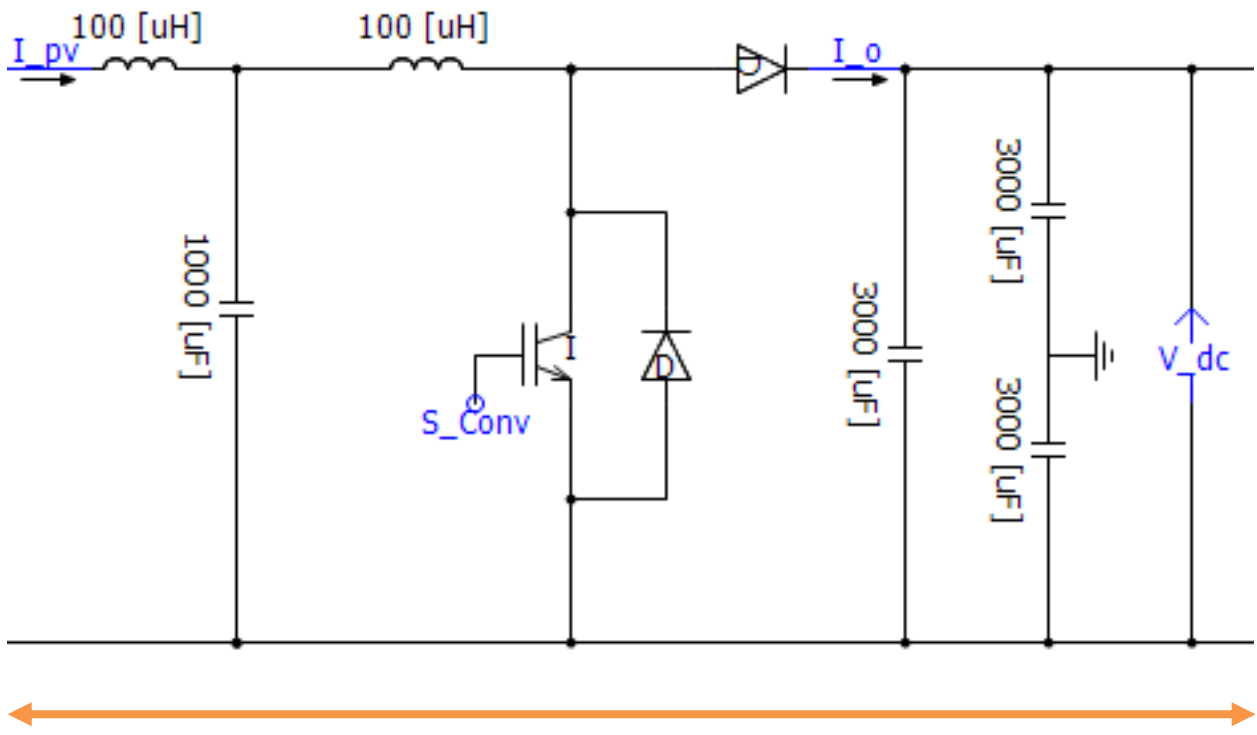


1) PV Panel 제어

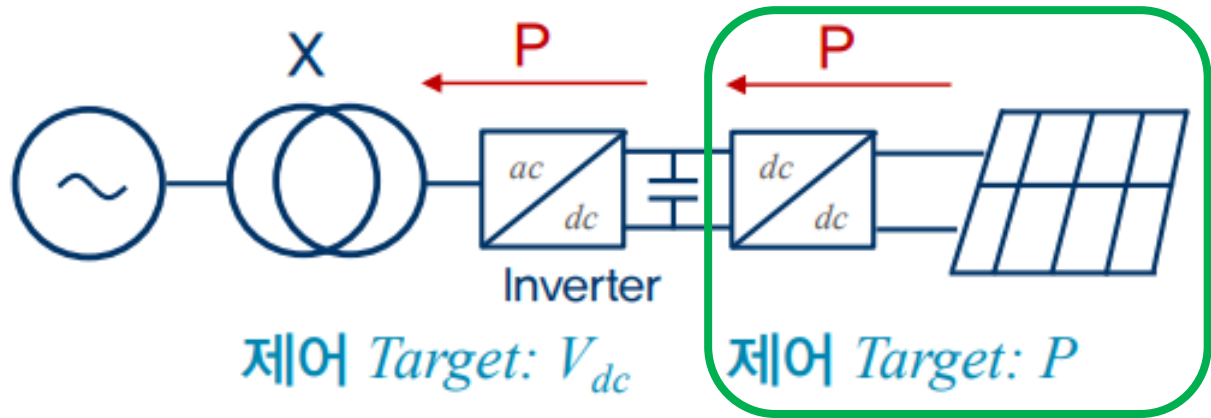


✓ MPPT 제어에 따른 V_{MPPT} 계산 결과 ($t = 0.0 \sim 5.0$ [sec])

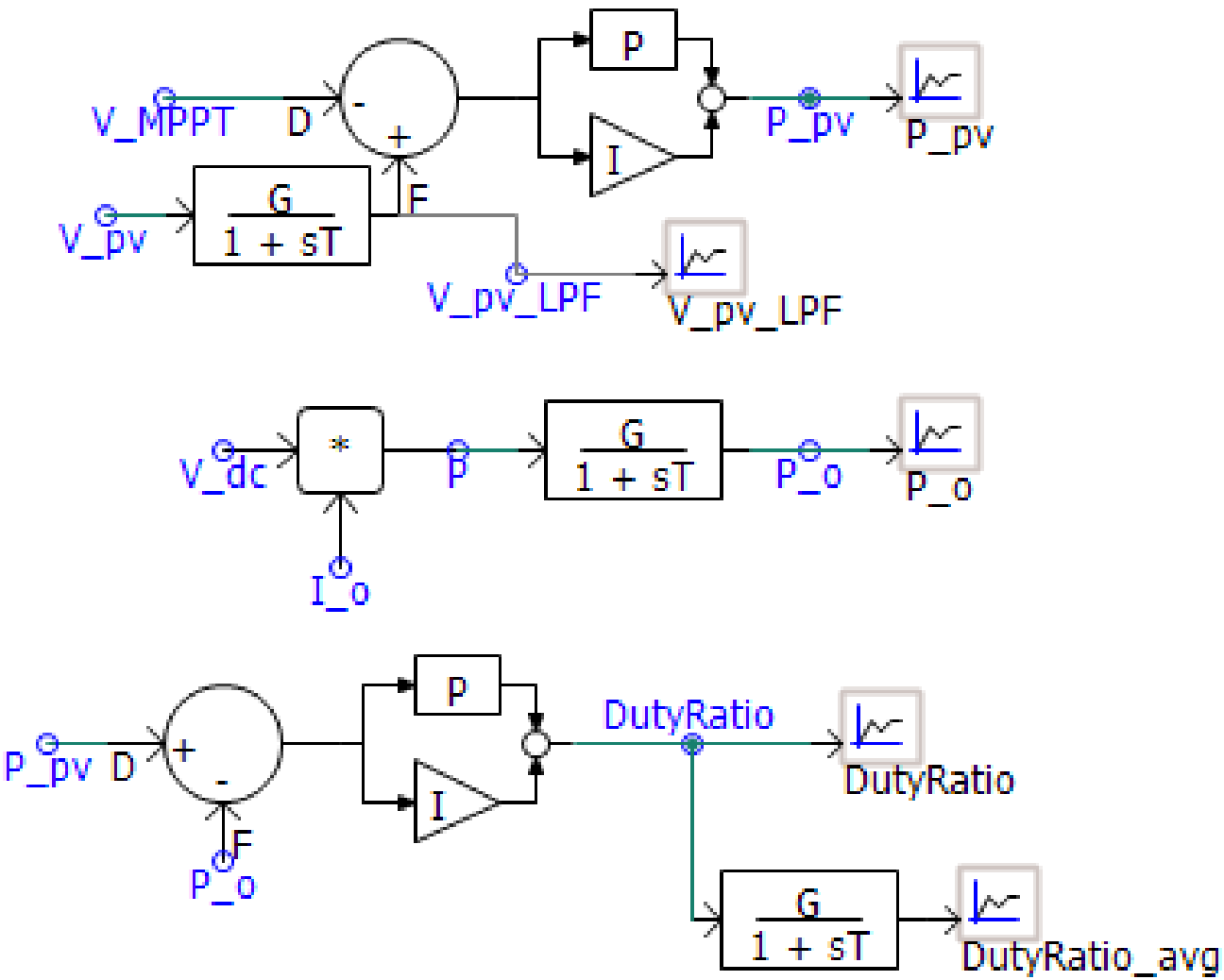
2) Boost Converter 제어



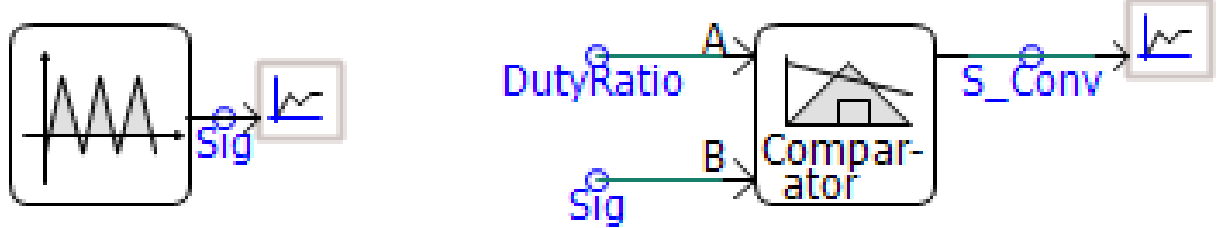
Boost Converter



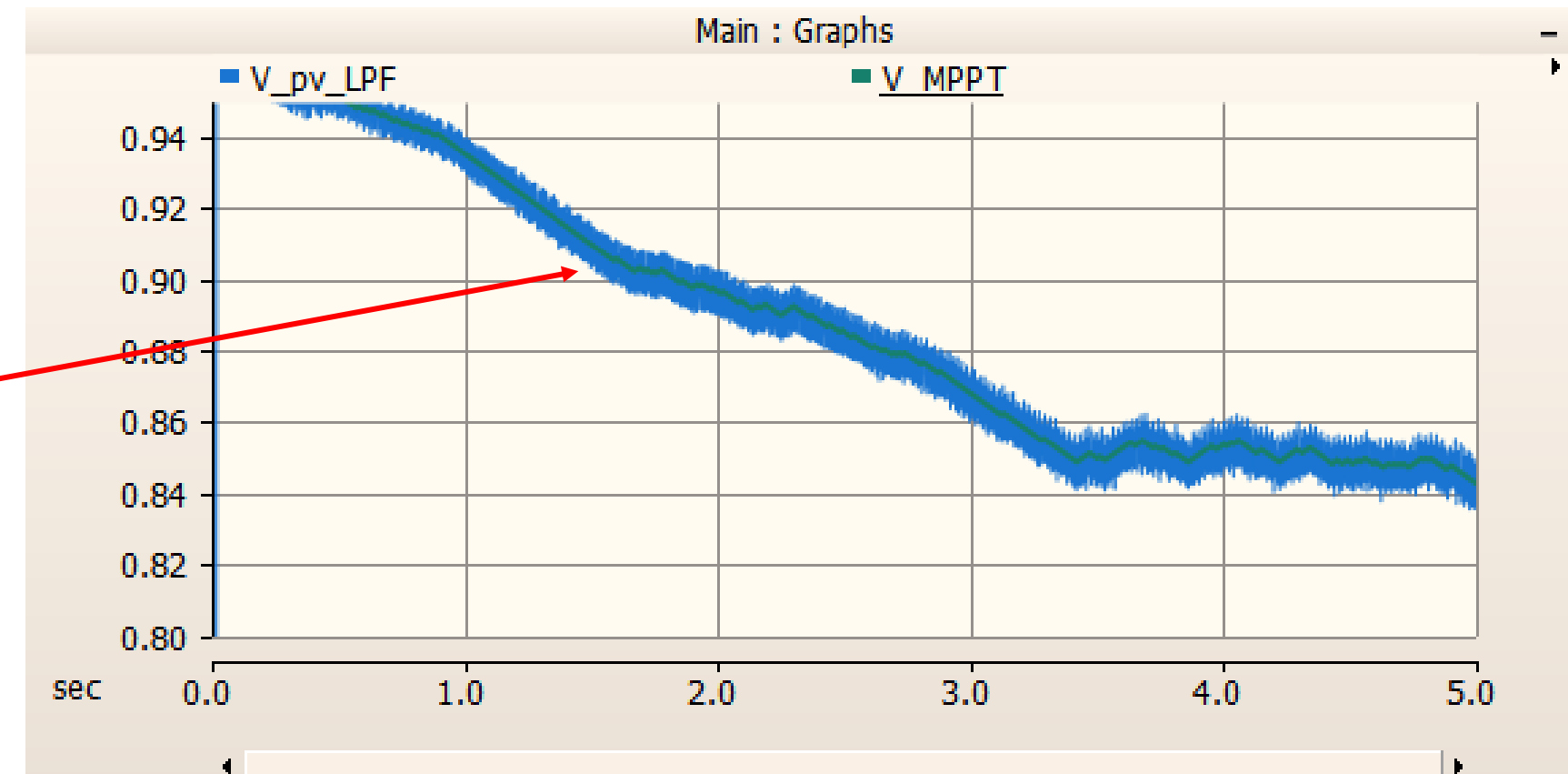
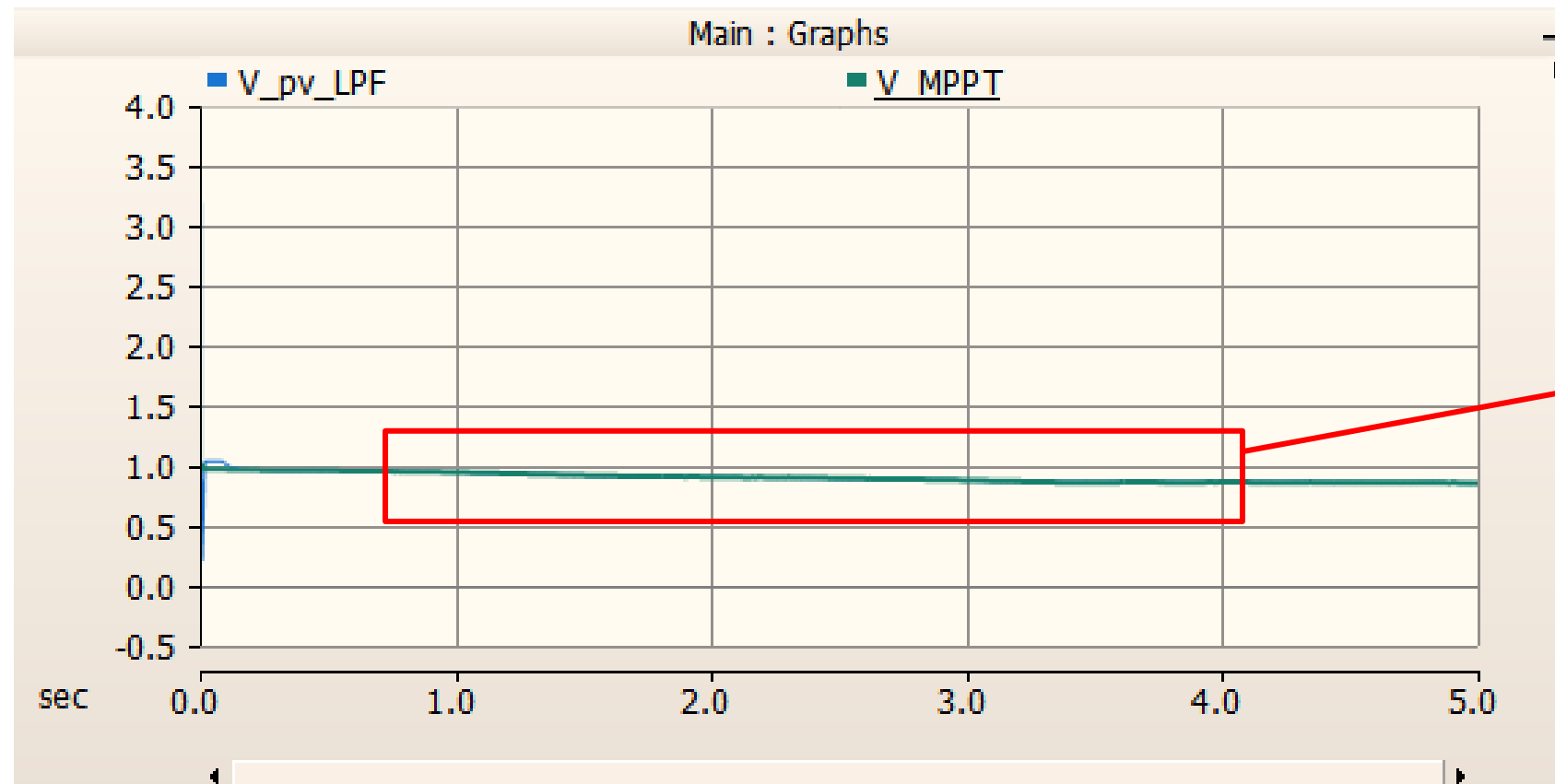
→ Boost Converter의 제어 Target은 출력 전력(P)



- 1. 최대 전력을 전달할 수 있도록 V_{pv} 가 V_{MPPT} 를 추종하도록 제어
- 2. Boost Converter의 출력 전력을 계산 (Low Pass Filter 추가)
- 3. P_o 가 P_{pv} 를 추종하도록 하는 Boost Converter의 듀티비 계산
- 4. 3600[Hz] 삼각파와 듀티비의 비교를 통한 Boost Converter 스위치 신호 생성



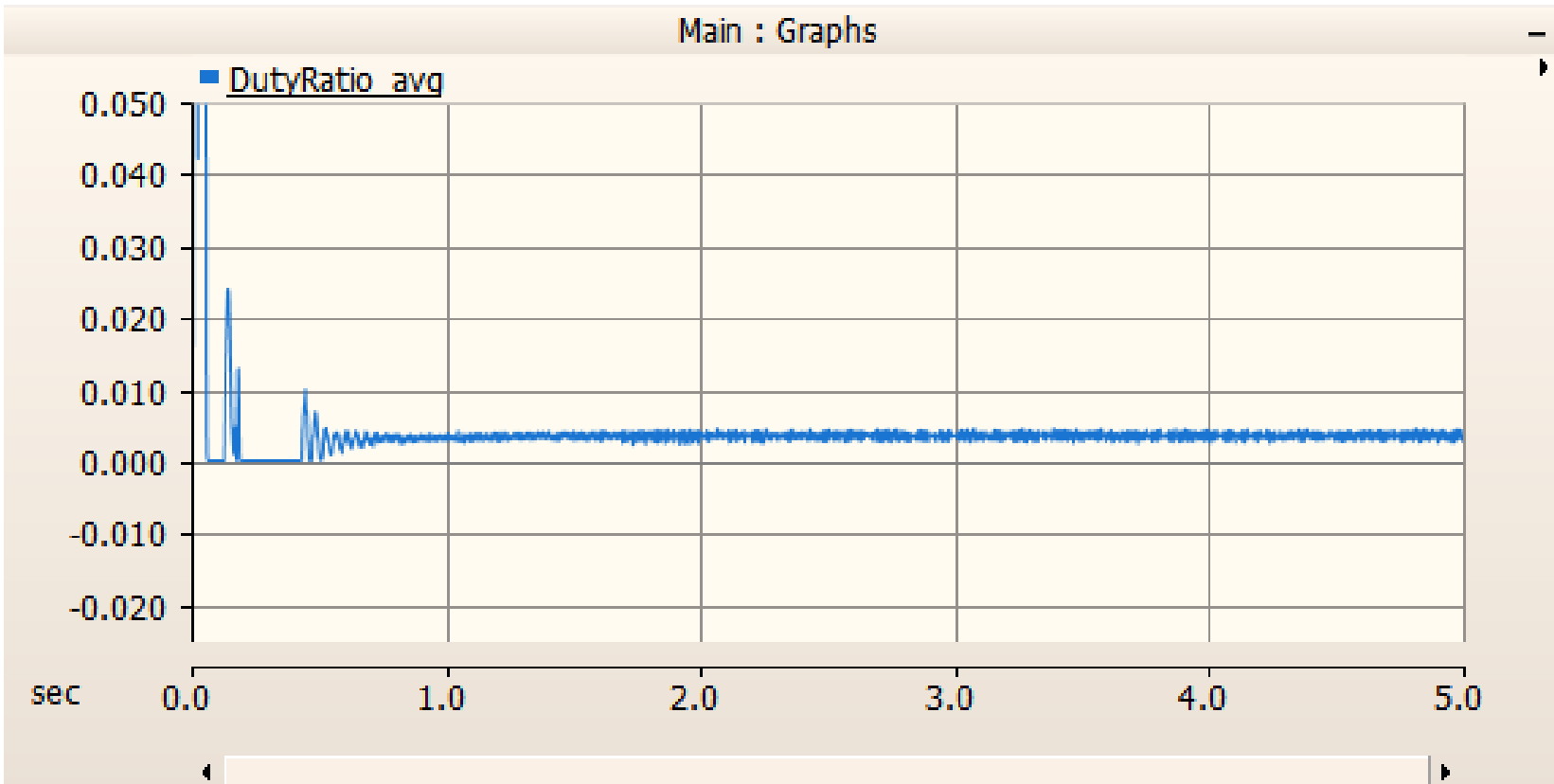
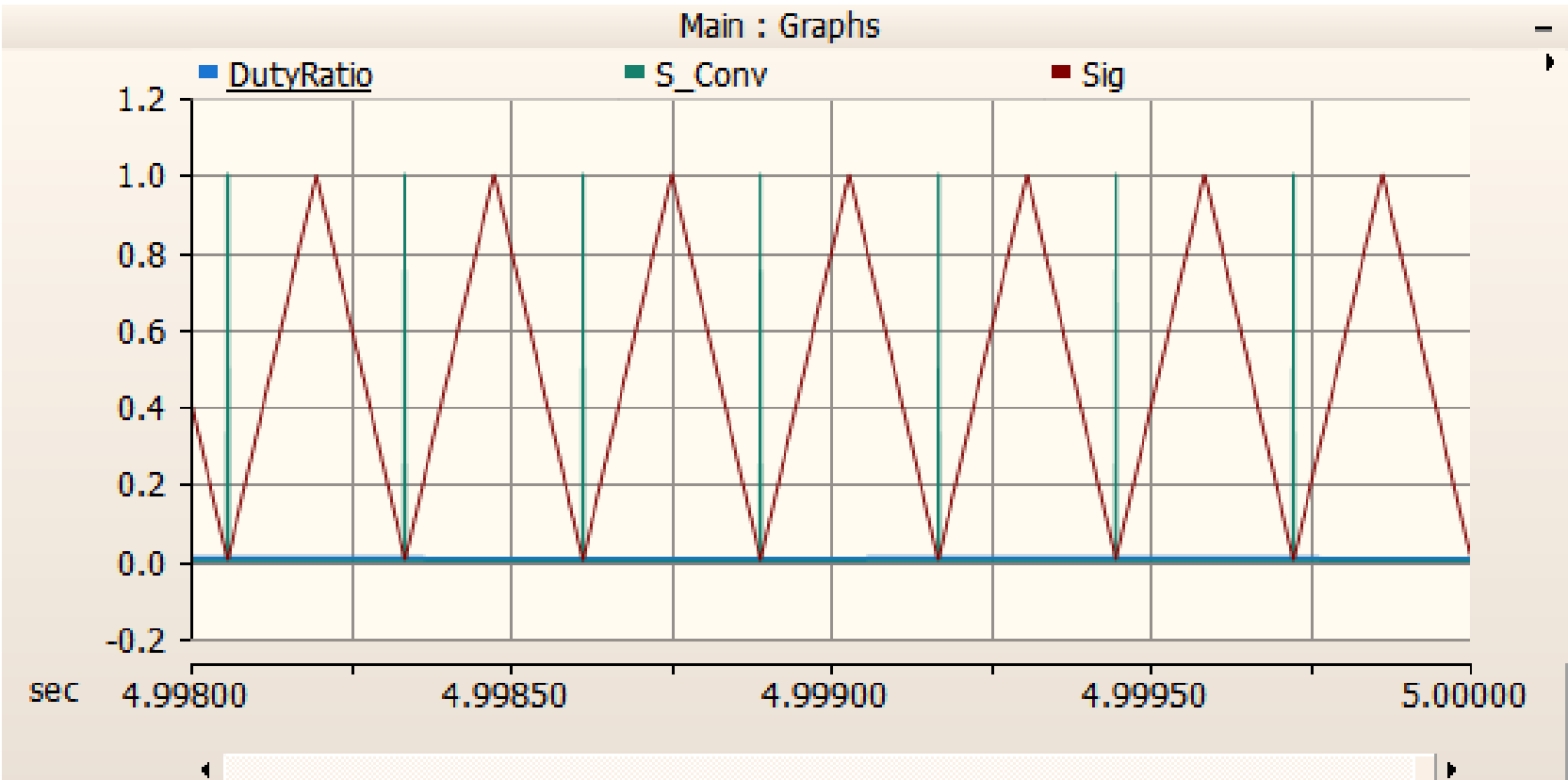
2) Boost Converter 제어



✓ V_{pv} (Low Pass Filter)의 V_{MPPT} 추종 확인

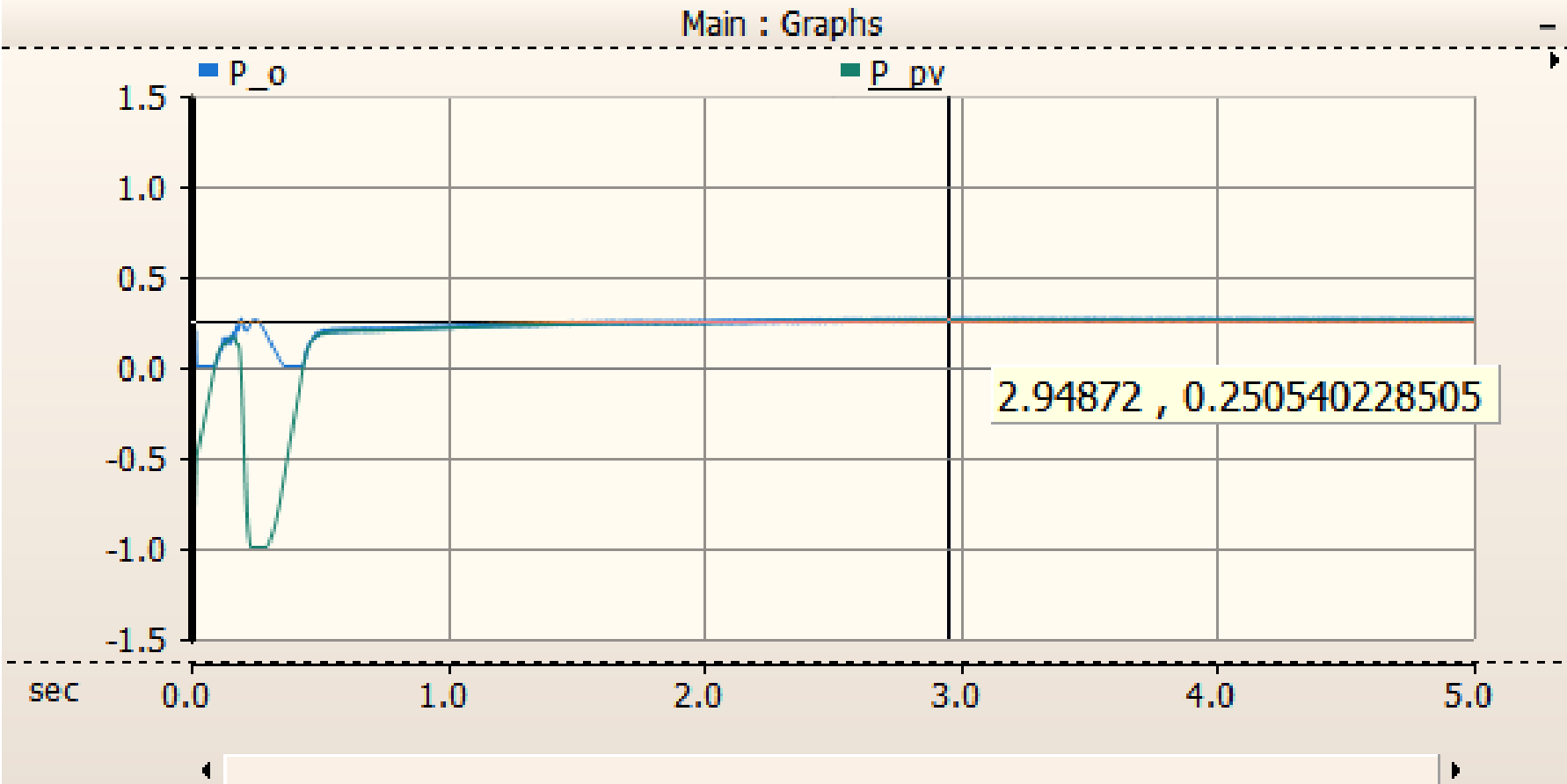
2) Boost Converter 제어

—



✓ Boost Converter 스위치 신호 생성 그래프 (t = 4.9980 ~ 5.0000 [sec])

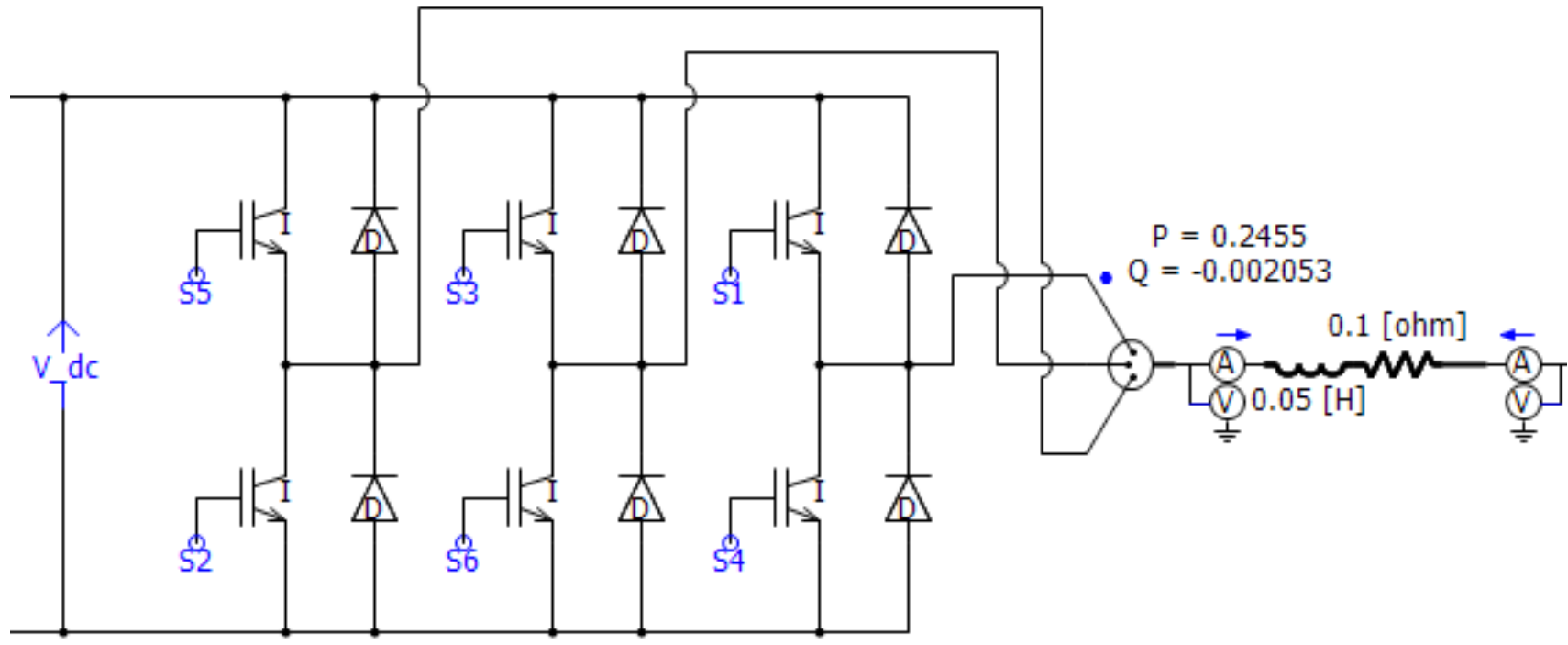
2) Boost Converter 제어



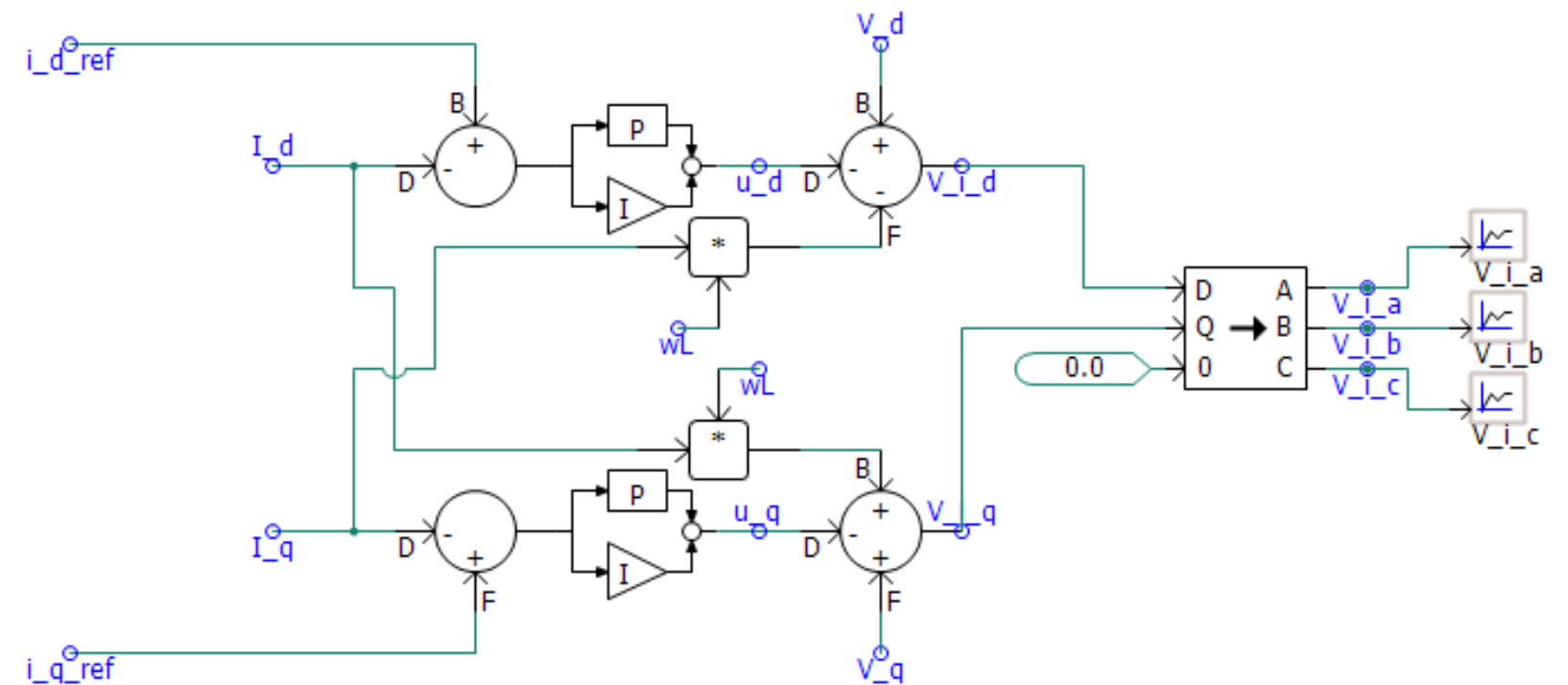
단위 : [MW]

- ✓ P_o 의 P_{pv} 추종 확인 (Oscillation 발생)
- ✓ P_o 와 P_{pv} 는 PV Panel의 출력인 250[kW]에 수렴

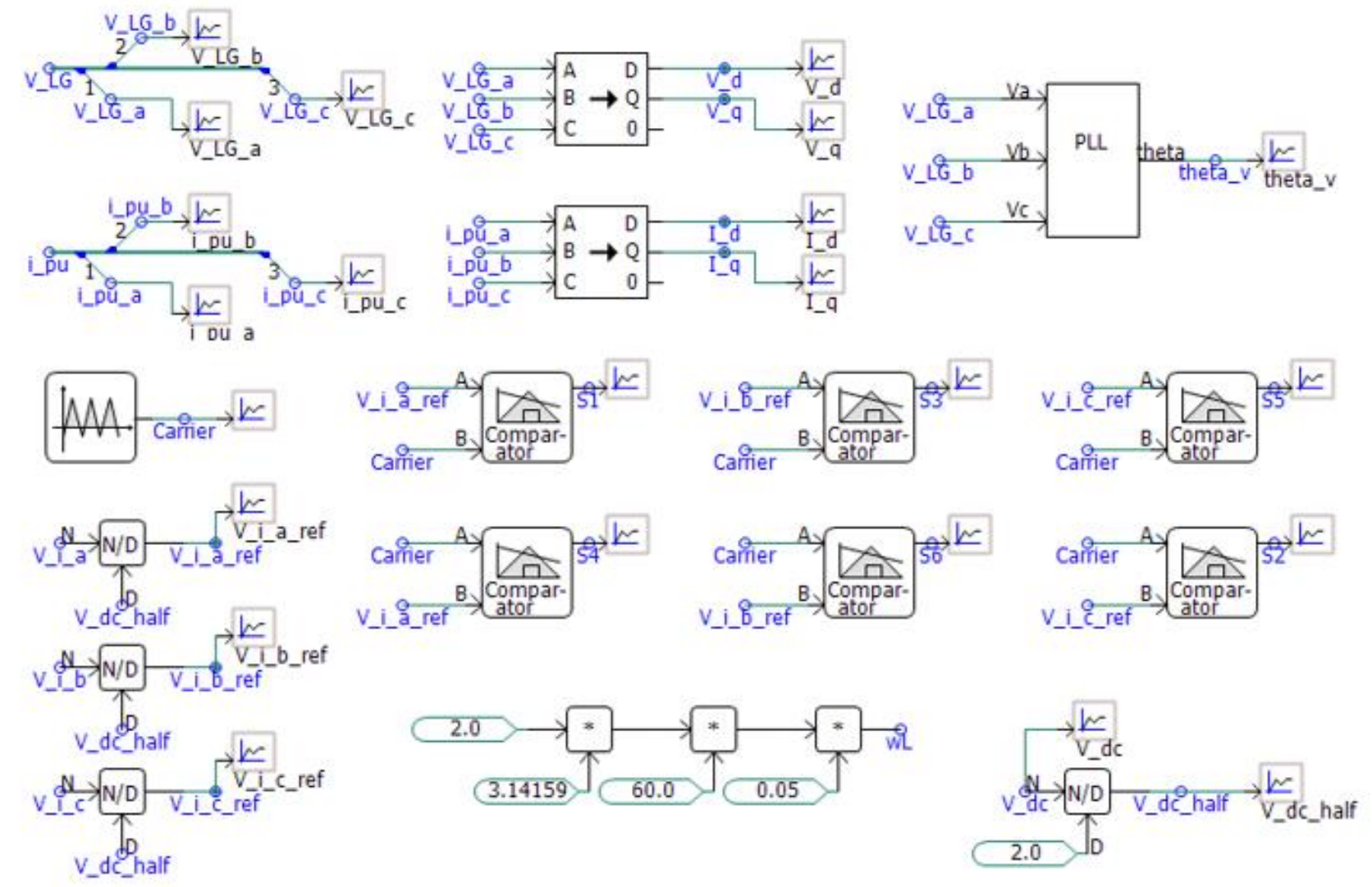
3-1) 3-Phase PWM Inverter Inner Loop 제어



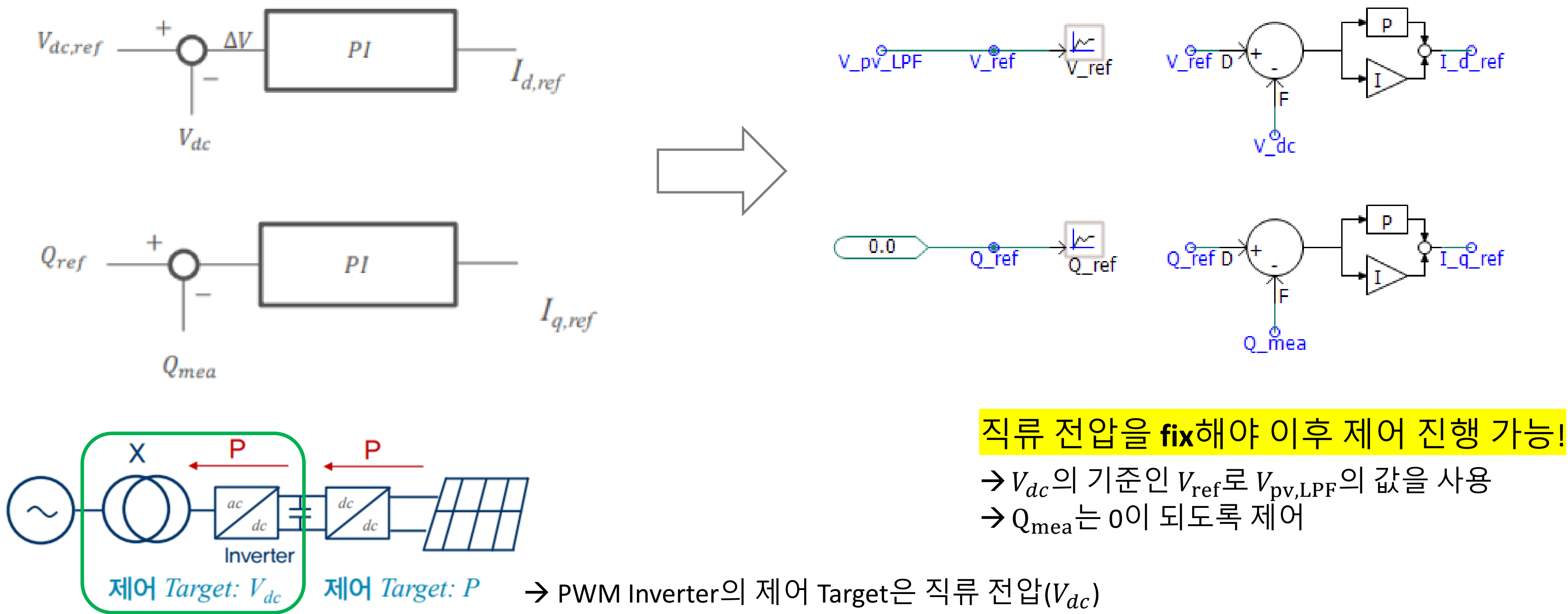
3-Phase PWM Inverter



Inner Loop 전류 제어기 설계

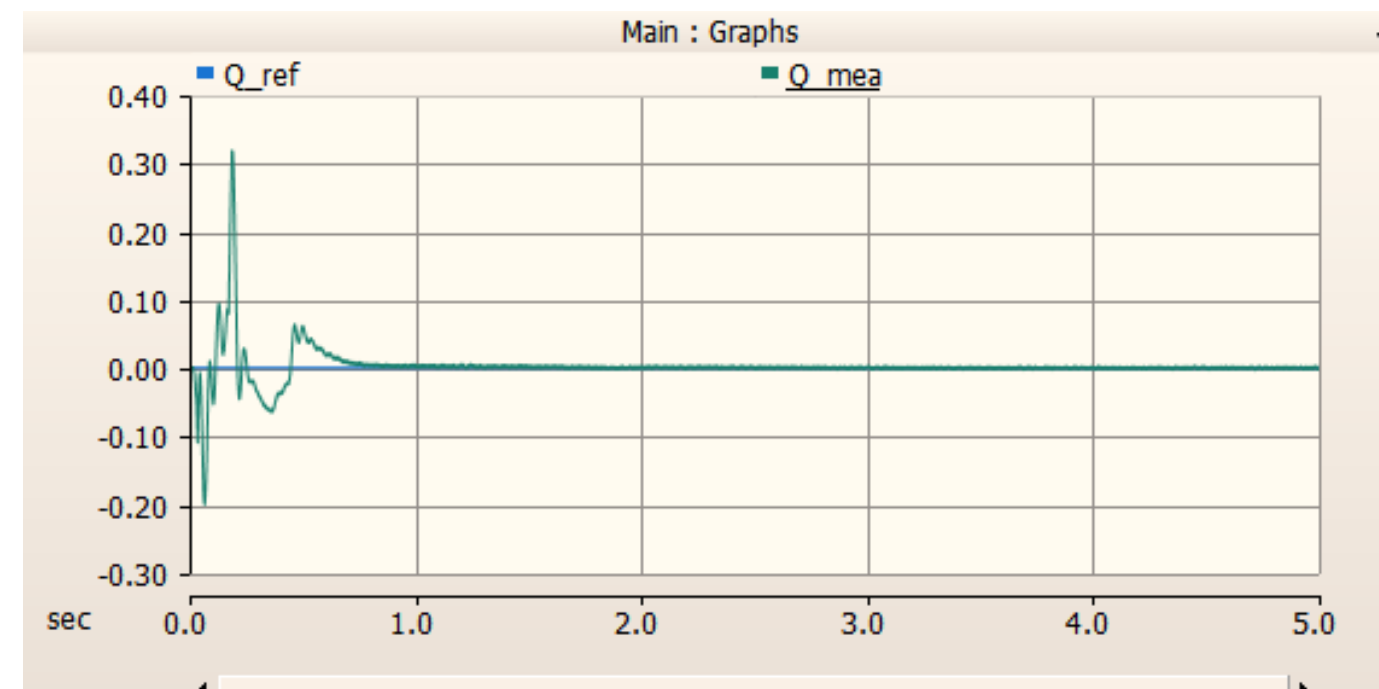
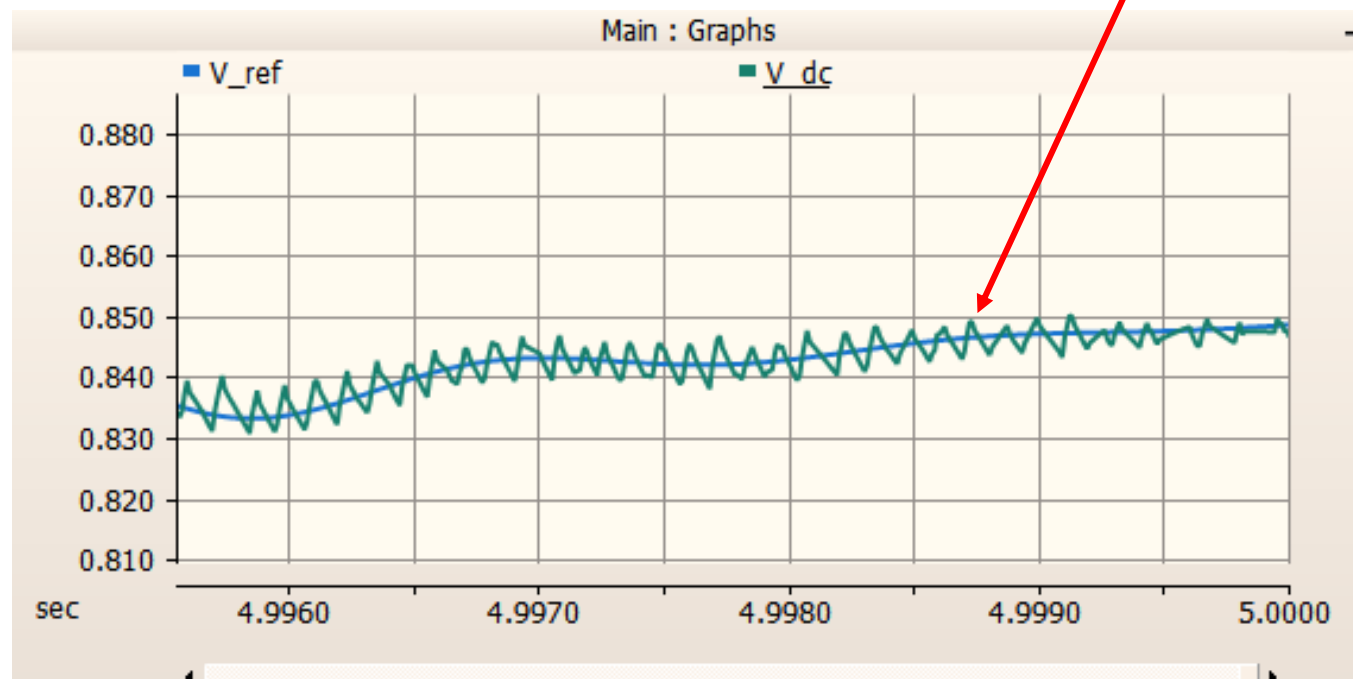
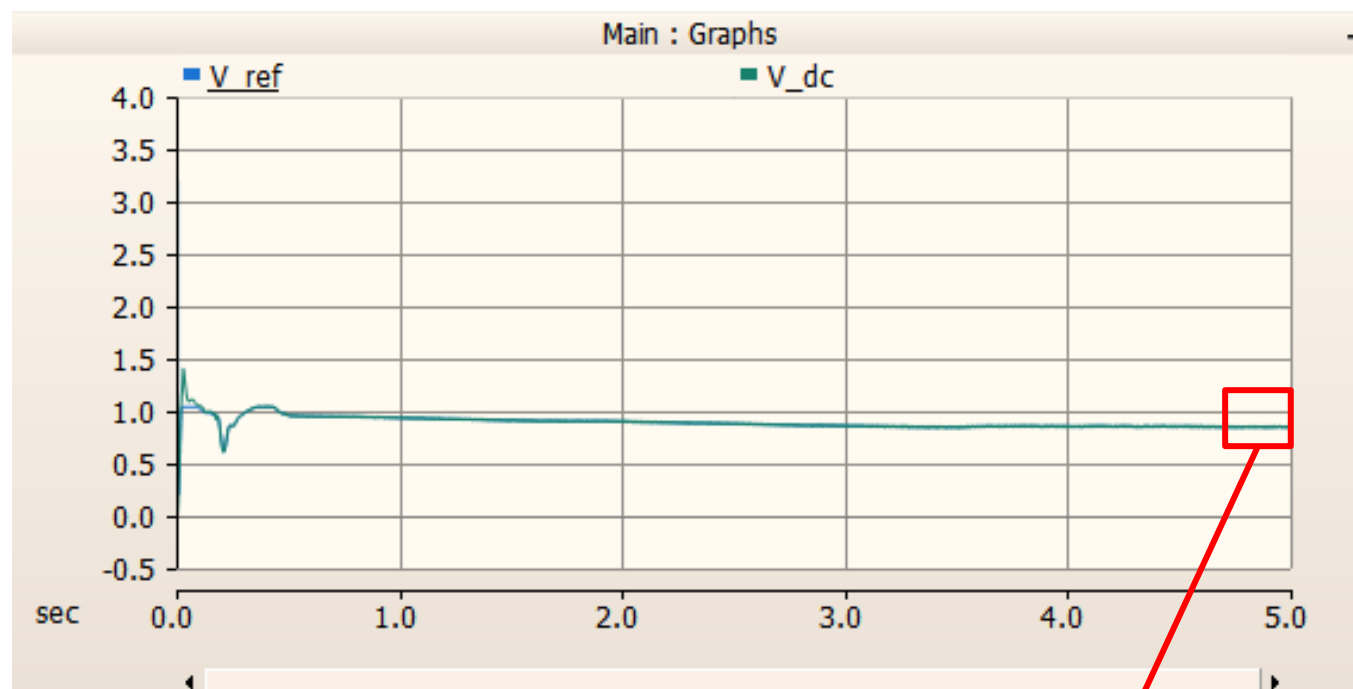


3-2) 3-Phase PWM Inverter Outer Loop 제어



→ PWM Inverter의 제어 Target은 직류 전압(V_{dc})

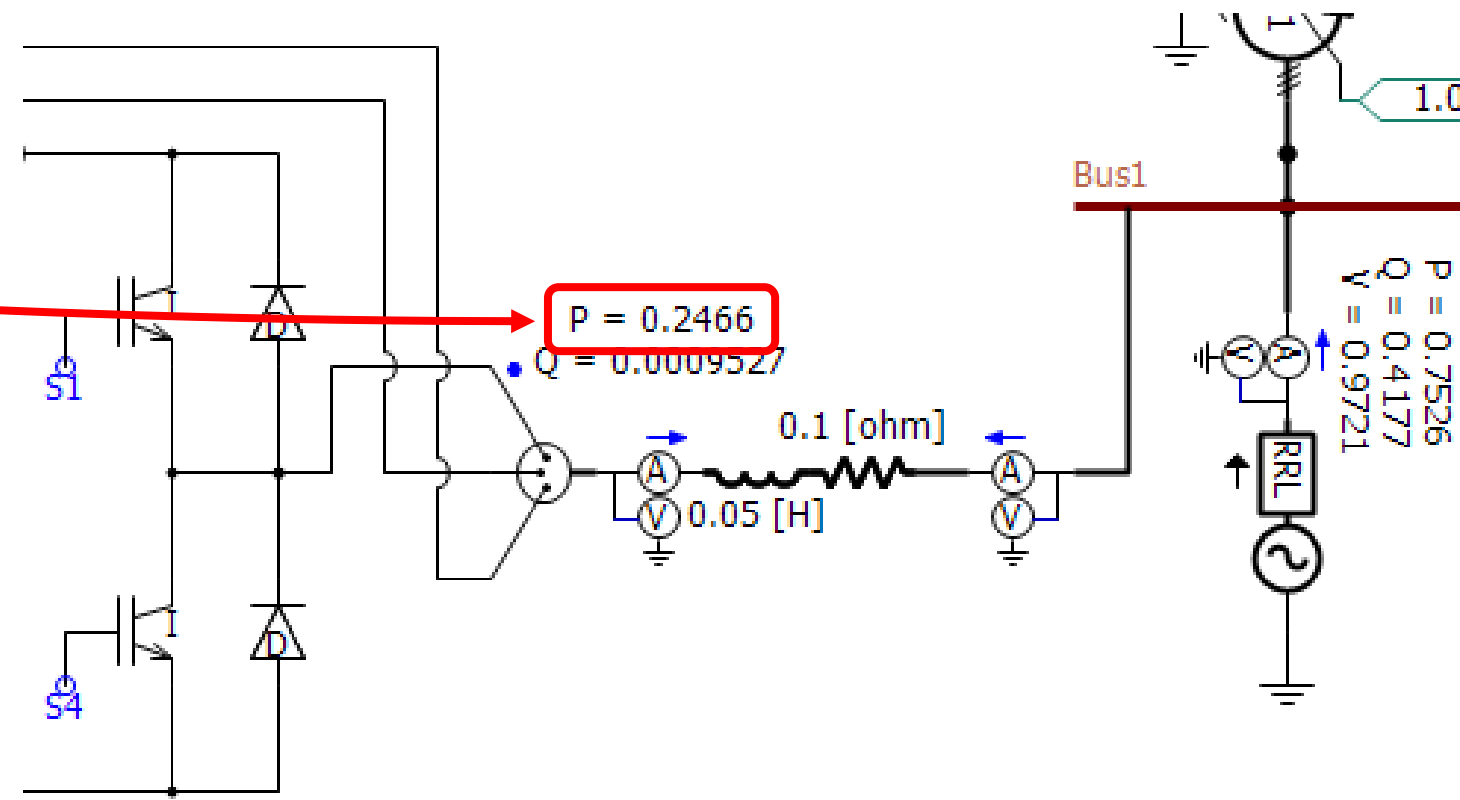
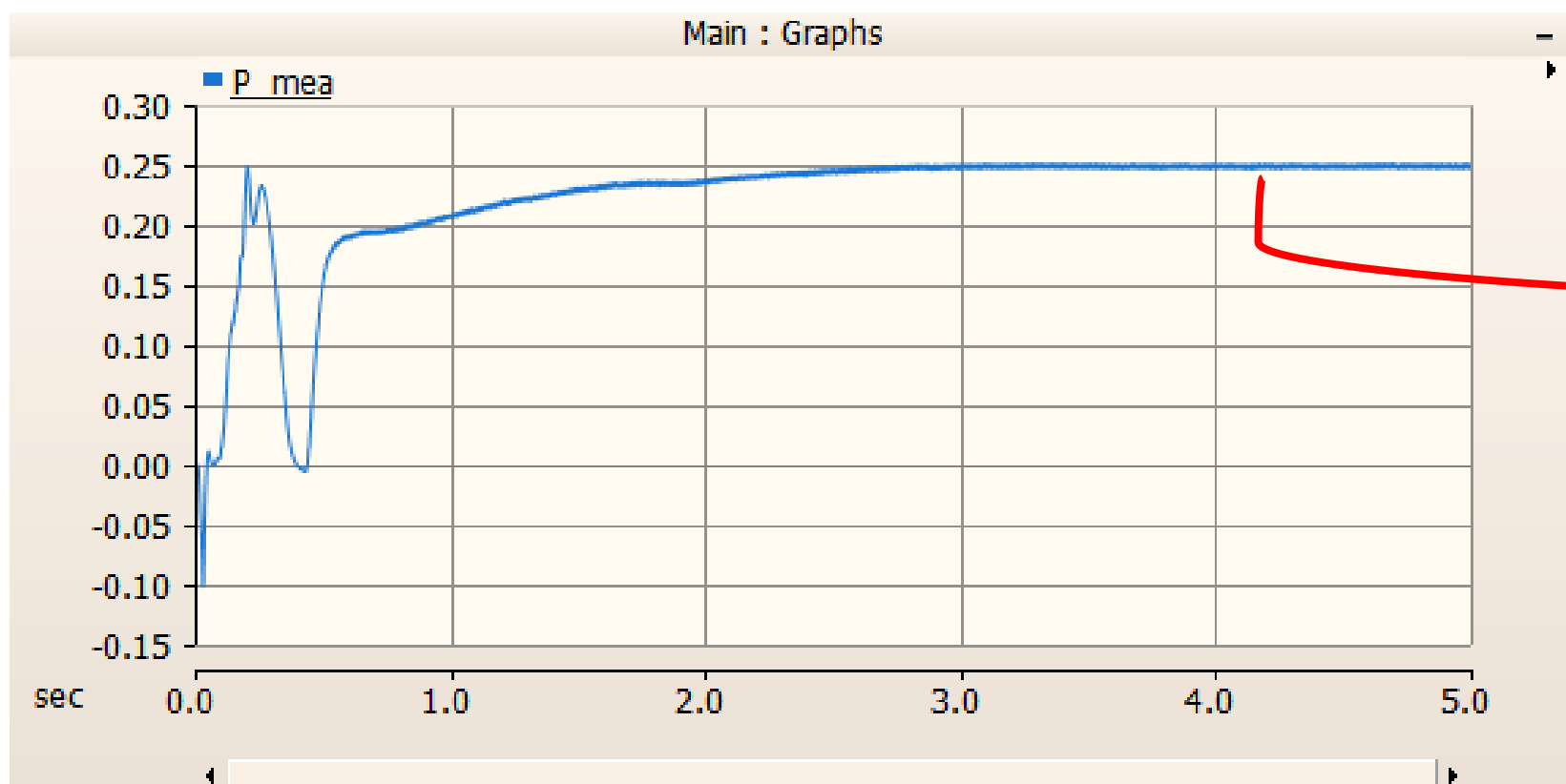
3-2) 3-Phase PWM Inverter Outer Loop 제어



✓ V_{ref} 의 변화에 따른 직류 전압 V_{dc} 추종 확인

✓ $Q_{ref} = 0$ 에 의한 Q_{mea} 추종 확인

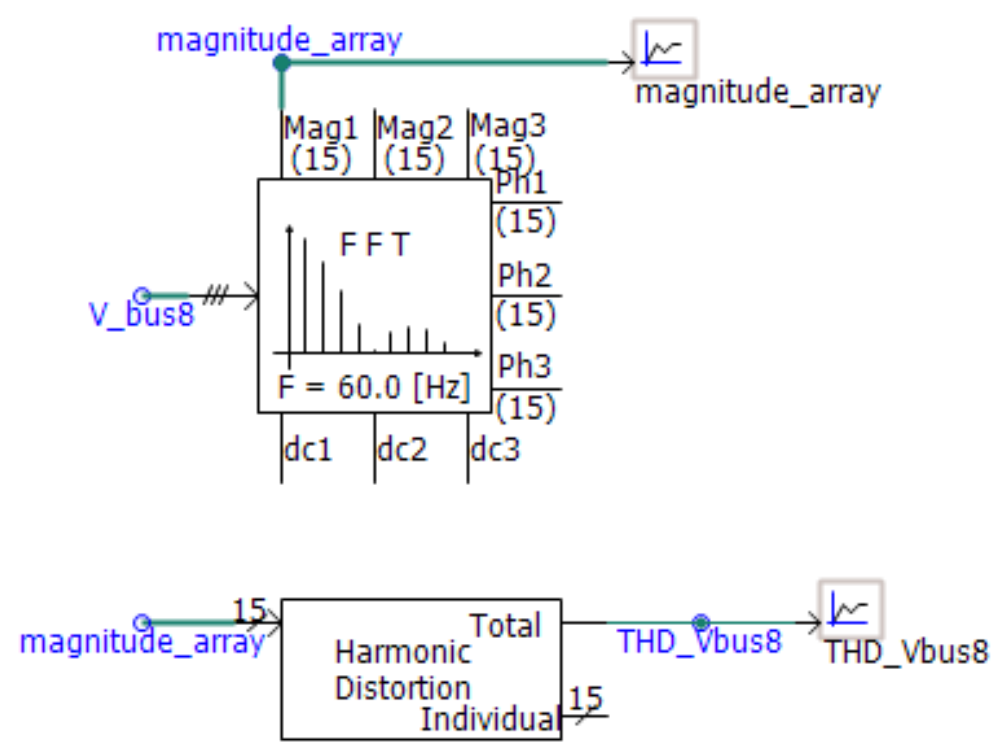
4) 제어 결과



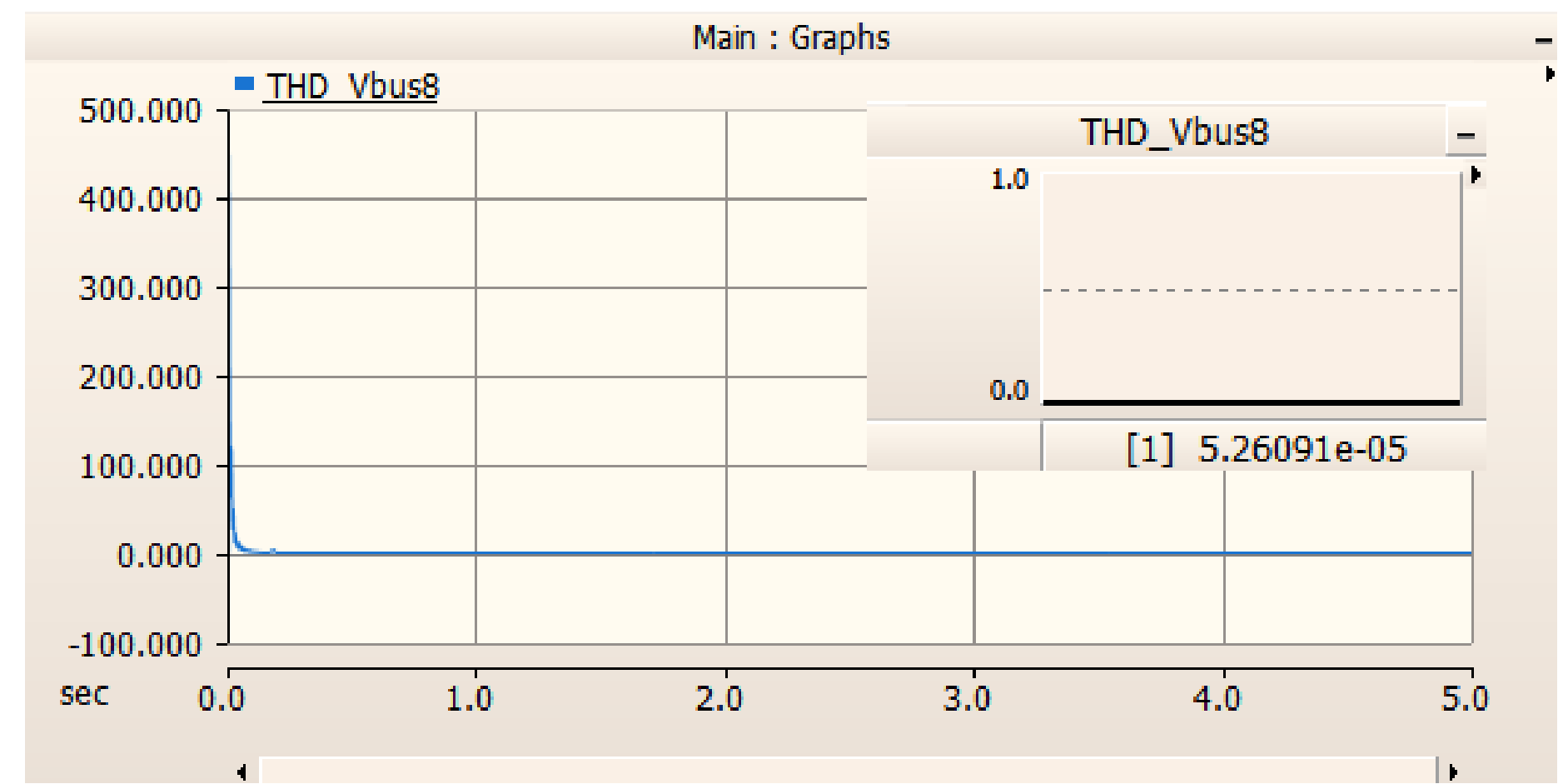
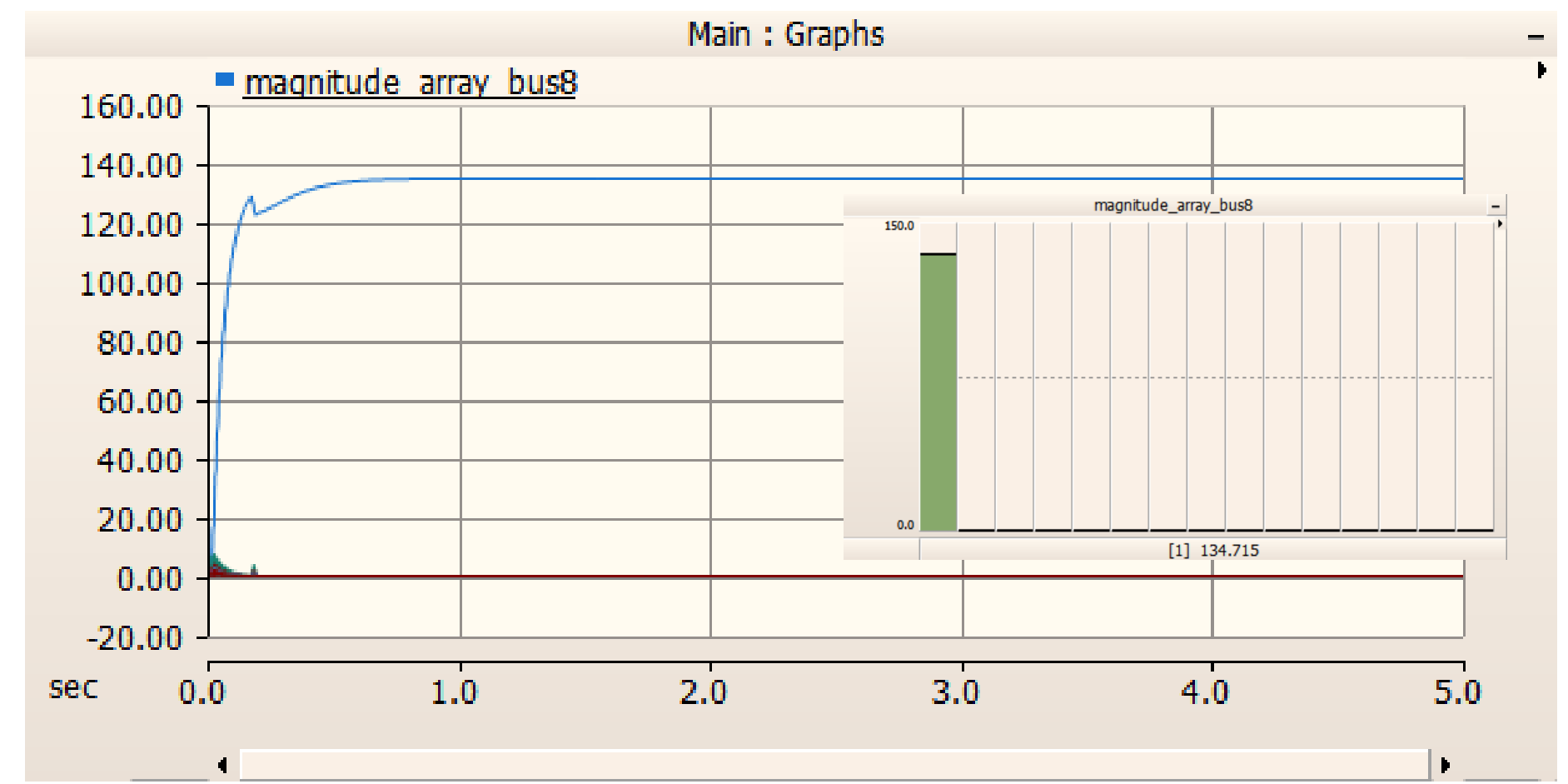
PV System으로부터 IEEE 9 Bus System으로 전력 250[kW] 공급

FFT 수행 및 고조파 분석

1) PV System 계통연계 전

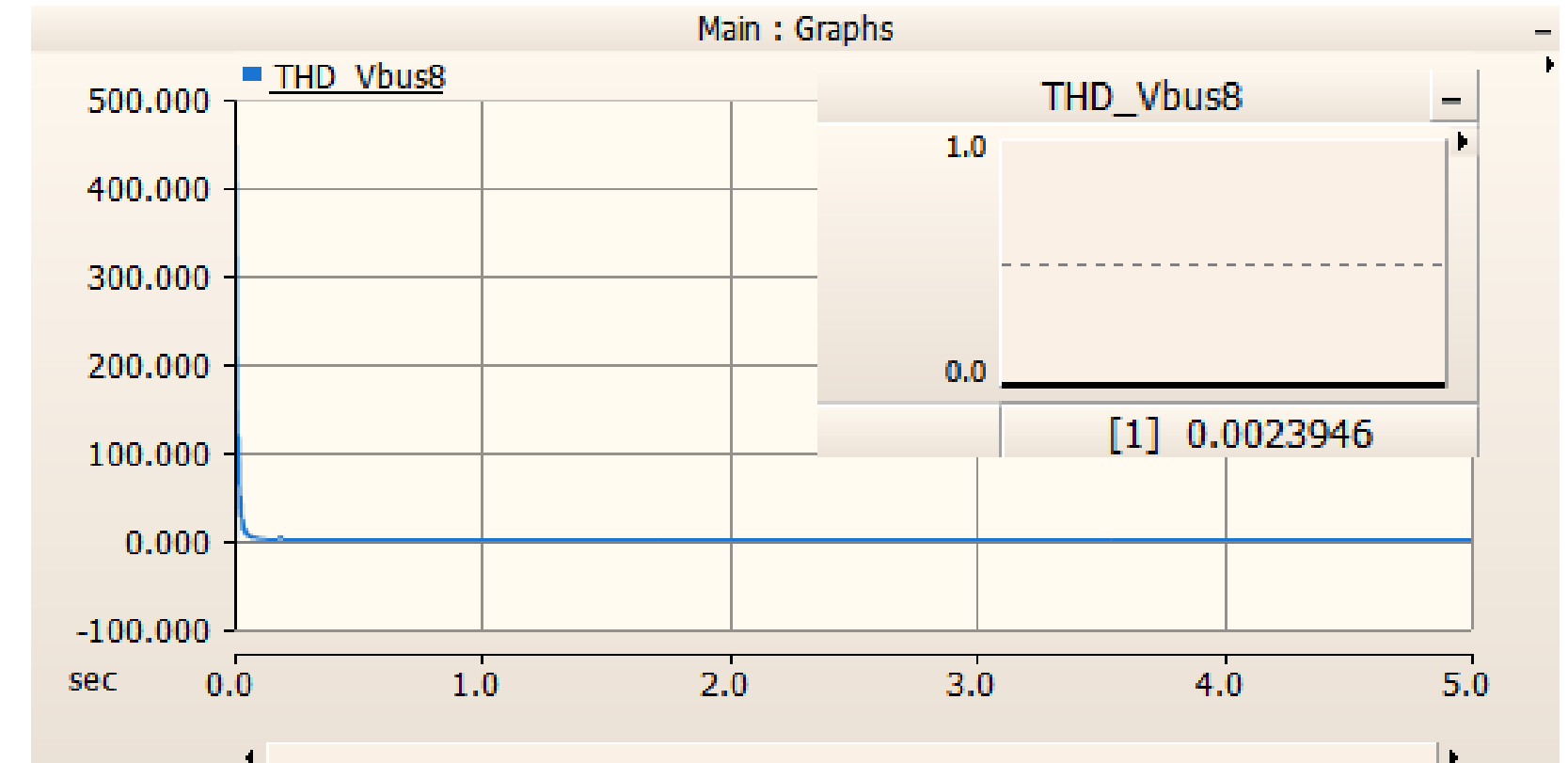
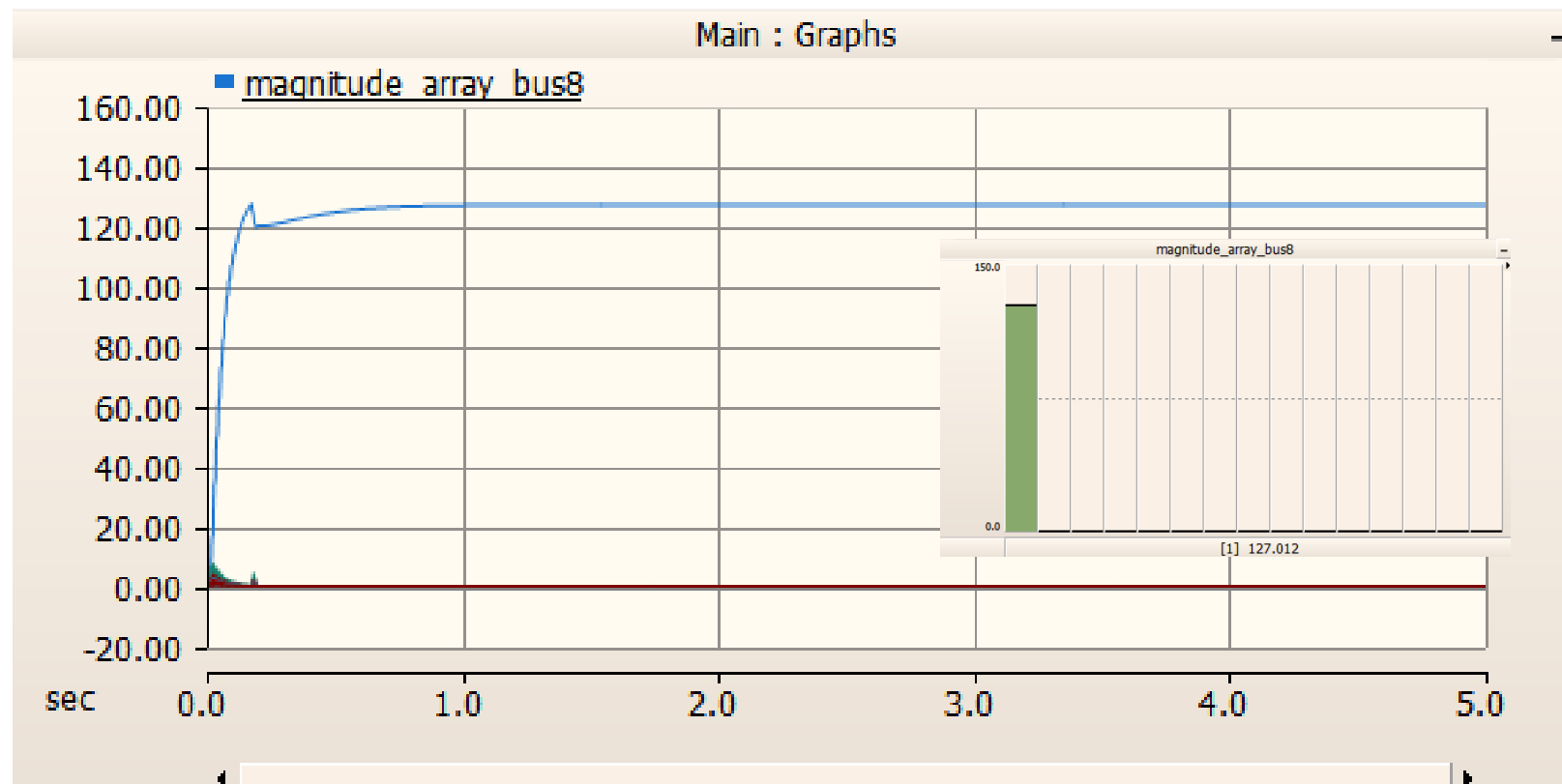


Bus 8 부하의 전압 THD = 0.00005261 [%] ←



FFT 수행 및 고조파 분석

2) PV System 계통연계 후



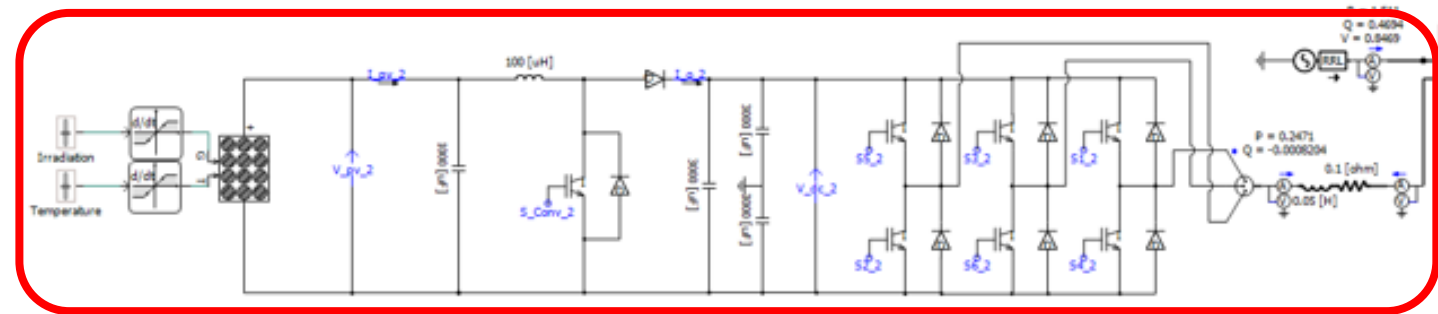
Bus 8 부하의 전압 THD = 0.0023946 [%]

✓ PV System 계통연계 후 Bus 8의 전압 THD 약 45배 증가, but 여전히 작은 수치

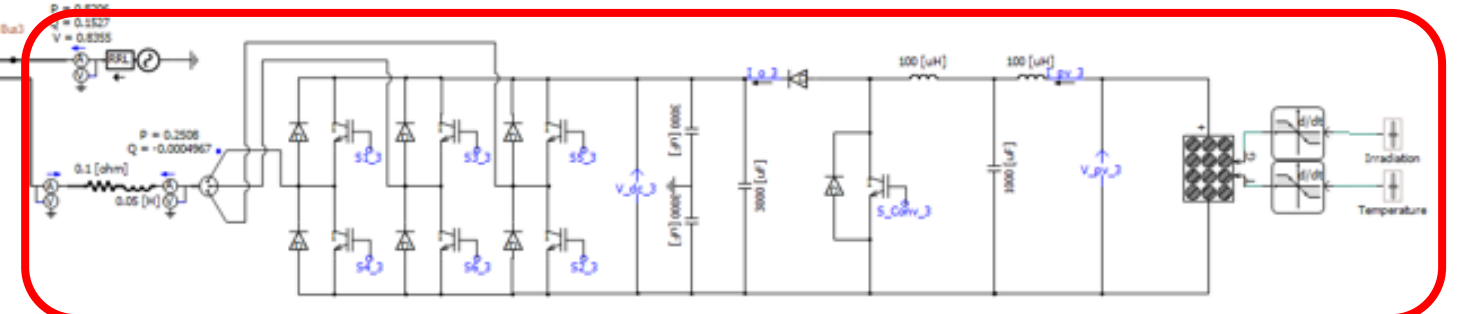
FFT 수행 및 고조파 분석

3) PV System 추가 연계

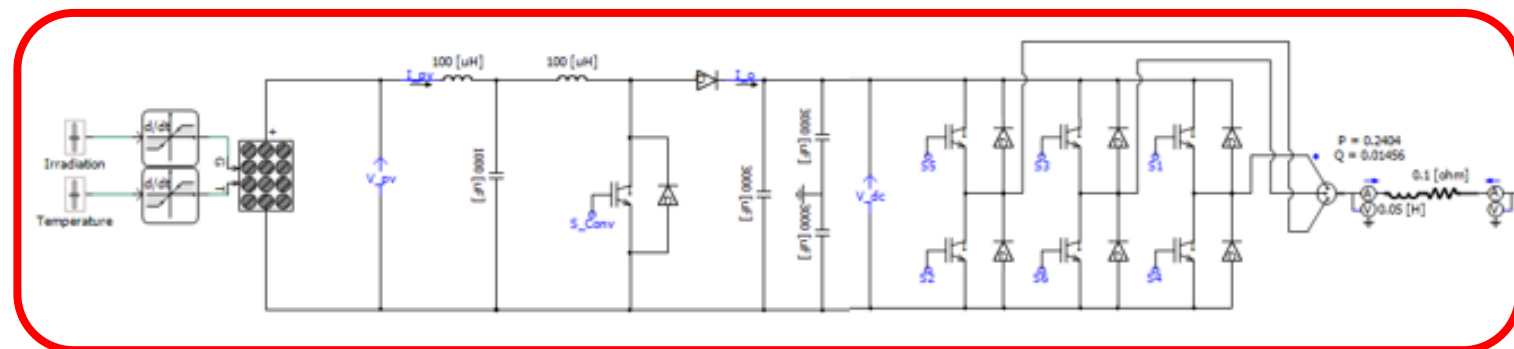
PV System for Bus 2



PV System for Bus 3



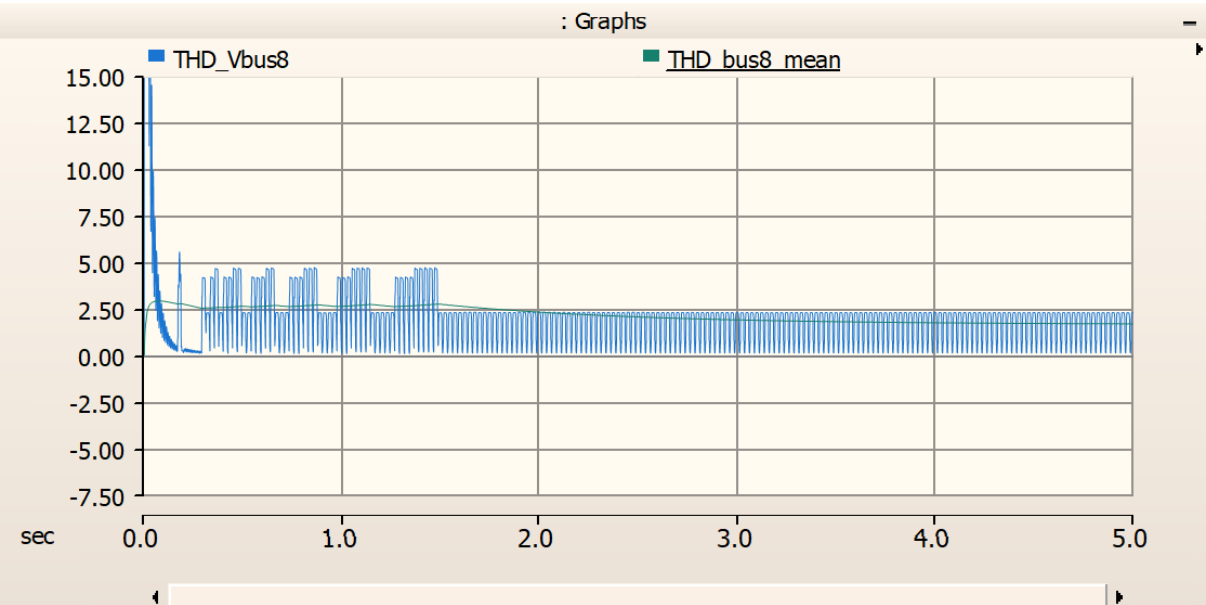
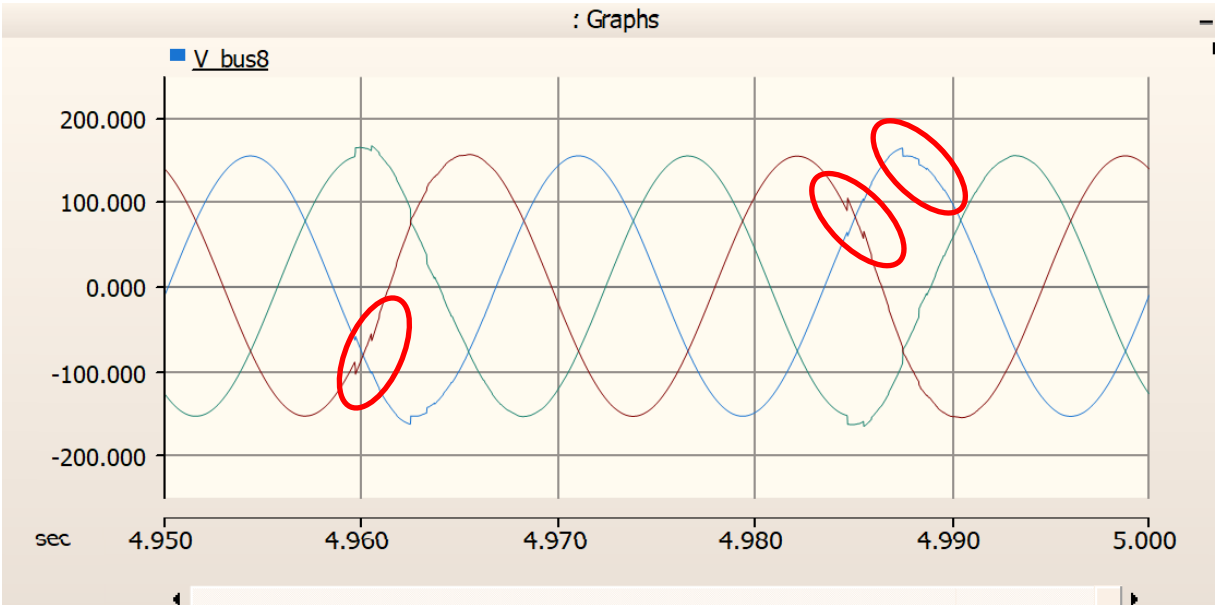
PV System for Bus 1



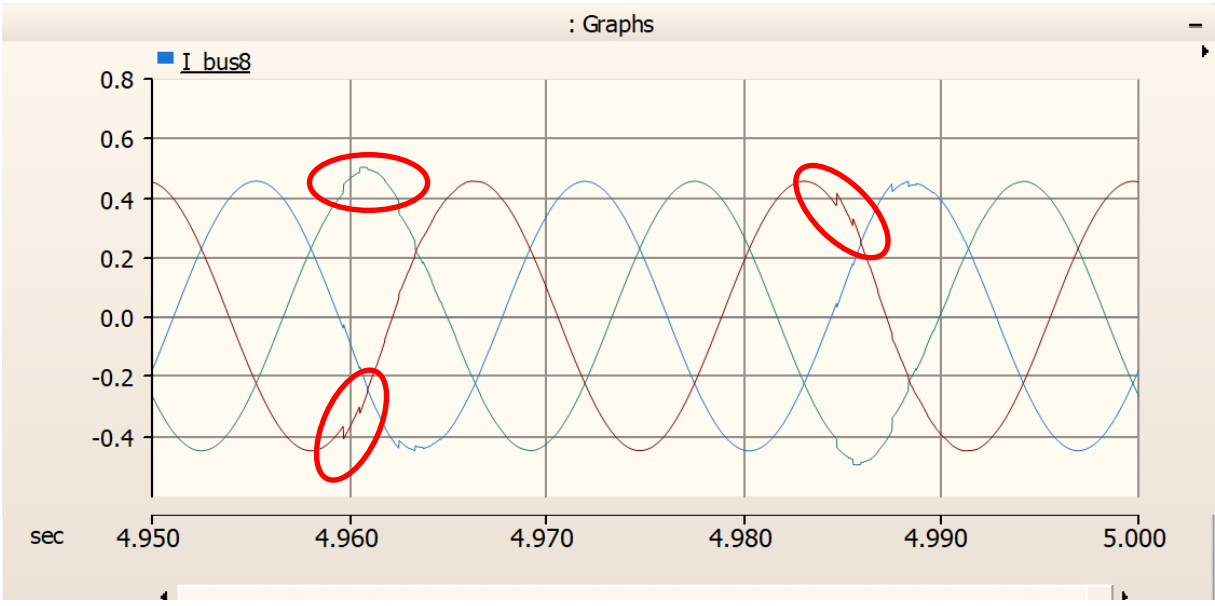
✓ 유의미한 결과 도출을 위해 Bus 2와 Bus 3에도 PV System 추가 연계

FFT 수행 및 고조파 분석

3) PV System 추가 연계



$THD_V = 1.675 \text{ [\%]}$



TDD 계산 (Bus8 / LCL필터X)		
n	I_n	TDD [%]
I_peak	0.353553	1.977874
2	0.002886	
3	0.003617	
4	0.003489	
5	0.002969	
6	0.002043	
7	0.000904	
8	0.000247	
9	0.000209	

10	0.000383
11	0.000517
12	0.000596
13	0.000488
14	0.000236
15	0.000588



$TDD_i = 1.978 \text{ [\%]}$

고조파 관리 기준



1) Power Quality - IEEE 519-2022

Table 1(IEEE 519-2022, pg.17) voltage distortion limits

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

Table 2 (IEEE 519-2022, pg.19) current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

ISC/IL	Harmonic limits a,b $2 \leq h < 11$	Harmonic limits a,b $11 \leq h < 17$	Harmonic limits a,b $17 \leq h < 23$	Harmonic limits a,b $23 \leq h < 35$	Harmonic limits a,b $35 \leq h \leq 50$	TDD Required
<20c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

고조파 관리 기준

2) 한국전력공사 전기공급약관

제 5 장 전기사용에 따른 협력

제 26 조 [전기사용에 따른 보호장치 등의 시설]

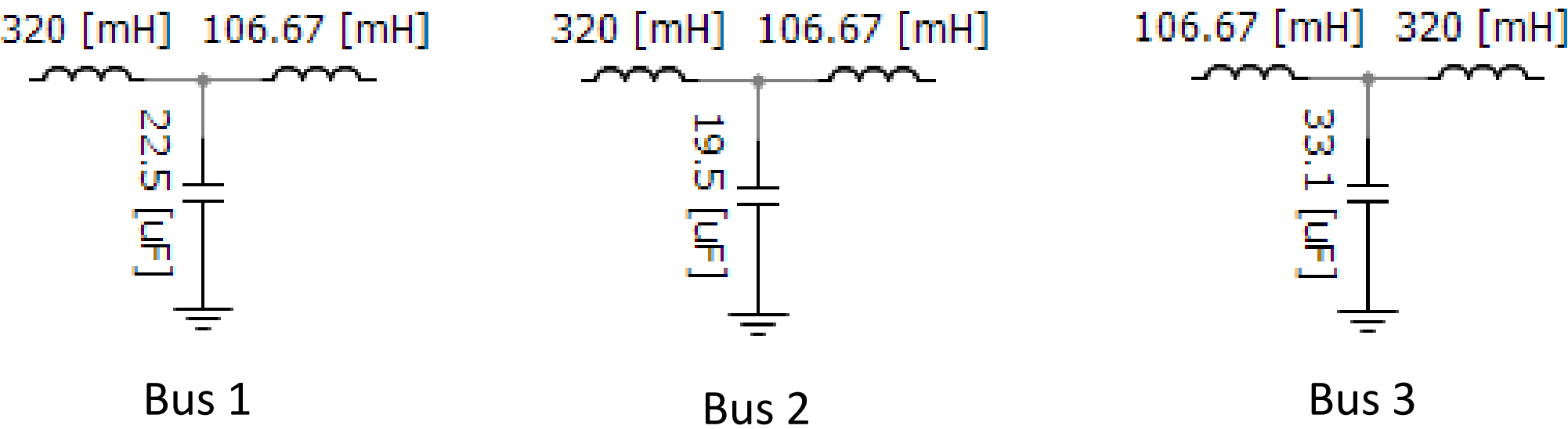
- ① 전기로, 전기철도 등에 전력을 사용하는 고객으로서 플리커나 고조파 (이하 "플리커 등"이라 한다)가 발생하여 다른 고객의 전기사용을 방해할 우려가 있는 고객에 대해서는 한전에서 플리커 등을 검토해야 한다.
- ② 제 1항에 해당하는 고객은 검토에 필요한 자료를 수급개시 예정일 6개월전까지 한전에 제출해야 한다.
- ③ 플리커 등을 검토한 결과가 다음에서 정한 허용기준치를 초과할 경우에는 고객의 부담으로 보호장치를 시설해야 한다.

전압	전압외형률[%] (지중)	증가방해전류 [A](지중)	전압외형률[%] (가공)	증가방해전류[A] (가공)
66[kV]이하	3.0	-	3.0	-
154[kV]이상	1.5	3.8	1.5	-

나.공급전압이 22. 9kV 이하인 경우					
3의 배수가 아닌 기수 고조파		3의 배수인 기수 고조파		우수 고조파	
차수 h	고조파전압%	차수 h	고조파전압%	차수 h	고조파전압%
5	3. 8	3	3. 1	2	1. 3
7	3. 1	9	0.9	4	0.6
11	2. 2	21	0.2	6	0.3
13	1. 9			8	0.3
31	{1.36×(17/h)}-0.16	>21	0.2	>8	{(0.15×(10/h))}+0.15
35					
37					
41					
43					
47					
49					
주) 종합 고조파 왜형률(THD) : 배전계통에서 5%					

LCL 필터 설계

—



<Parameter 산정 과정>

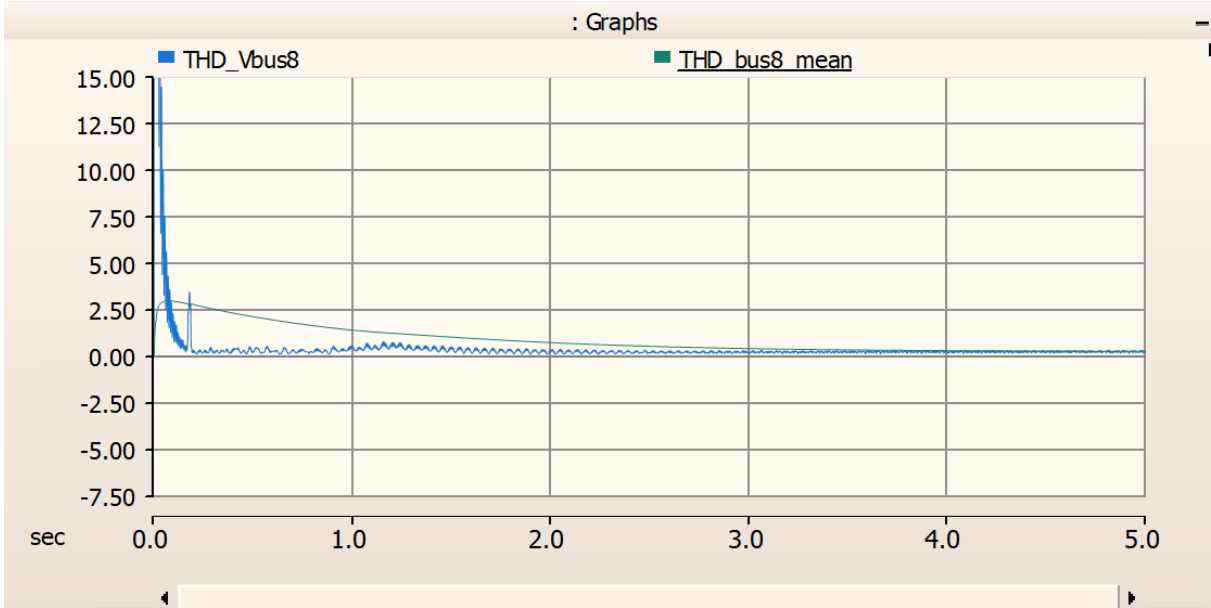
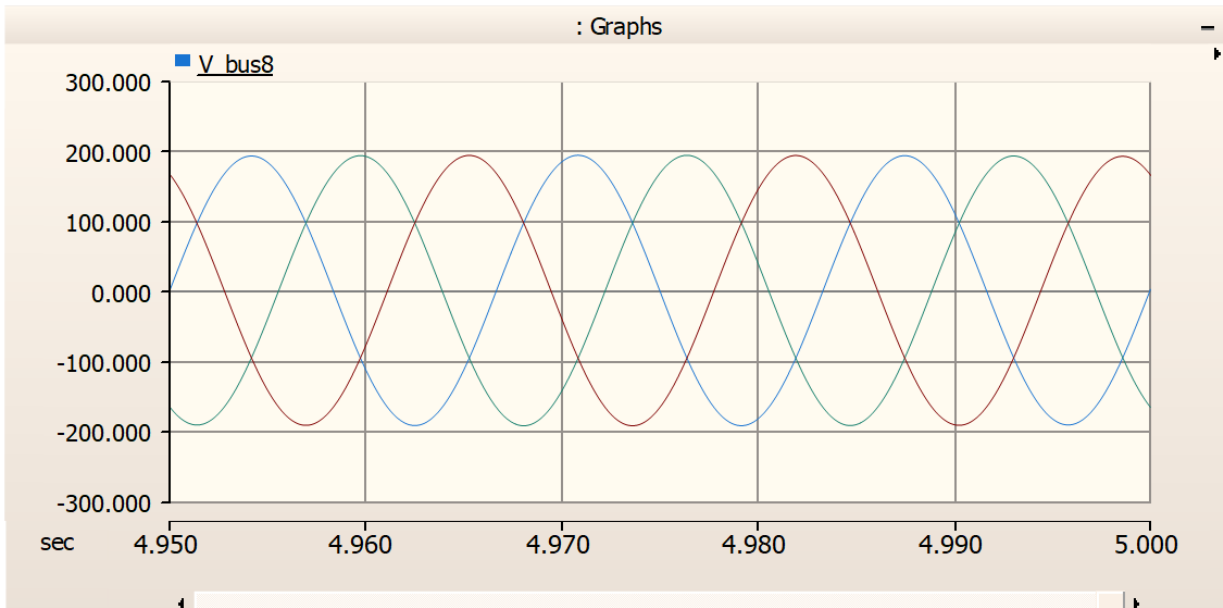
$$L_f = \frac{\sqrt{3}}{12} \frac{V_{dc}}{0.3 I_{rated} f_{sw}} m_i$$

$$L_g = \frac{1}{3} L_f$$

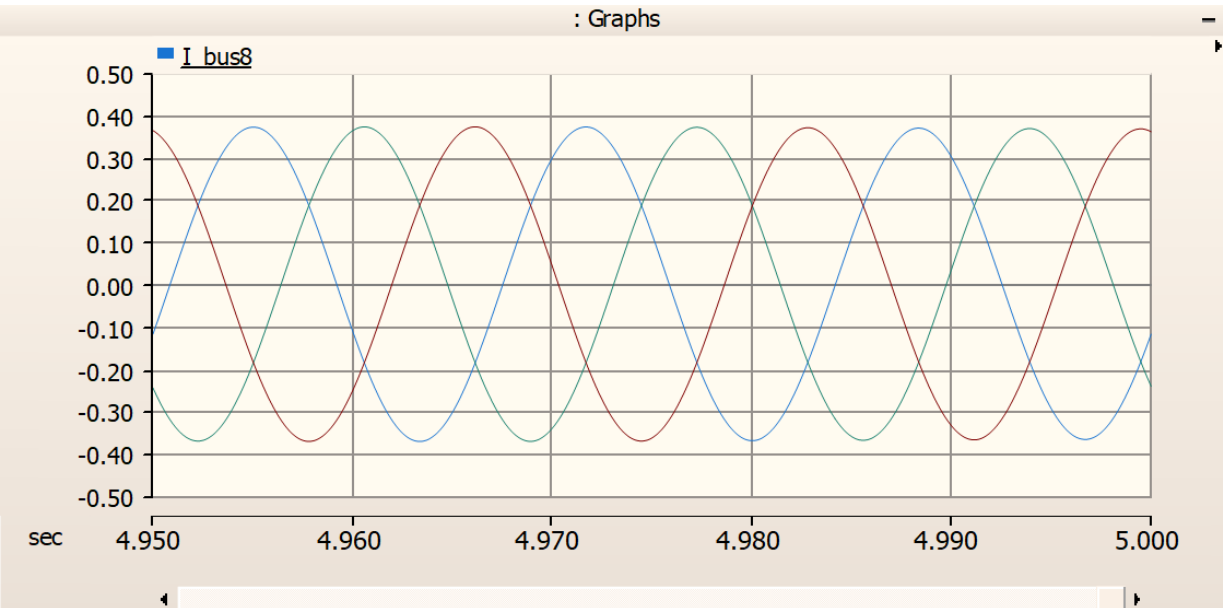
$$C_f = \frac{P_n}{2\pi f_0 V_{rms}^2}$$

고조파에 민감한 장치(e.g. 컴퓨터)의 동작 환경 개선을 위한 Bus별 LCL 필터 설계

LCL 필터 추가 후 고조파 분석



⇒ $THD_V = 0.198 \text{ [%]}$



TDD 계산 (Bus8 / LCL필터O)		
n	I_n	TDD [%]
I_peak	0.286378246	0.185604
2	0.000437628	
3	0.00016535	
4	0.000117403	
5	9.88336E-05	
6	0.000068405	
7	7.10882E-05	
8	6.67708E-05	
9	5.88467E-05	

10	5.40206E-05
11	4.71543E-05
12	0.000051715
13	5.25172E-05
14	6.57484E-05
15	8.69531E-05

⇒ $TDD_i = 0.186 \text{ [%]}$

FFT 수행 및 고조파 분석

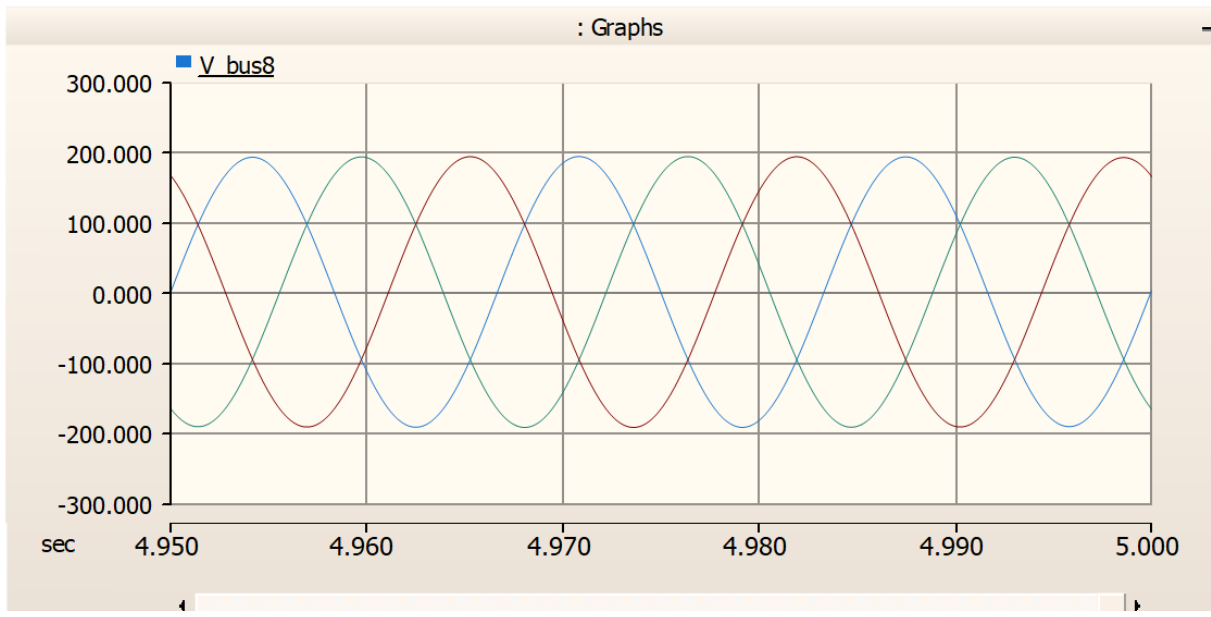
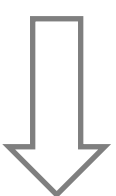
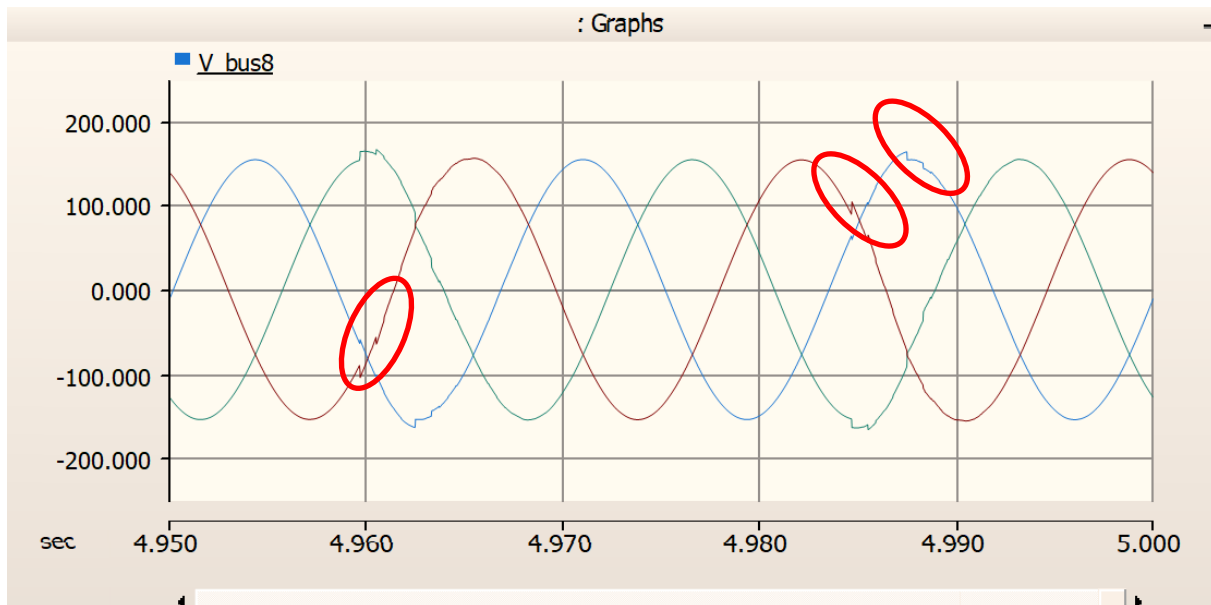
—

Bus별 THD/TDD 변화 정리

Bus 5	THD_v [%]	TDD_i [%]
LCL Filter 설치 전	2.6572	4.0689
LCL Filter 설치 후	0.2016	0.2025
LCL Filter 설치 효과	약 92% 감소	약 95% 감소

Bus 6	THD_v [%]	TDD_i [%]
LCL Filter 설치 전	1.8697	2.1754
LCL Filter 설치 후	0.2088	0.2012
LCL Filter 설치 효과	약 89% 감소	약 91% 감소

Bus 8	THD_v [%]	TDD_i [%]
LCL Filter 설치 전	1.6753	1.9778
LCL Filter 설치 후	0.1984	0.1856
LCL Filter 설치 효과	약 88% 감소	약 91% 감소



✓ 파형이 매끄러워 졌음을 관찰

→ LCL 필터의 효과 입증

Q & A