

전동기 구동 / 계통 연계 시스템의 설계 및 Simulink를 이용한 시뮬레이션

2022년 8월 22일 월요일
서울대학교 전력연구소

권용철

공학 박사
주식회사 플레코 CEO



SPEC

Outline

1

공간 벡터 **PWM**

2

PMSM의 상위 제어

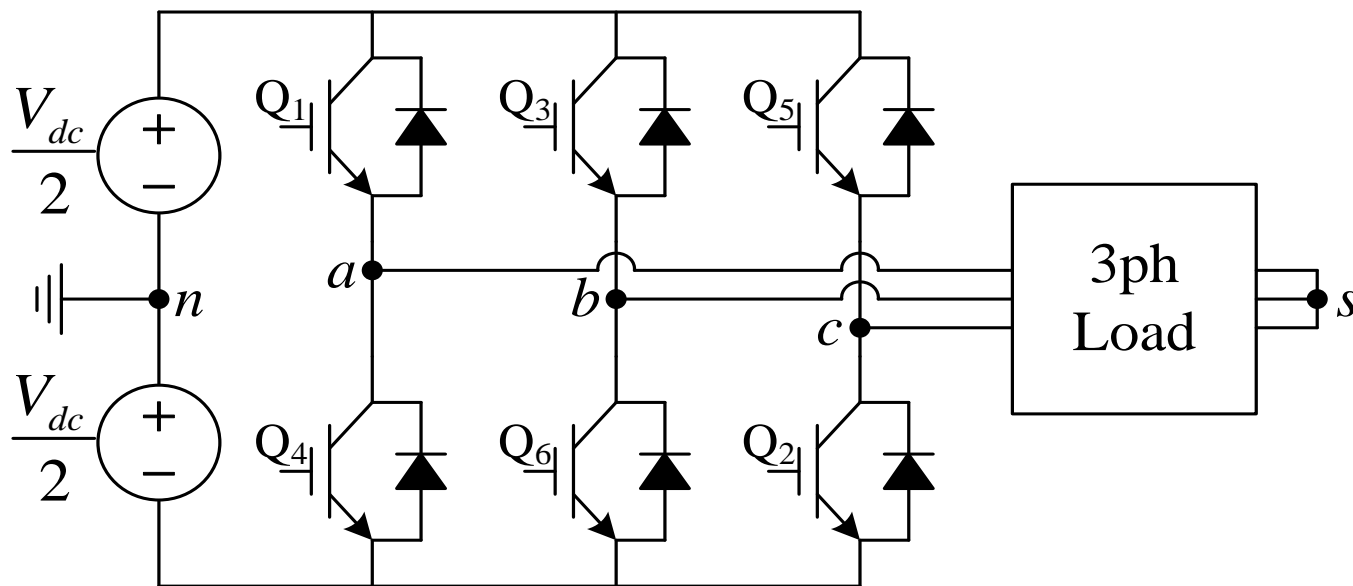
3

통합 **PMSM** 시뮬레이션 모델

1. 공간 벡터 PWM

❖ 3상 2레벨 전압원 인버터(Voltage Source Inverter, VSI)

- ▶ 6개 스위치($Q_1 \sim Q_6$)의 스위칭을 통해 DC 전원으로 부터 3상 전압을 합성
- ▶ 한 레그(Leg)의 두 스위치는 상보적(complementary)으로 동작
 - ✓ Dead time 무시
- ▶ 스위칭 함수 S_x : x상의 윗 스위치가 켜지면 1, 꺼지면 0이 되는 함수
- ▶ a상의 극 전압 표현: $v_{an} = V_{dc} \cdot (S_a - 0.5)$
- ▶ a상의 상 전압 표현: $v_{as} = V_{dc} \cdot \frac{2S_a - S_b - S_c}{3}$

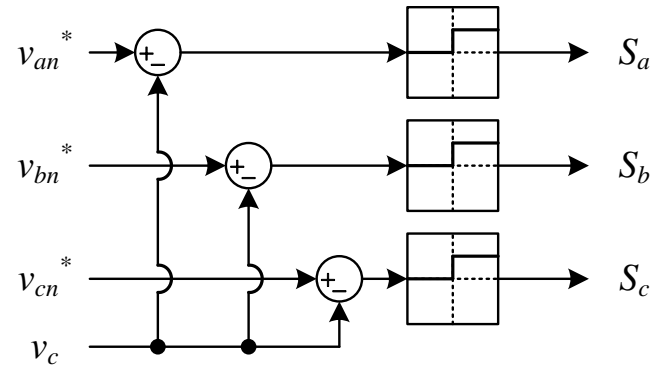


<3상 2레벨 전압원 인버터>

❖ Carrier-Based PWM

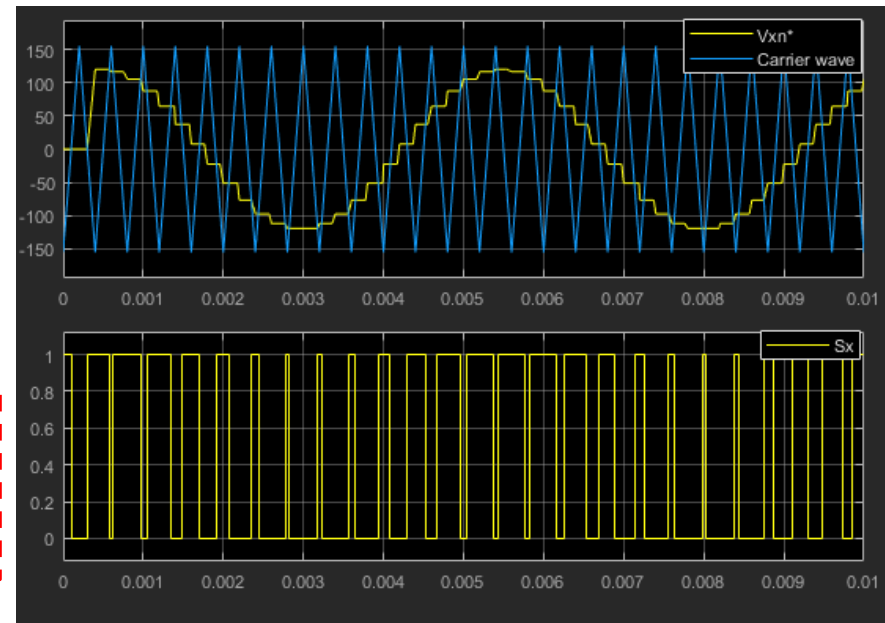
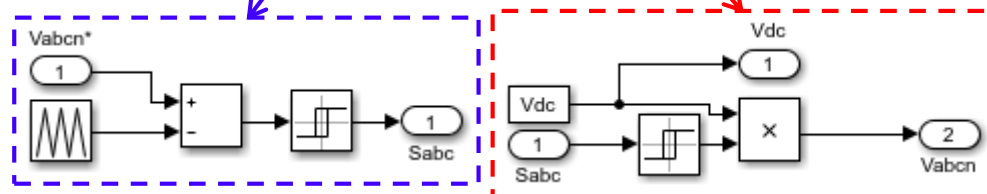
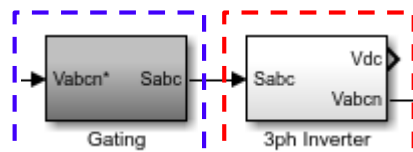
- ▶ 전압 지령과 삼각파 형태의 반송파(Carrier-wave)를 이용하여 게이팅 신호 생성
- ▶ v_c 를 반송파 신호라고 하면,

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{if } v_{xn}^* \geq v_c \\ 0 & \text{if } v_{xn}^* < v_c \end{cases}$$



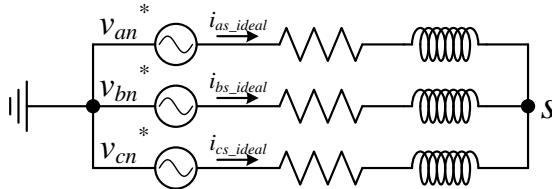
❖ Simulink에서 구현

- ▶ 게이팅 블록 + 인버터 블록
- ▶ 비교기는 relay 블록으로 구현

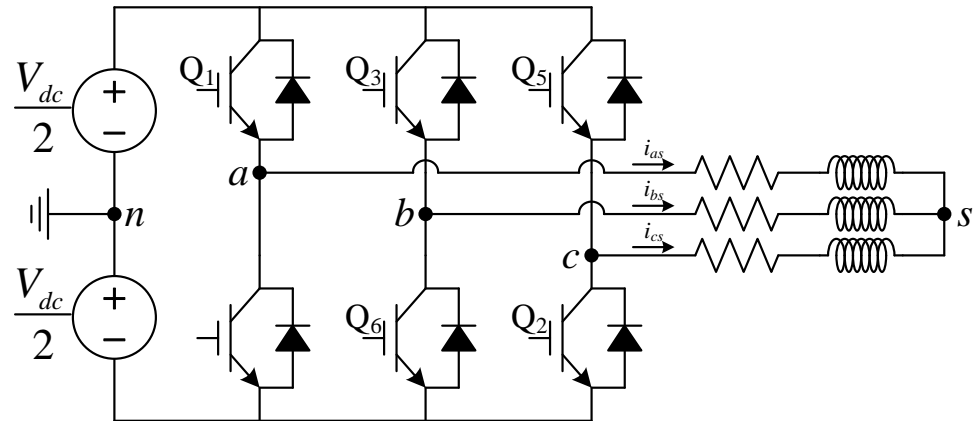


❖ 예제 2-1: 인버터 모델의 동작 확인

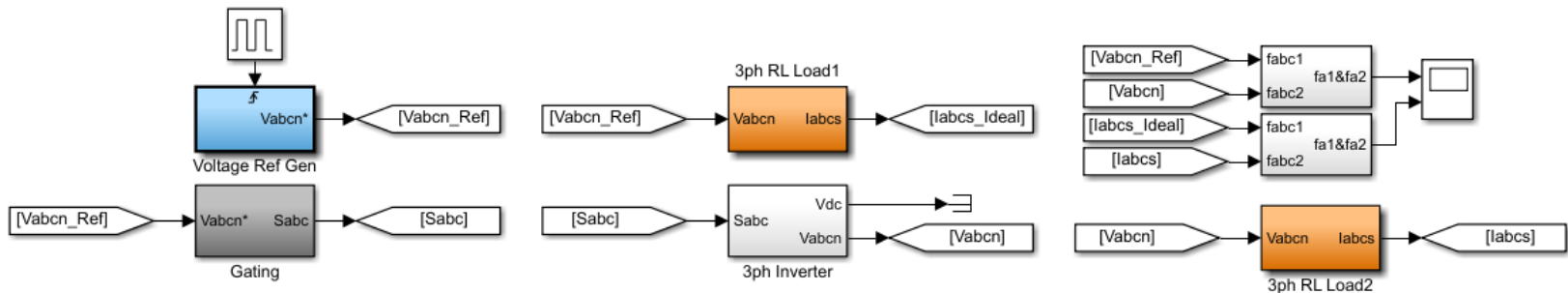
- ▶ 3상 RL 부하: $R = 1 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$
- ▶ $120 \text{ V}_{\text{peak}}$, 200 Hz 의 3상 전압 지령
- ▶ 부하에 지령을 직접 입력 \rightarrow 이상적인(Ideal) 전류 파형
- ▶ 인버터의 PWM 전압 입력 \rightarrow 스위칭이 고려된 전류 파형



<전압 지령 직접 입력>



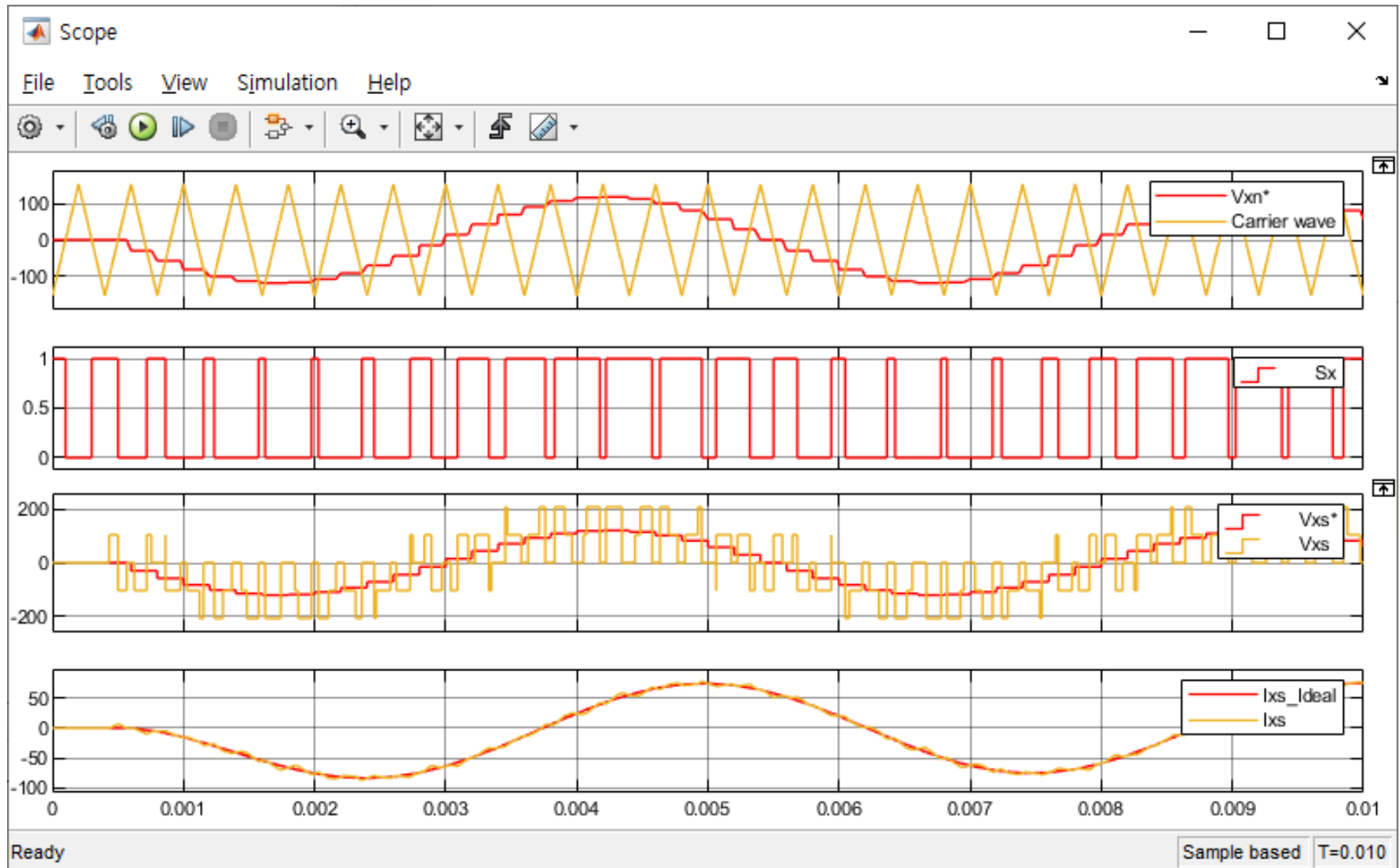
<PWM 전압 입력>



<Simulink 구현>

1 PWM 인버터의 구현

▶ 시뮬레이션 결과



❖ 옵셋 전압을 이용한 공간 벡터 PWM의 구현

- ▶ 상(Phase) 전압 지령에 옵셋 전압(v_{sn}^*)을 적절히 더하여 공간 벡터 PWM(Space Vector PWM, SVPWM)을 구현할 수 있다.

$$✓ v_{xn}^* = v_{xs}^* + v_{sn}^*$$

- ▶ 전압 지령을 $\pm V_{dc} / 2$ 안으로 제한

- ▶ 대칭 연속 PWM (SCPWM)

- ✓ 가장 흔히 사용되는 방법

$$✓ v_{sn}^* = -\frac{v_{\max}^* + v_{\min}^*}{2}$$

$$\text{where } v_{\max}^* = \max(v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*)$$

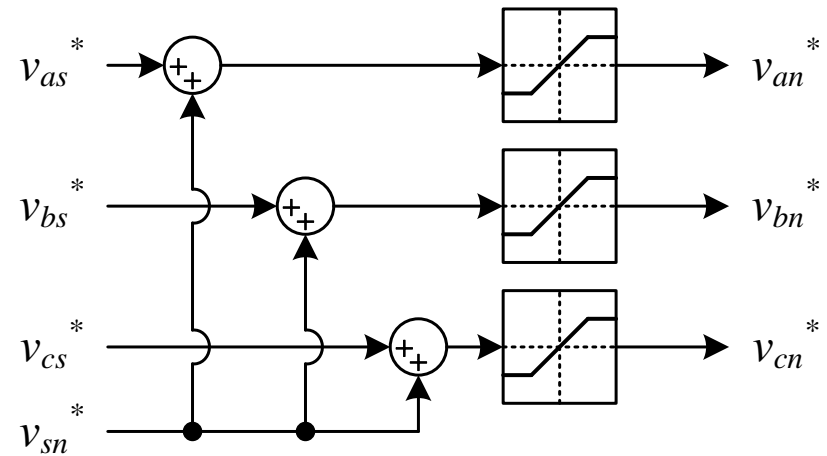
$$v_{\min}^* = \min(v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*)$$

- ▶ 불연속 PWM (DPWM)

$$✓ 60\text{도 불연속 PWM: } v_{sn}^* = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} - v_{\max}^* & \text{if } v_{\max}^* + v_{\min}^* \geq 0 \\ -\frac{V_{dc}}{2} - v_{\min}^* & \text{if } v_{\max}^* + v_{\min}^* < 0 \end{cases}$$

$$✓ 120\text{도(on) 불연속 PWM: } v_{sn}^* = \frac{V_{dc}}{2} - v_{\max}^*$$

$$✓ 120\text{도(off) 불연속 PWM: } v_{sn}^* = -\frac{V_{dc}}{2} - v_{\min}^*$$

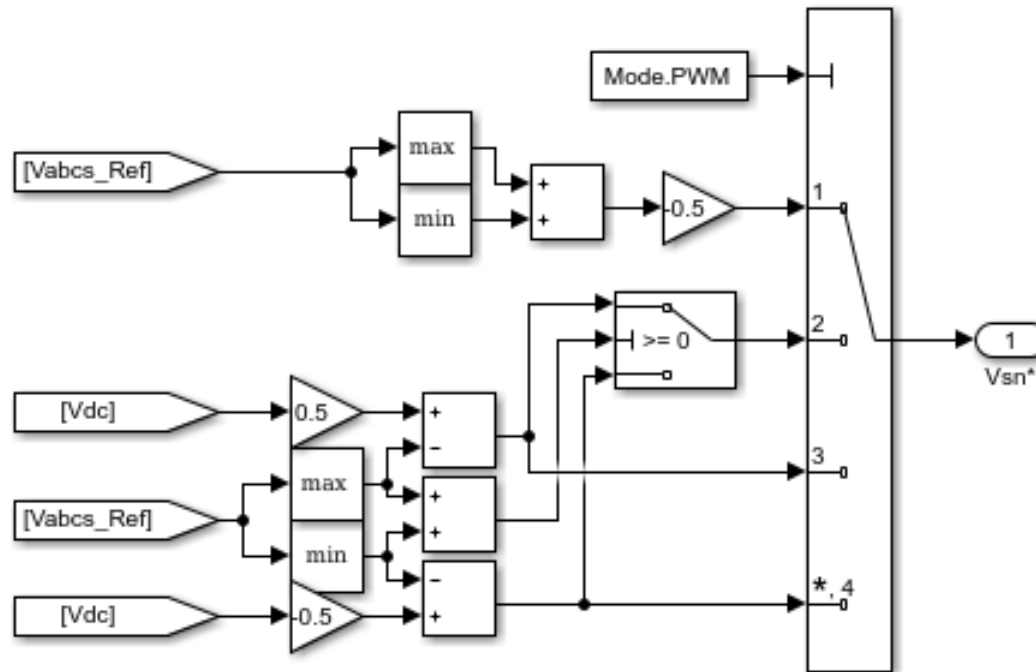


<극 전압 지령의 계산>

❖ 예제 2-2: 공간 벡터 PWM의 동작 확인

- ▶ $V_{dc} = 310 \text{ V}$, $f_{sw} = 5 \text{ kHz}$
- ▶ 3상 RL 부하: $R = 1 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$
- ▶ 120 V_{peak} , 200 Hz 의 3상 전압 인가
- ▶ Mode.PWM을 통해 PWM 방법 변경 가능

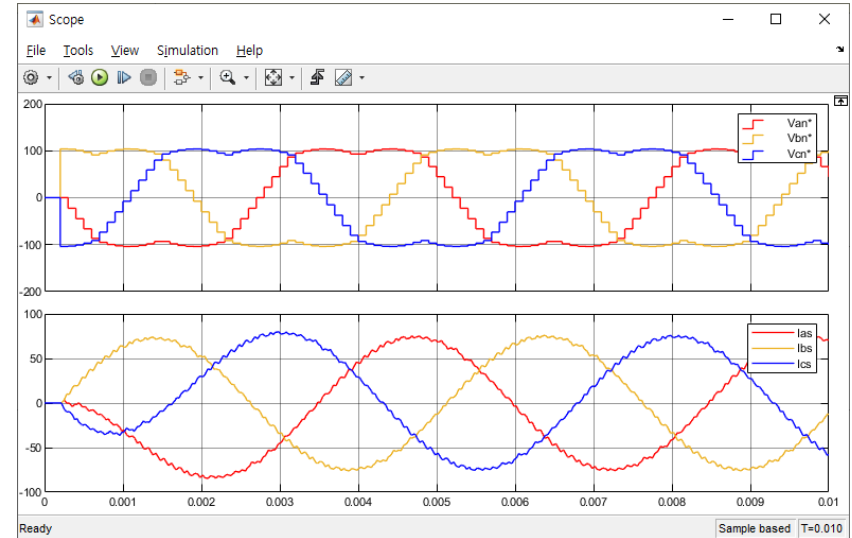
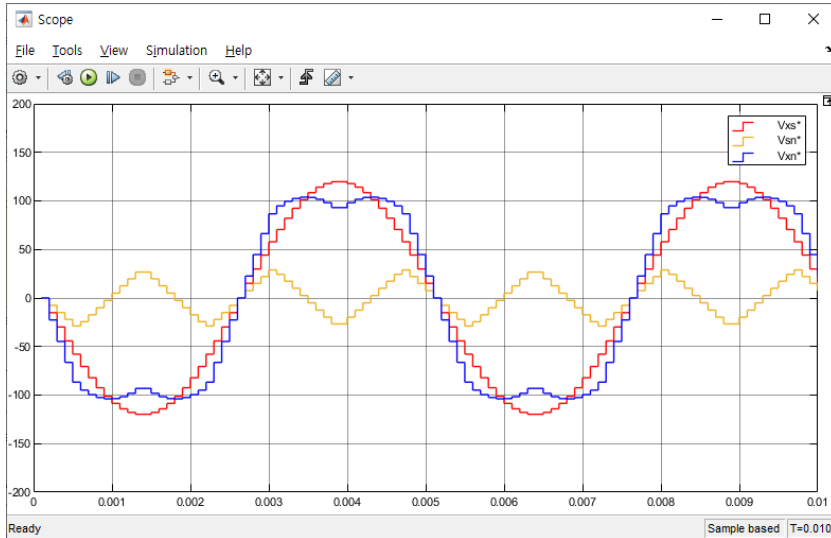
Mode.PWM=1; % PWM method
% 1: SCPWM, 2: 60deg DPWM, 3: 120deg(on) DPWM, 4: 120deg(off) DPWM



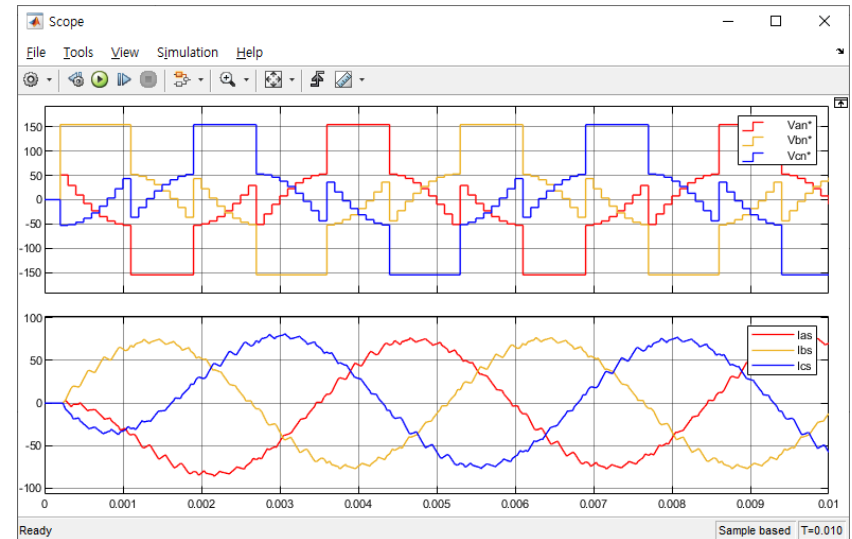
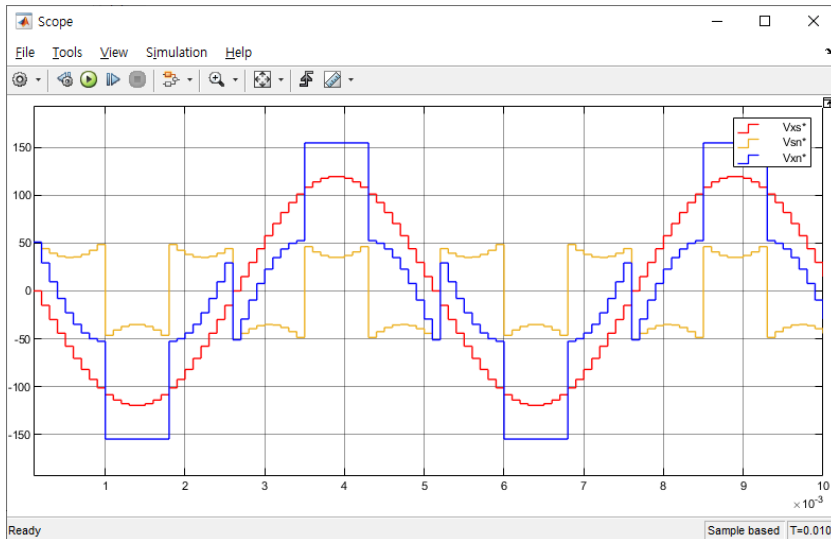
<옴셋 전압 계산의 구현>

1 공간 벡터 PWM의 구현

▶ SCPWM

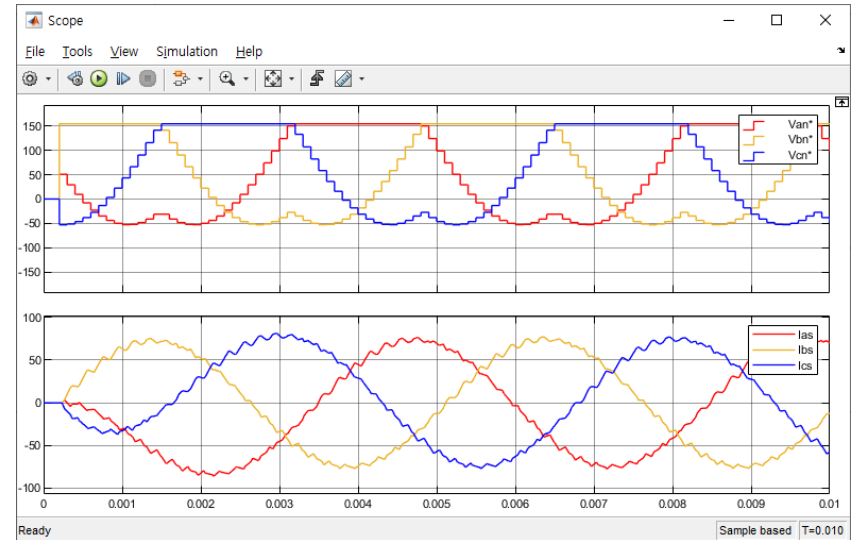
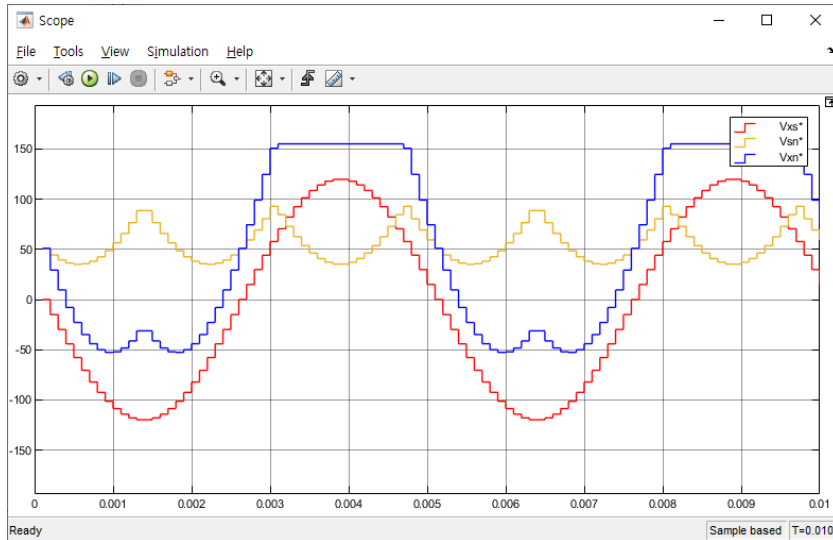


▶ 60도 DPWM

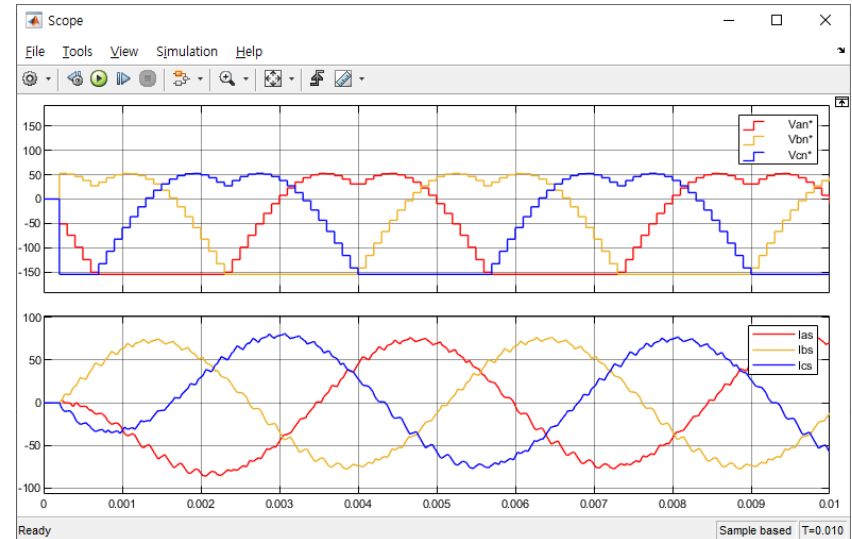
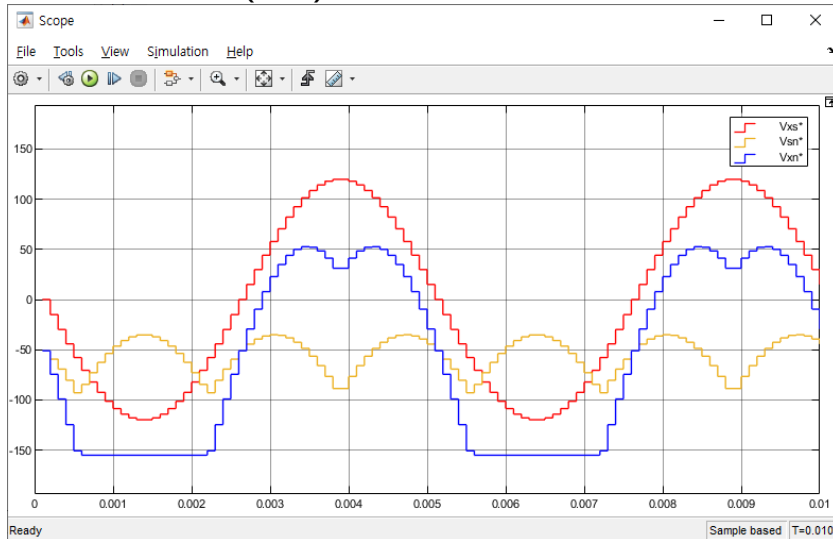


1 공간 벡터 PWM의 구현

▶ 120도(on) DPWM



▶ 120도(off) DPWM

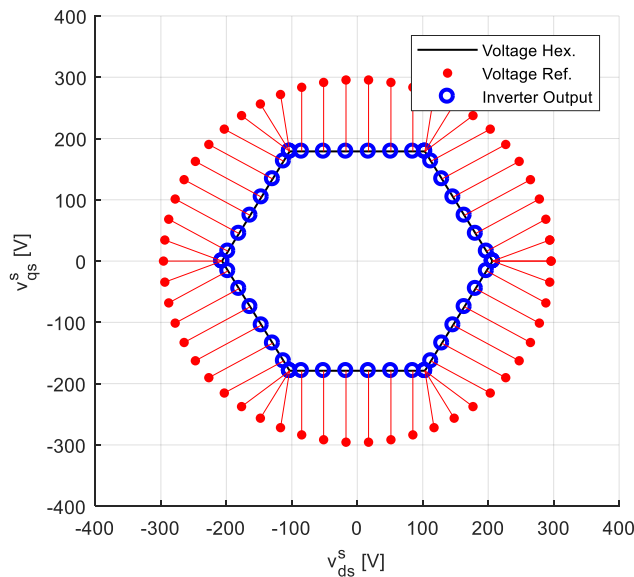
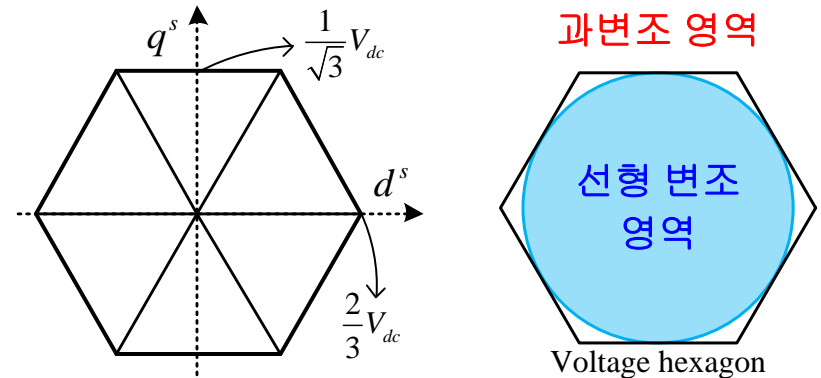


❖ dq좌표계 상에서 3상 인버터 출력의 제한: 전압 육각형

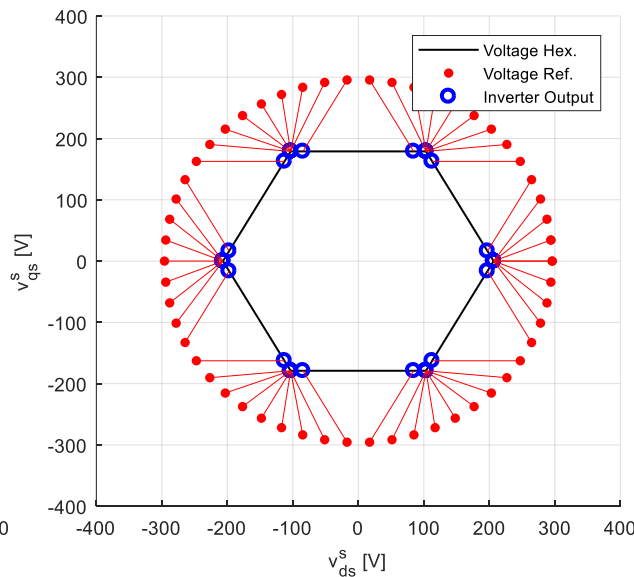
❖ 선형 변조와 과변조(Over-modulation)

❖ 과변조의 구현: 극 전압 출력의 Limiter

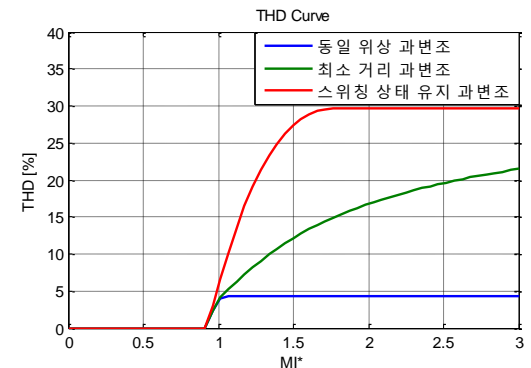
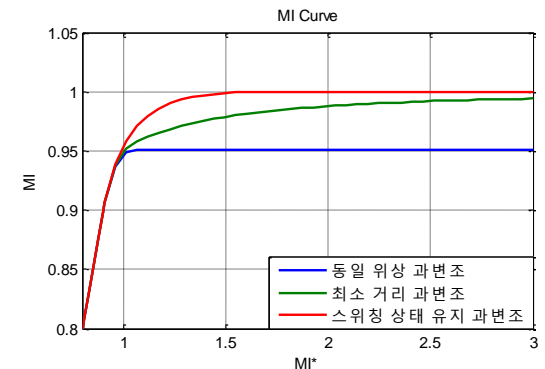
- ▶ SCPWM → 최소 거리 과변조
- ▶ 60도 DPWM → 스위칭 상태 유지 과변조



<최소 거리 과변조>

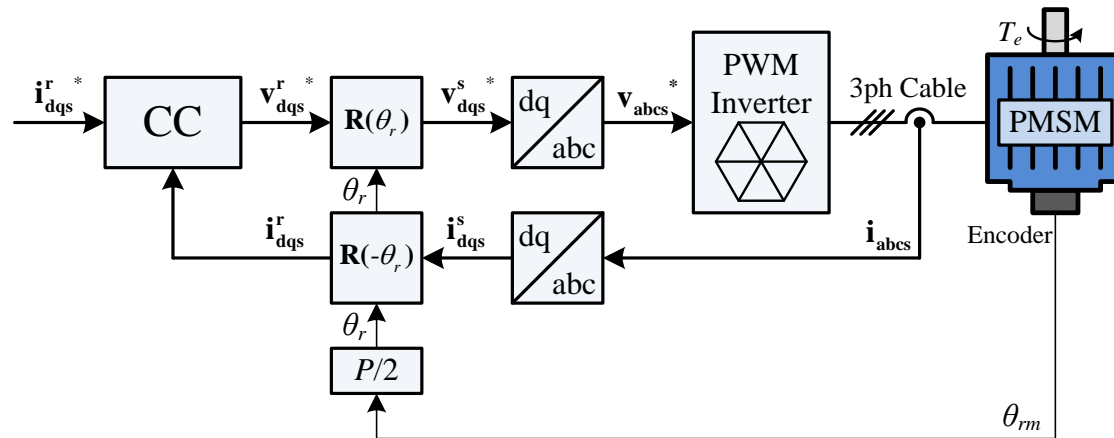


<스위칭 상태 유지 과변조>



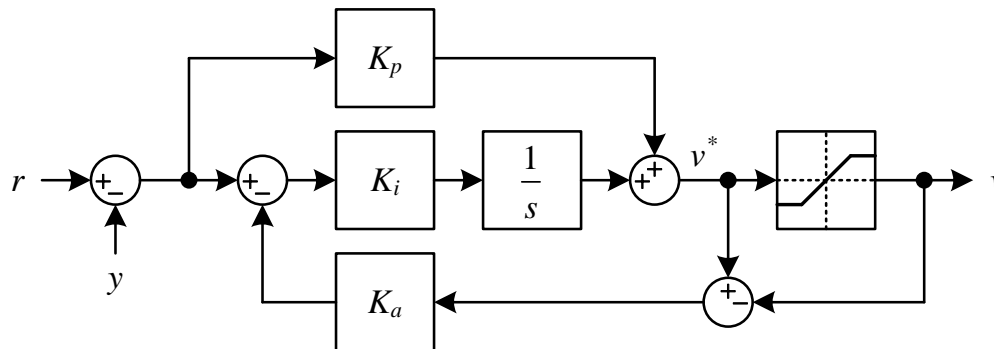
❖ 와인드업 (Windup)

- ▶ 제어기의 출력이 제한될 때 적분기 출력이 과하게 쌓이는 현상
- ▶ 제어 성능 악화



❖ 안티 와인드업 (Anti-Windup)

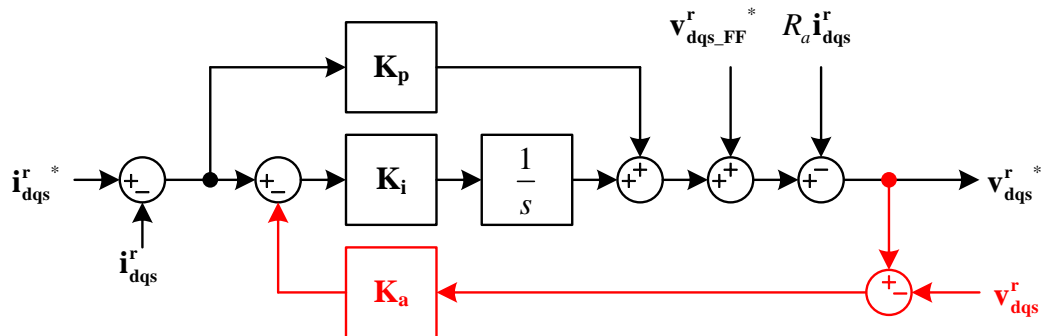
- ▶ 제어기의 출력이 제한될 때 적분기의 출력이 쌓이지 않도록 하는 기법
- ▶ 역 연산(Back-calculation) 안티 와인드업: 제어기 출력의 제한 전후 차이를 궤환하여 적분기 입력에서 빼주는 방식



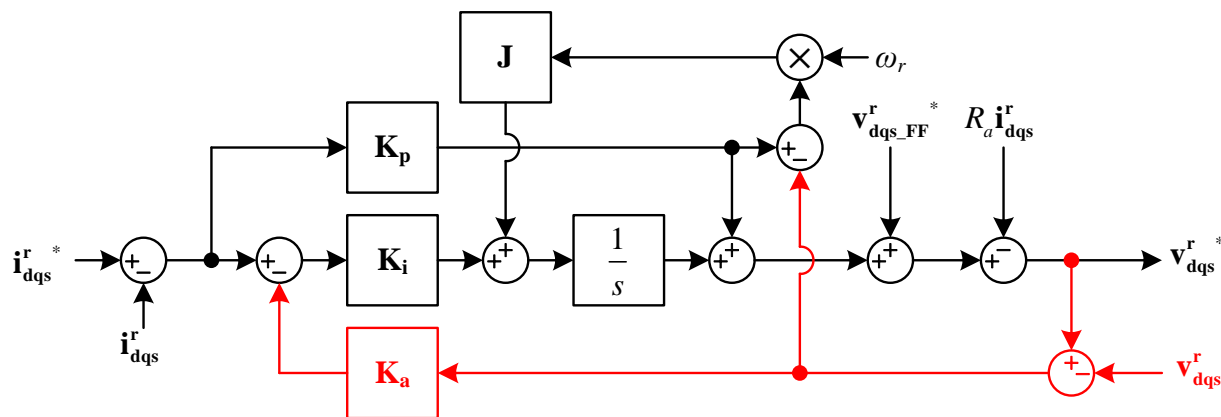
- ▶ 전압 지령($\mathbf{v}_{\text{dqs}}^r$)과 실제 전동기에 인가된 전압($\mathbf{v}_{\text{dqs}}^r$) 정보 필요
- ▶ 보통 단자 전압을 측정하지 않으므로, 극 전압 지령($\mathbf{v}_{\text{abcn}}^r$)으로 부터 $\mathbf{v}_{\text{dqs}}^r$ 계산



❖ 상태 궤환 전류 제어기에서의 안티 와인드업



❖ 복소수 벡터 전류 제어기에서의 안티 와인드업



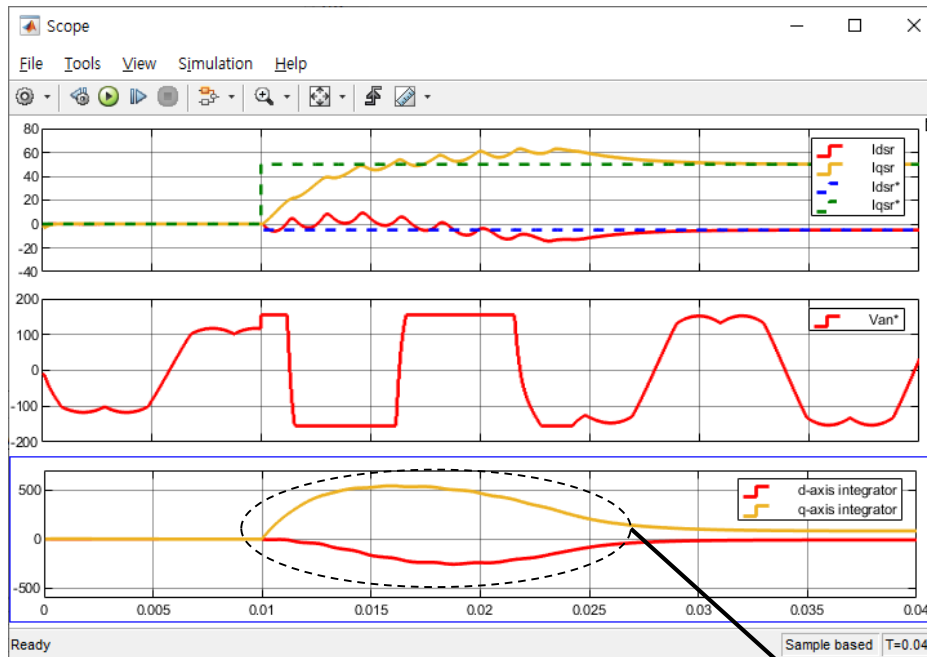
❖ 안티 와인드업 이득 설정: $K_a = K_p^{-1} = \begin{bmatrix} 1/K_{pd} & 0 \\ 0 & 1/K_{pq} \end{bmatrix}$

❖ 예제 2-3: 과변조와 안티 와인드업 성능 확인

- ▶ 11kW YEC IPMSM, $V_{dc} = 310 \text{ V}$, $\omega_{rpm} = 1700 \text{ r/min}$
- ▶ 조건 1: 안티 와인드업의 영향 (상태 궤환 전류 제어기)
 - ✓ Mode.PWM=1
 - ✓ Mode.CC_Type=1
 - ✓ **Mode.AntiWindup=0→1**

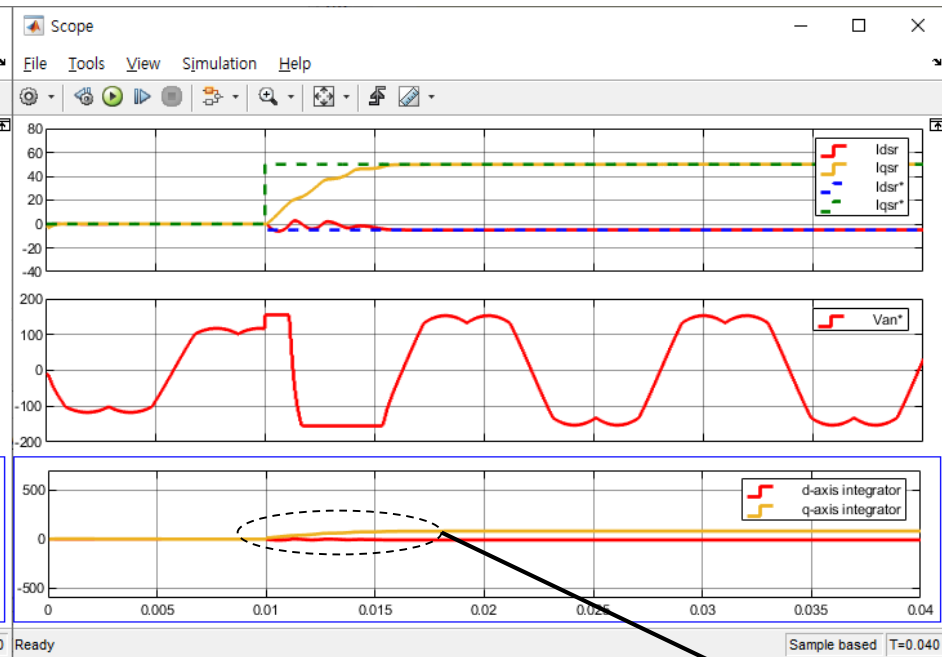
전류 제어 성능 악화

전류 제어 성능 향상



<안티 와인드업 비적용>

와인드업 발생



<안티 와인드업 적용>

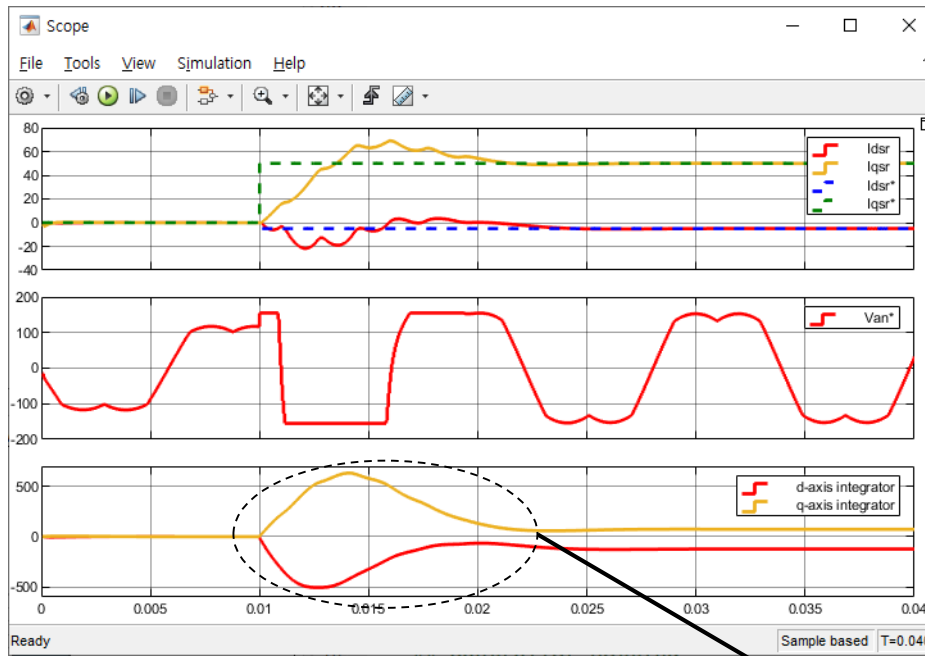
와인드업 사라짐

1 과변조와 안티 와인드업

▶ 조건 2: 안티 와인드업의 영향 (복소수 벡터 전류 제어기)

- ✓ Mode.PWM=1
- ✓ Mode.CC_Type=2
- ✓ **Mode.AntiWindup=0→1**

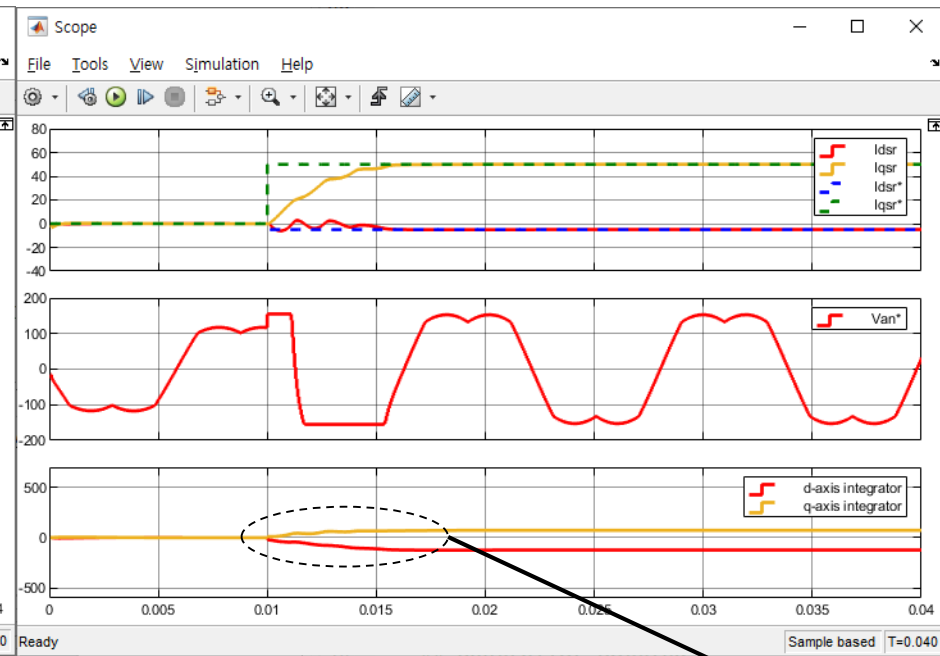
전류 제어 성능 악화



<안티 와인드업 비적용>

와인드업 발생

전류 제어 성능 향상

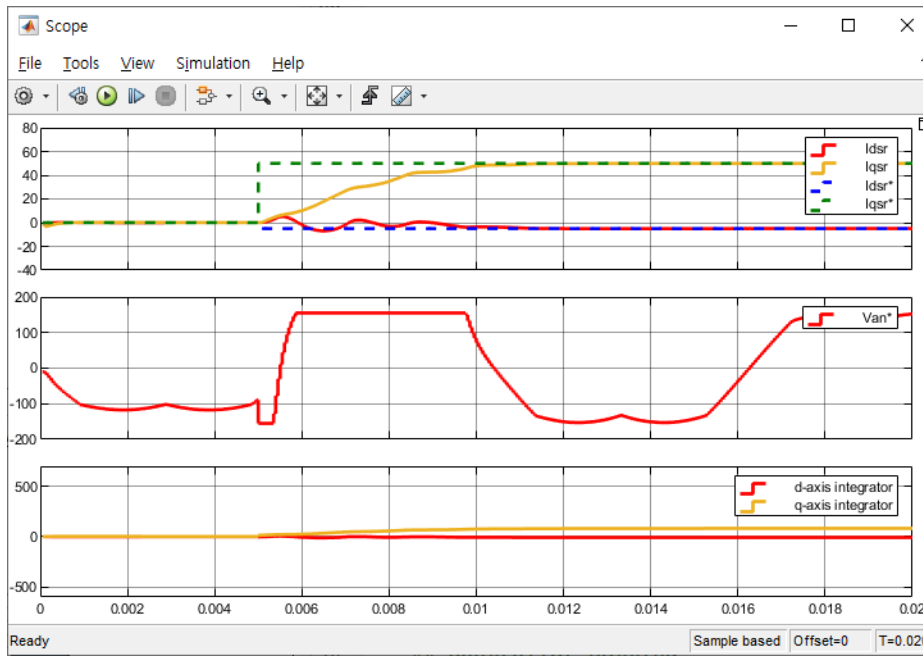


<안티 와인드업 적용>

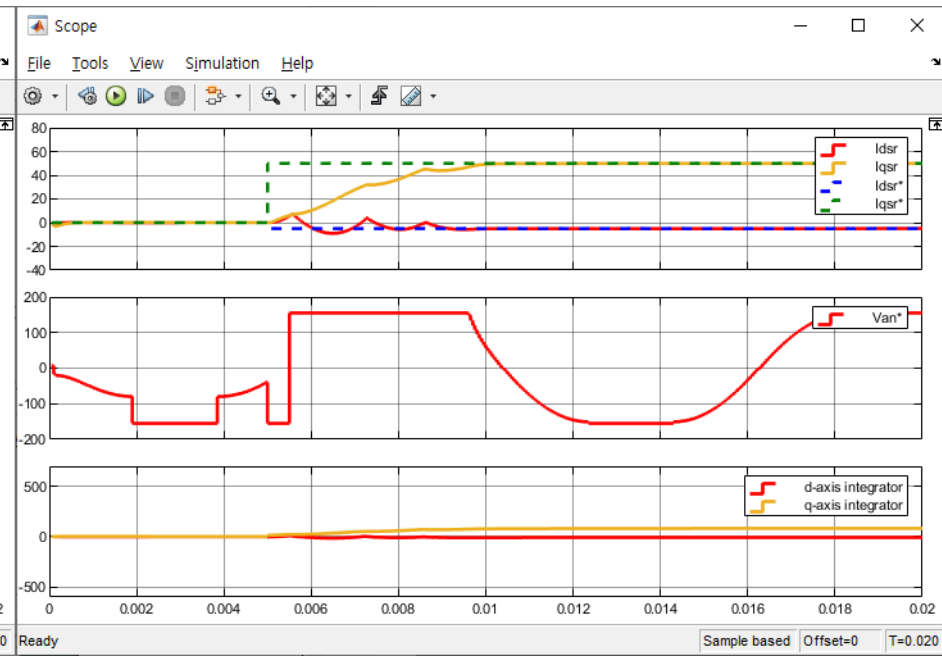
와인드업 사라짐

▶ 조건 3: 과변조 기법의 영향

- ✓ **Mode.PWM=1→2**
- ✓ **Mode.CC_Type=1 or 2**
- ✓ **Mode.AntiWindup=1**
- ✓ 스위칭 상태 유지 과변조의 특징 (vs 최소 거리 과변조)
 - 큰 기본파 전압 → 빠른 과도 특성
 - 큰 THD → 큰 전류 리플 유발



<최소 거리 과변조>



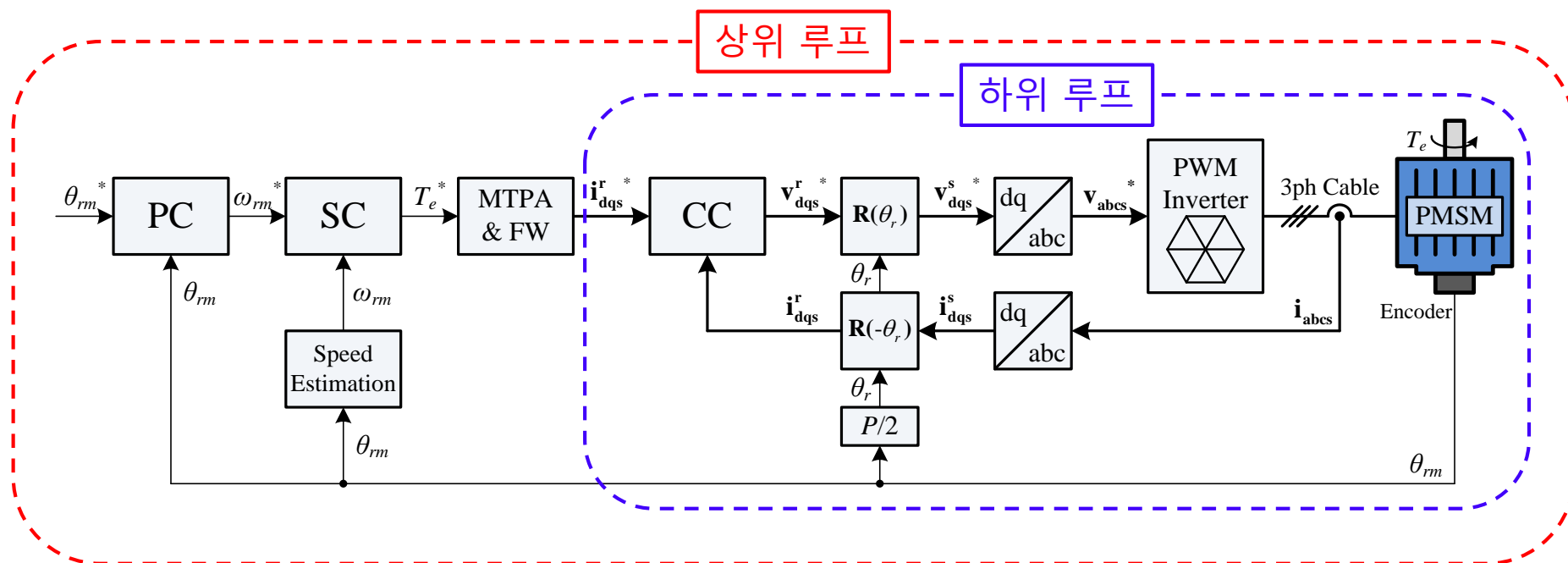
<스위칭 상태 유지 과변조>

2. PMSM의 상위 제어

- ❖ 위치 제어기
- ❖ 속도 제어기
- ❖ MTPA 및 약자속 제어기

상위(Outer) 제어기

- ❖ 전류 제어기 : 최하위(inner most) 제어기



❖ 단위 전류당 최대 토크 (MTPA: Maximum Torque Per Ampere) 운전

- ▶ 특정 토크에 대해 전류의 크기가 가장 작은 지점에서 운전 → 동손(Copper Loss) 최소화 운전

❖ MTPA 운전점에 대한 수식 표현

- ▶ A. 주어진 토크에 대하여 전류 크기가 최소가 되는 i_{dqs}^r 계산

✓ IPMSM

- 복잡한 4차 방정식 풀이 필요

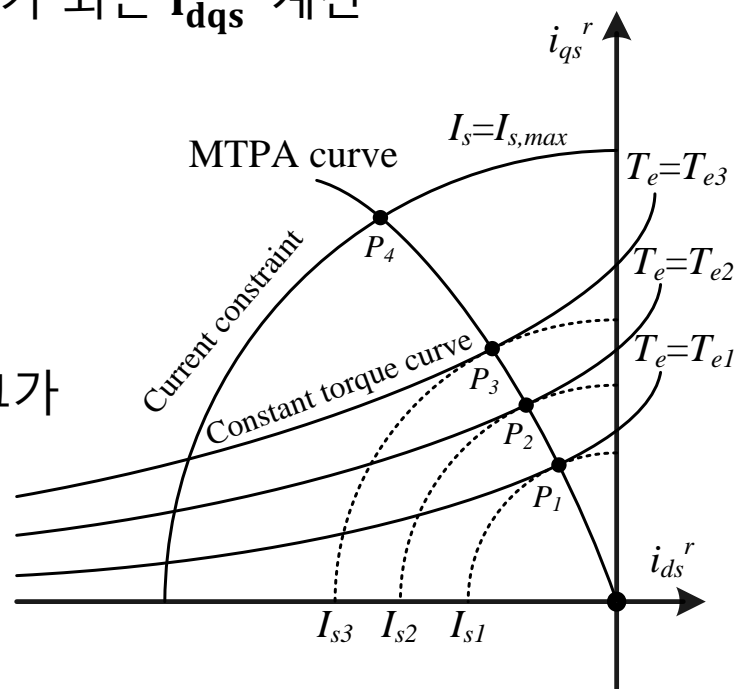
✓ SPMSM

- $i_{ds}^r = 0$
- $i_{qs}^r = \frac{1}{1.5p\lambda_f} T_e$

- ▶ B. 주어진 전류의 크기(I_s)에 대해 최대 토크가 발생하는 i_{dqs}^r 계산 (IPMSM)

$$✓ i_{ds}^r = \frac{-\lambda_f + \sqrt{\lambda_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs})}$$

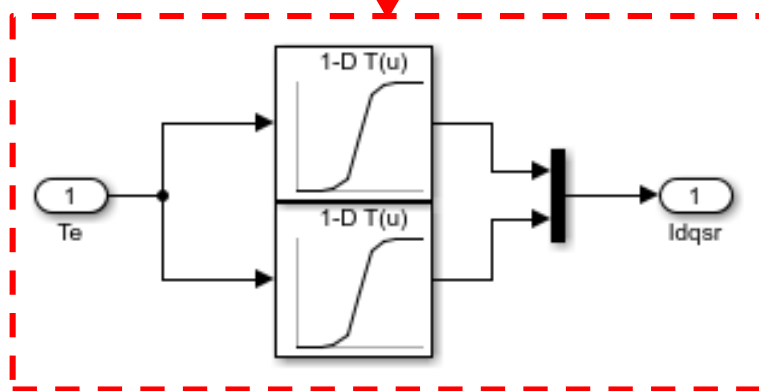
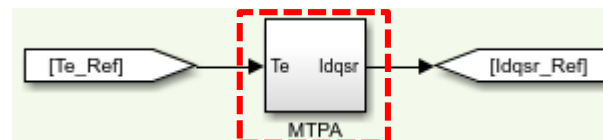
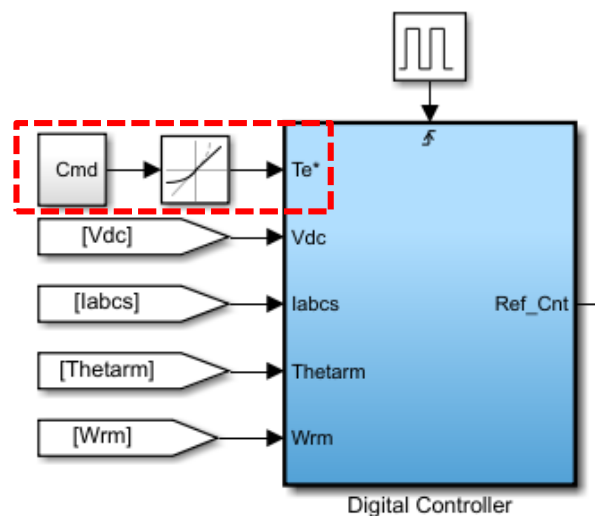
$$✓ i_{qs}^r = \pm \sqrt{I_s^2 - i_{ds}^{r2}}$$



<MTPA 운전점>

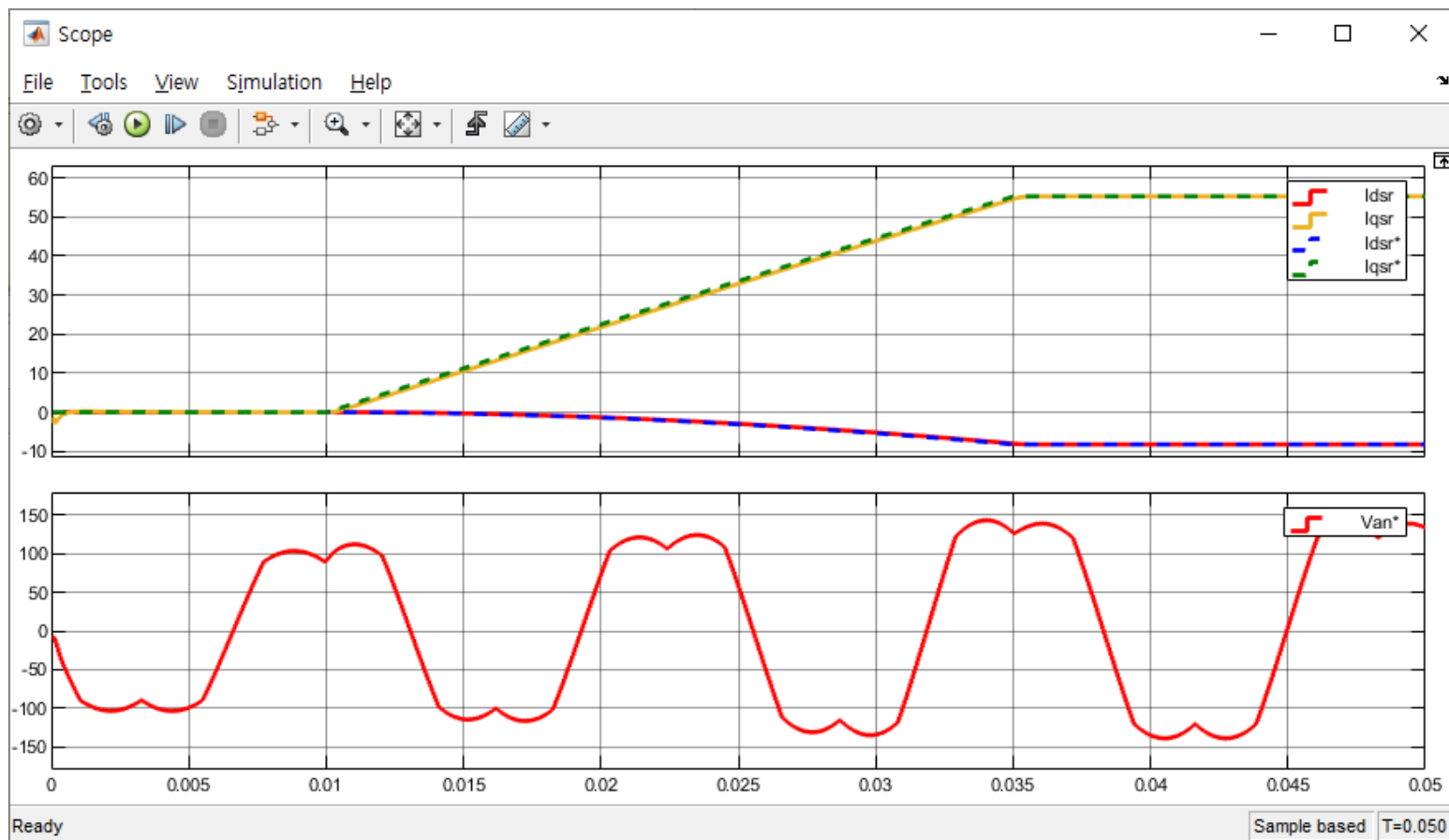
❖ 참조표 기반 MTPA 구현

- ▶ 제어기 블록에 전류 지령 대신 토크 지령을 입력
- ▶ 제어기 블록 내에 MTPA 블록에서 전류 지령을 생성
- ▶ MTPA 블록에서는 B의 수식을 바탕으로 토크에 대한 dq축 전류의 관계를 참조표(Look-up Table)로 구현



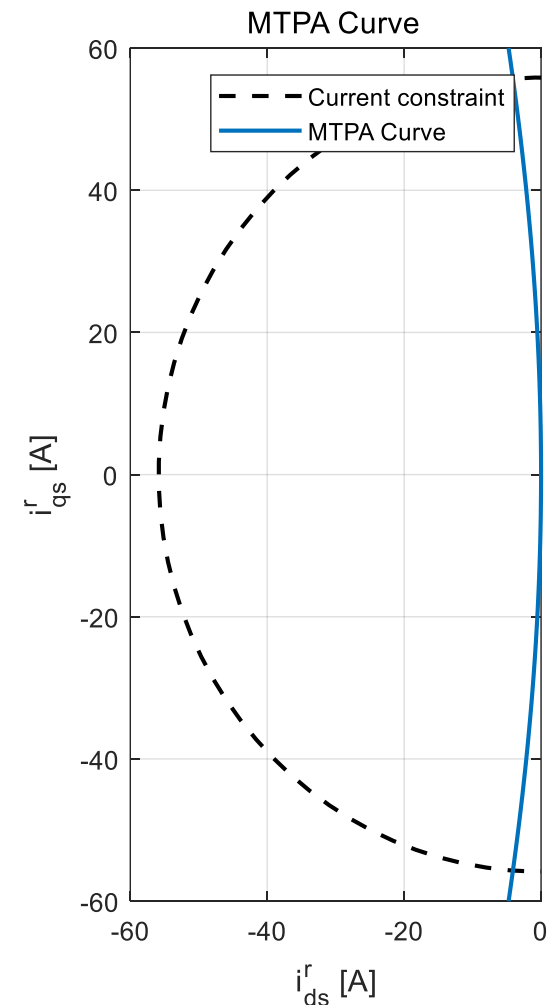
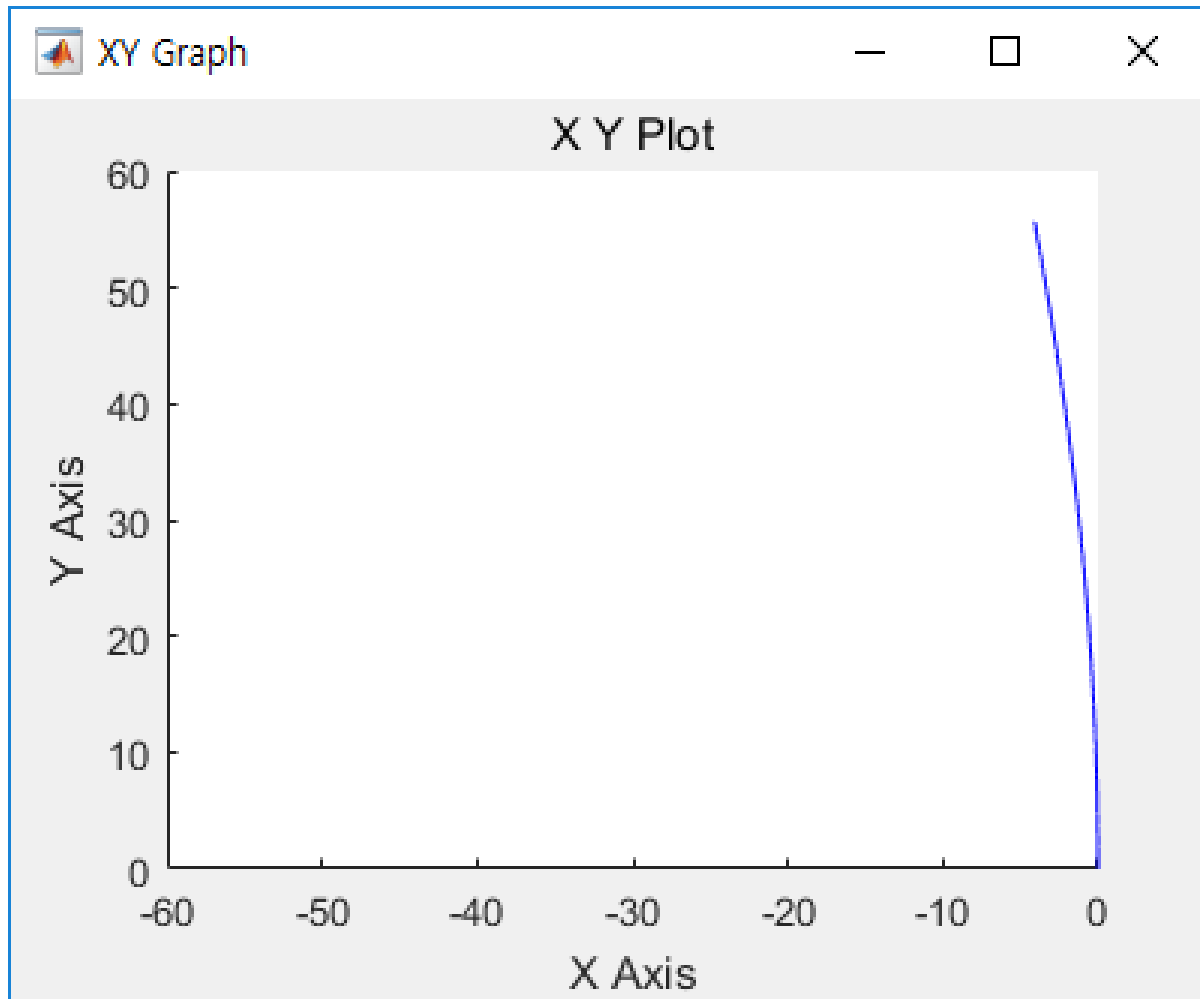
❖ 예제 2-4: PMSM의 MTPA 운전 확인

- ▶ 11kW YEC IPMSM
- ▶ $V_{dc} = 310 \text{ V}$, $\omega_{rpm} = 1500 \text{ r/min}$
- ▶ $T_e^* = 0 \text{ pu} \rightarrow 1 \text{ pu}$ (40 pu/s slew rate)



PMSM의 MTPA 운전

▶ 실제 MTPA 곡선에 따라 전류 운전점이 이동하는 것을 확인



❖ 고속 운전 시 전압 부족 현상

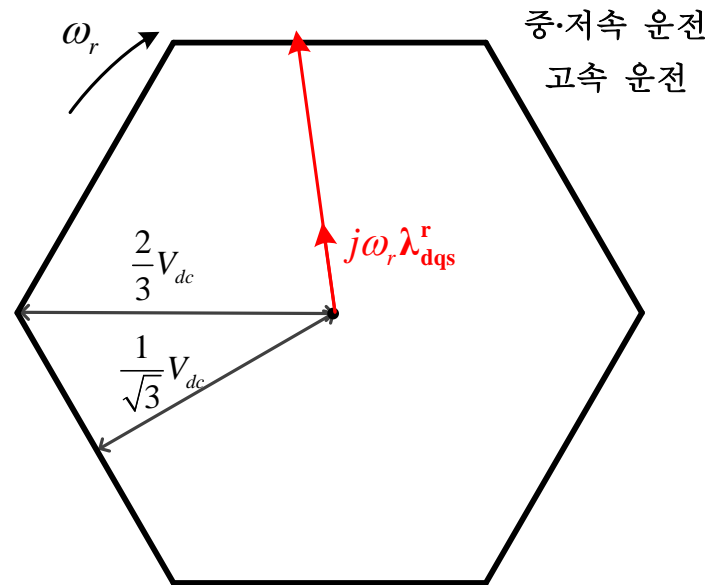
▶ PMSM의 정상상태 전압 방정식

$$\checkmark \quad v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r$$

$$\checkmark \quad v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r (L_{ds} i_{ds}^r + \lambda_f)$$

▶ 전압 크기는 운전 속도에 비례

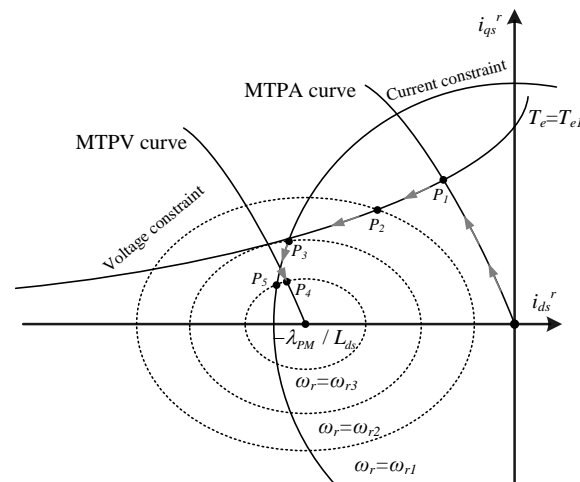
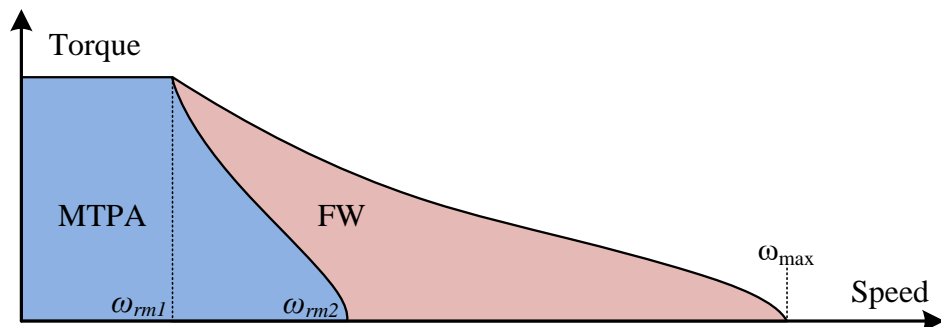
▶ 고속에서는 전압 벡터가 전압 육각형에 의해 제한됨 → 운전 속도의 제한



❖ 약자속 제어

▶ d축 전류를 음으로 인가하여 λ_f 를 상쇄하고 쇄교자속의 크기를 줄여 전압 벡터의 크기를 제한하는 방법

▶ 운전 속도의 제한을 극복

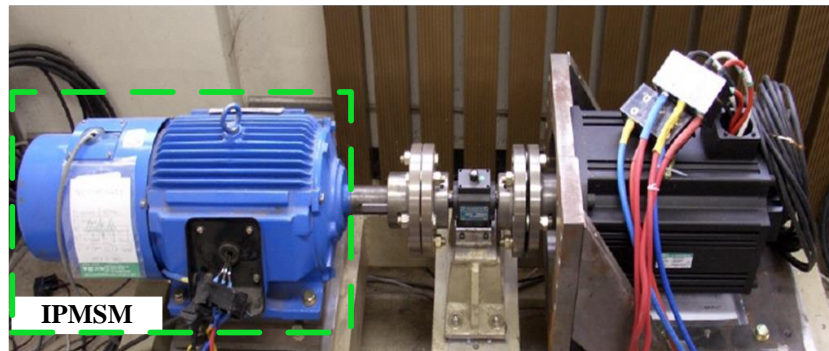


❖ 능력 곡선(Capability Curve)

▶ 전동기 1: 11kW YEC IPMSM

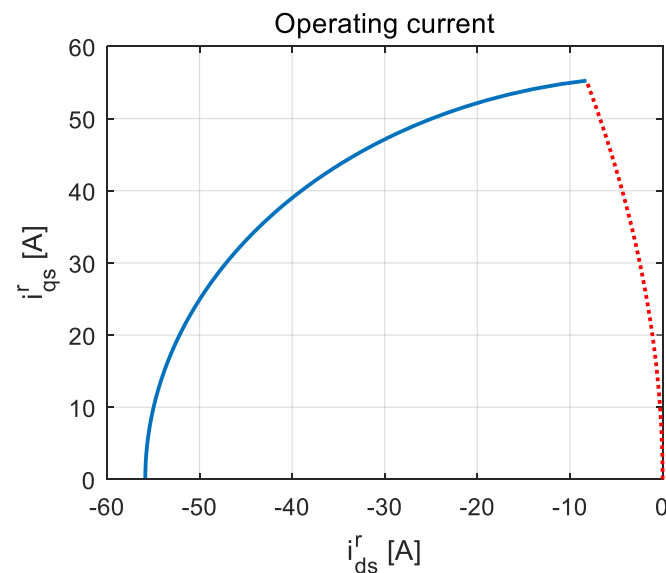
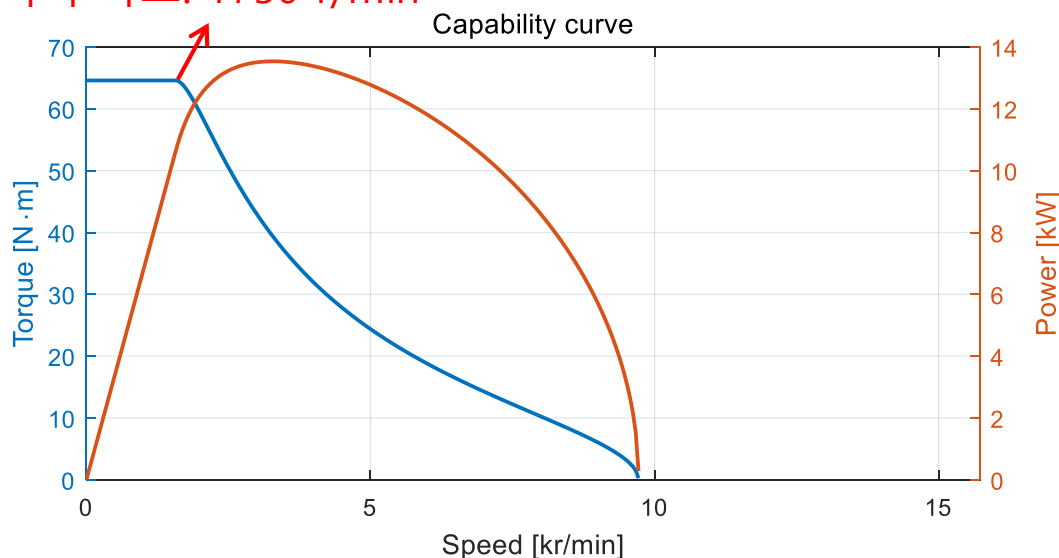
✓ 유한 속도 시스템 ($L_{ds} I_{s,rated} < \lambda_f$)

V_{dc}	311 V	L_{ds}	3.6 mH
p	3	L_{qs}	4.3 mH
$I_{s,rated}$	39.5 A _{rms}	λ_f	0.254 Wb·t



<11kW YEC IPMSM>

기저 속도: 1750 r/min

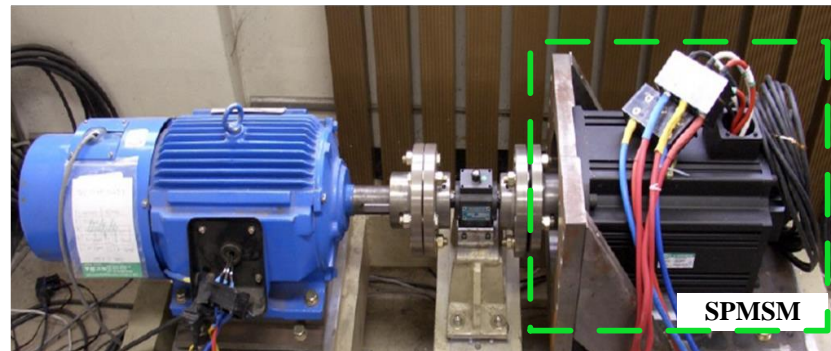


PMSM의 약자속 제어

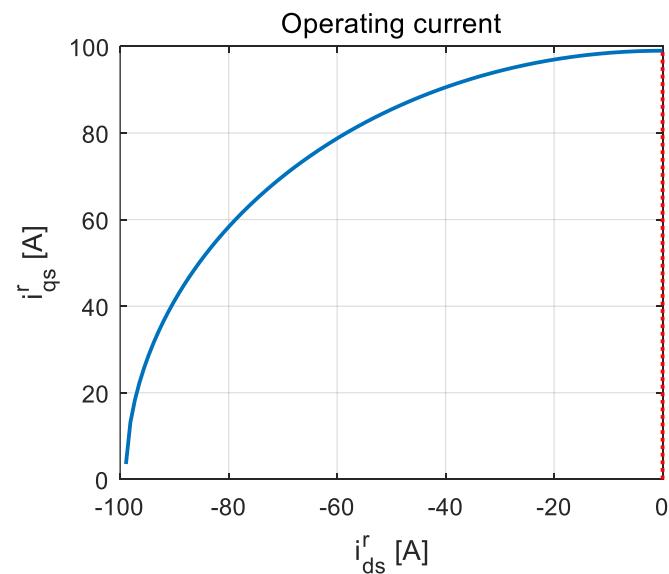
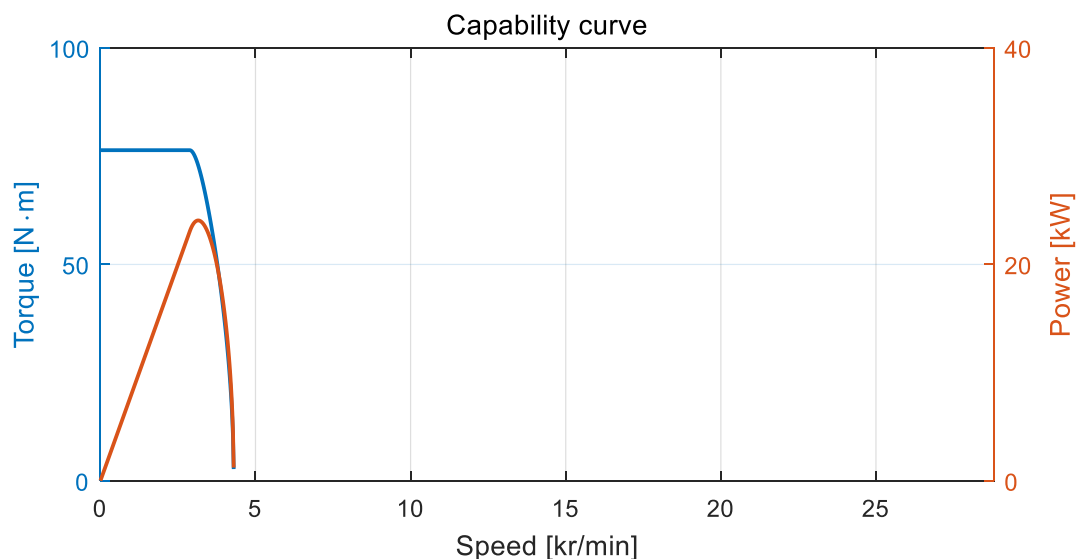
▶ 전동기 2: SPMSM (11kW YEC 전동기의 부하기)

- ✓ 비돌극성($L_{ds} = L_{qs}$) → MTPA 운전점이 직선
- ✓ 유한 속도 시스템 ($L_{ds} I_{s,rated} < \lambda_f$)

V_{dc}	311 V	L_{ds}	0.39 mH
p	4	L_{qs}	0.39 mH
$I_{s,rated}$	70 A _{rms}	λ_f	0.129 Wb·t



<SPMSM>

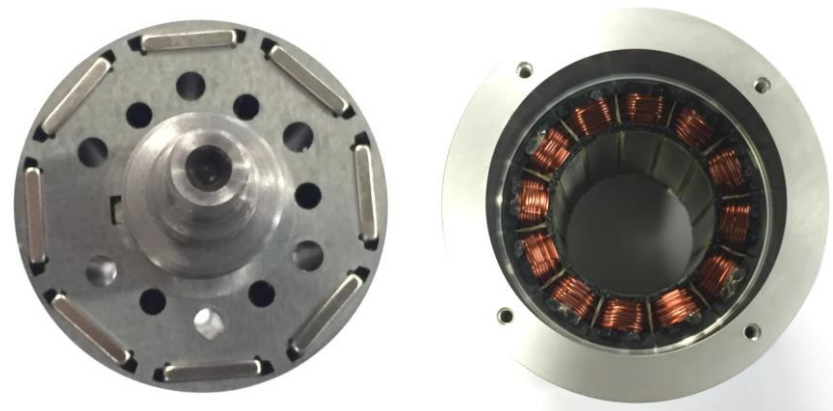


PMSM의 약자속 제어

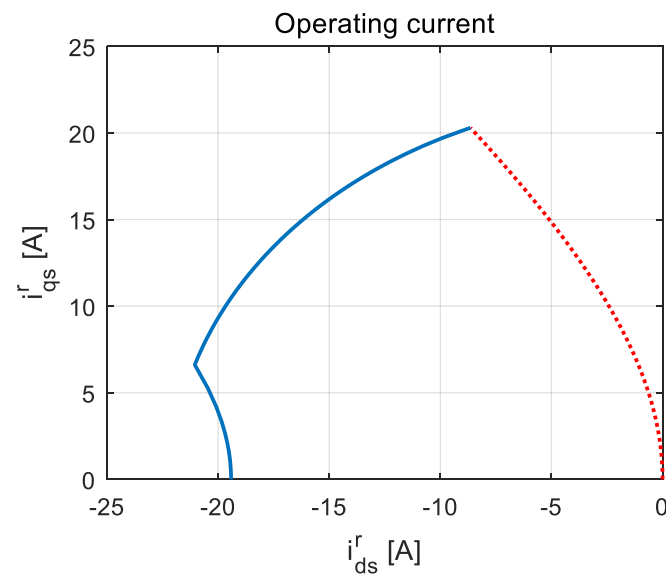
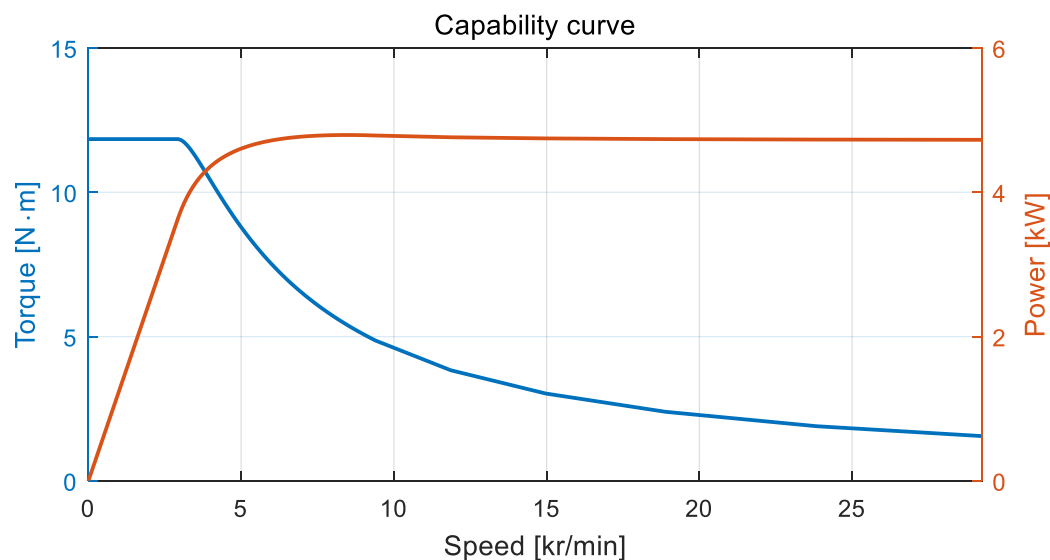
▶ 전동기 3: 소형 IPMSM

- ✓ 무한 속도 시스템 ($L_{ds} I_{s,rated} > \lambda_f$)

V_{dc}	311 V	L_{ds}	4.1 mH
p	4	L_{qs}	6.1 mH
$I_{s,rated}$	15.6 A _{rms}	λ_f	0.079 Wb·t

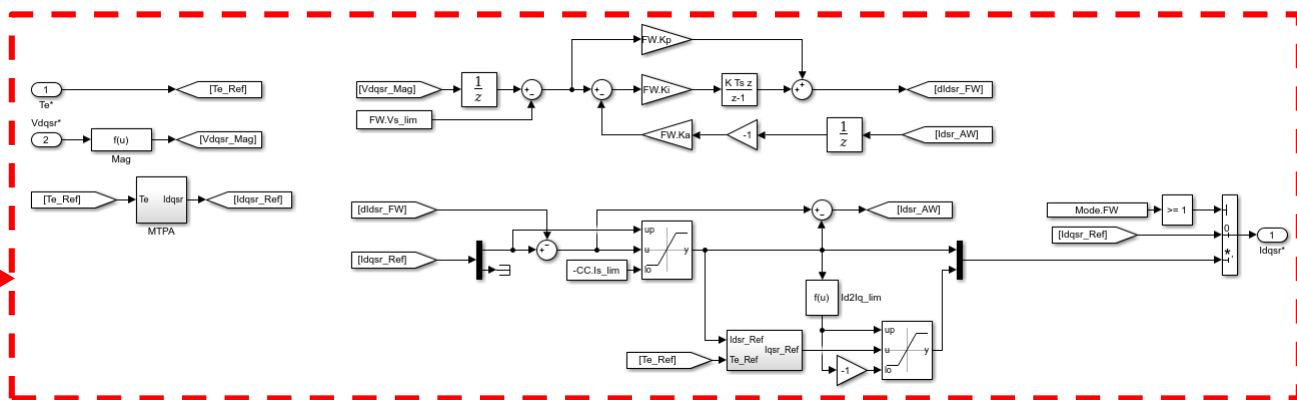
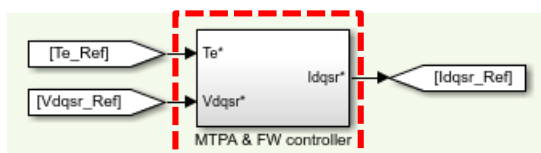
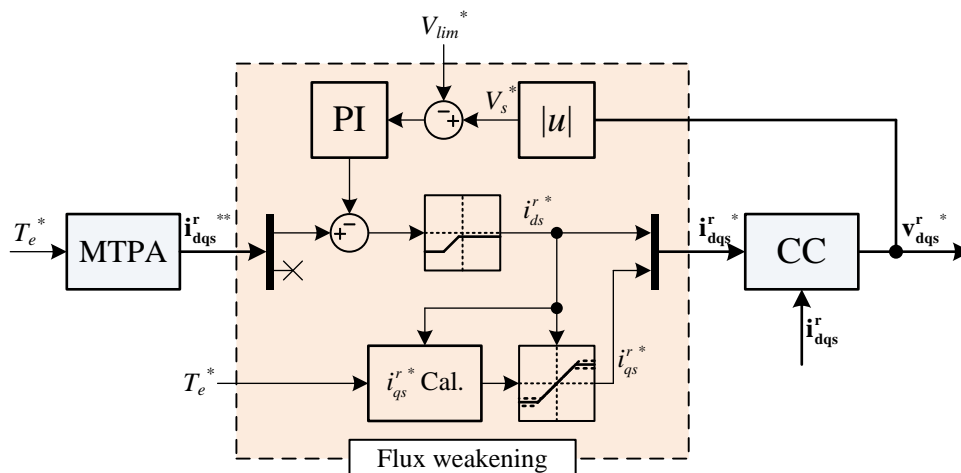
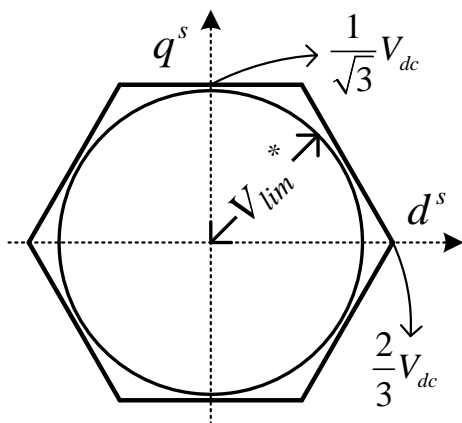


<소형 IPMSM>



❖ 궤환 방식의 약자속 제어 구현

- ▶ MTPA에 따라 1차로 전류 지령 생성
- ▶ $\|\mathbf{v}_{dqs}^r\|$ 가 V_{lim}^* 보다 커지지 않도록 d축 전류를 조절 ($V_{lim}^* = \frac{0.9}{\sqrt{3}} V_{dc} \sim \frac{0.95}{\sqrt{3}} V_{dc}$)
- ▶ MTPV(Maximum Torque Per Voltage)는 고려되지 않음, 제정수 변화 시 정확한 토크 제어 불가

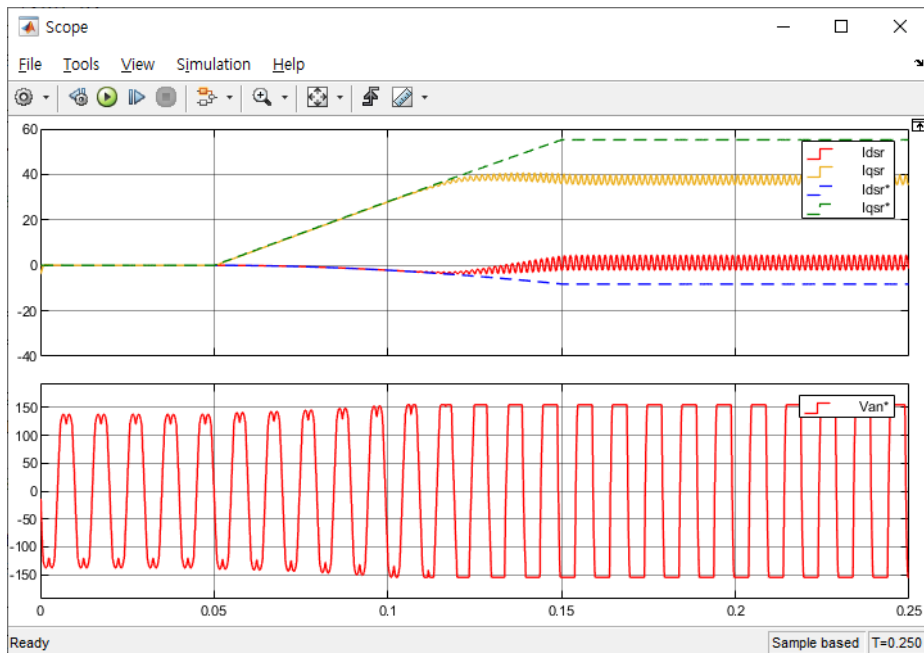


❖ 예제 2-5: PMSM의 약자속 운전 확인

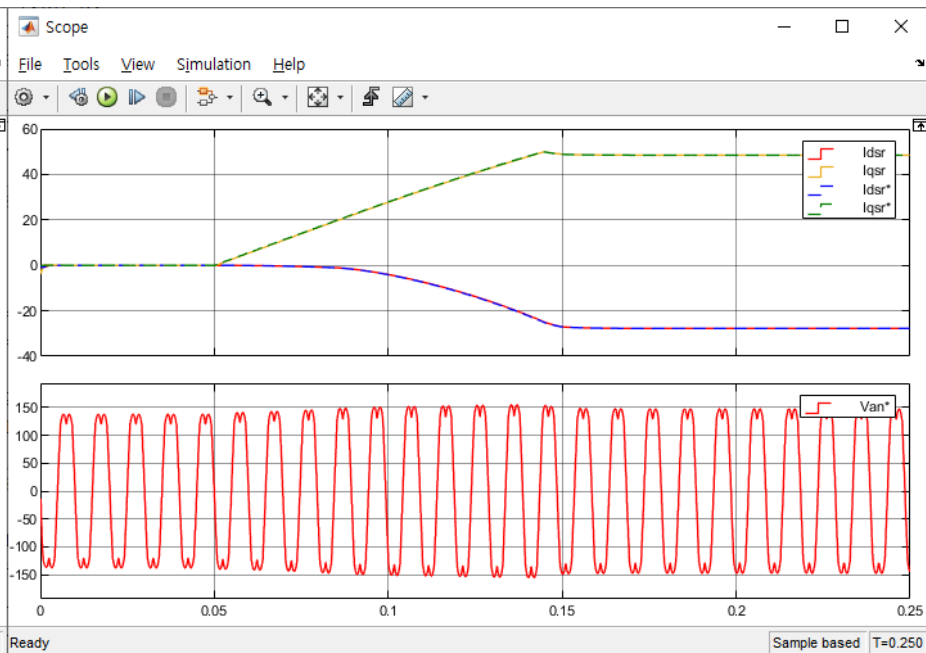
- ▶ 11kW YEC IPMSM
- ▶ $V_{dc} = 310 \text{ V}$, $\omega_{rpm} = 2000 \text{ r/min}$
- ▶ $T_e^* = 0 \text{ pu} \rightarrow 1 \text{ pu}$ (40 pu/s slew rate)
- ▶ 약자속 운전 적용하지 않은 조건과 적용한 조건에서의 파형 비교
 - ✓ Mode.FW = 0 \rightarrow 1

전압 부족에 의해 전류 제어 실패

d축 전류 지령이 수정되어 전압 부족 극복



<약자속 비적용>



<약자속 적용>

❖ 비례-적분 제어기(PI Controller)

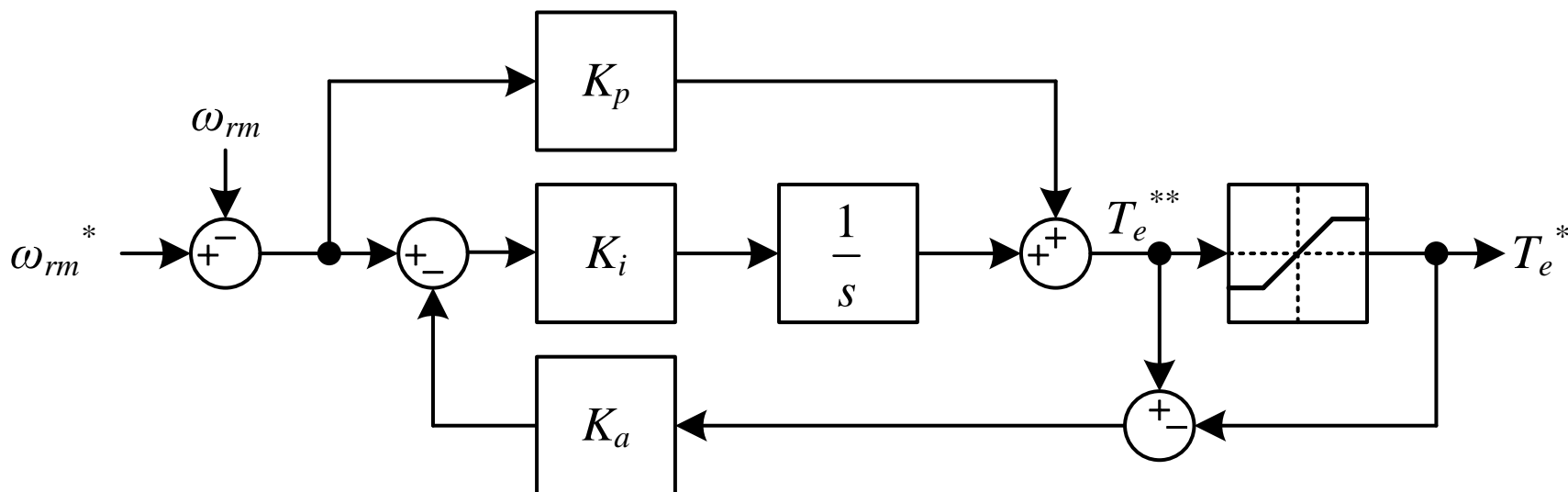
▶ 이득 설정

$$✓ K_{sp} = \widehat{J}_m \omega_{sc}$$

$$✓ K_{si} = \frac{\omega_{sc}}{5} K_{sp}$$

$$✓ K_{sa} = \frac{1}{K_{sp}} \sim \frac{3}{K_{sp}}$$

▶ 전달 함수에 영점(zero)이 존재하여 진동적인 응답 → 오버슈트(Overshoot) 발생



<PI 속도 제어기>

❖ 적분-비례 제어기(IP Controller)

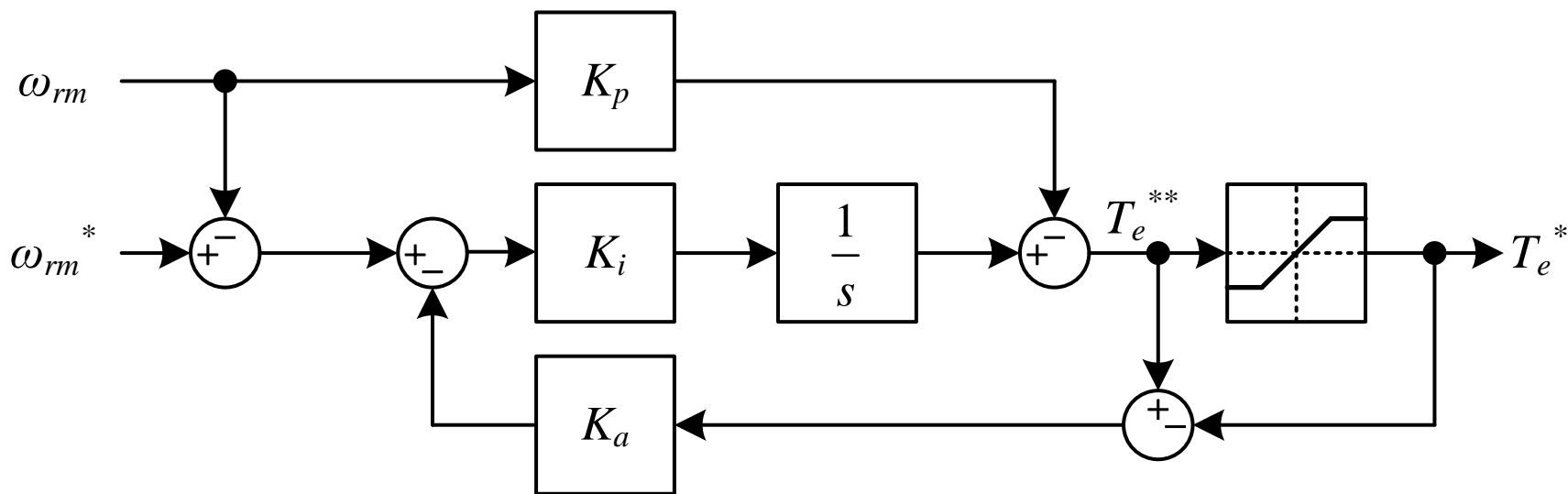
▶ 이득 설정 (비례-적분 제어기와 동일)

✓ $K_{sp} = \widehat{J}_m \omega_{sc}$

✓ $K_{si} = \frac{\omega_{sc}}{5} K_{sp}$

✓ $K_{sa} = \frac{1}{K_{sp}} \sim \frac{3}{K_{sp}}$

▶ 전달 함수에 영점(zero)이 제거되어 오버슈트가 발생하지 않음

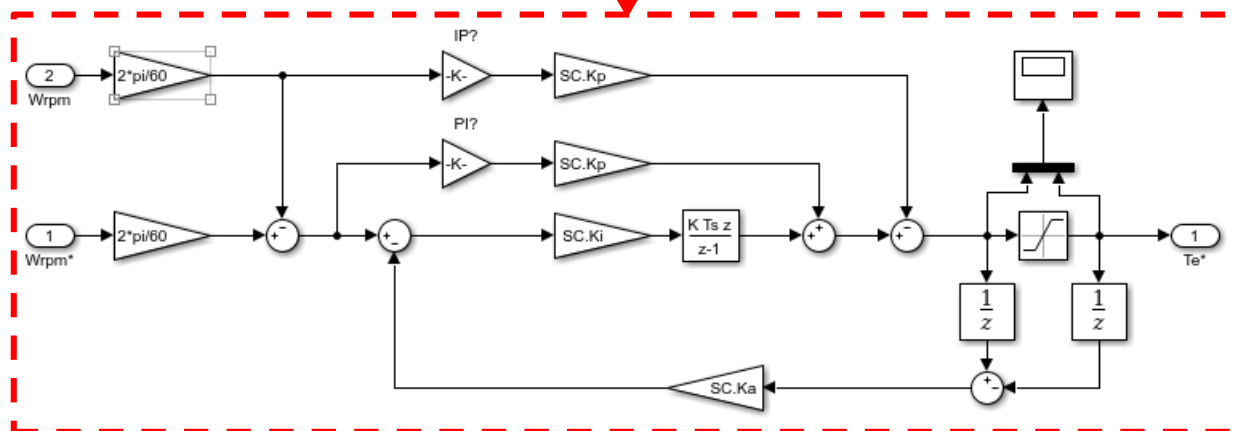
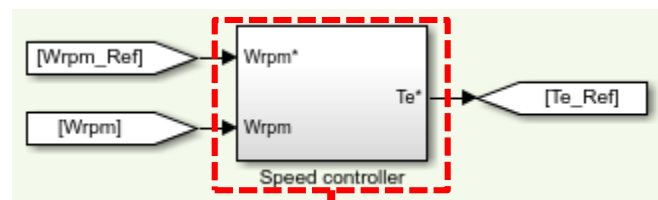
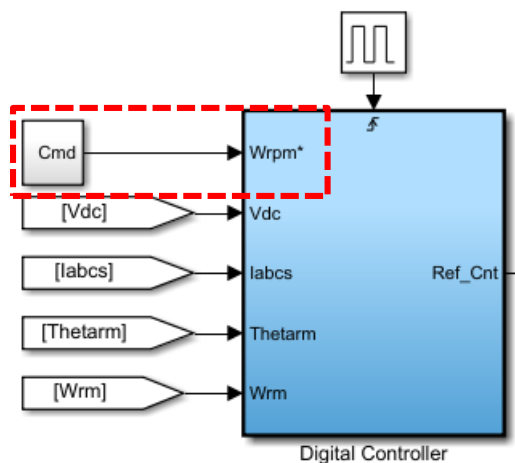


<IP 속도 제어기>

❖ 속도 제어기의 구현

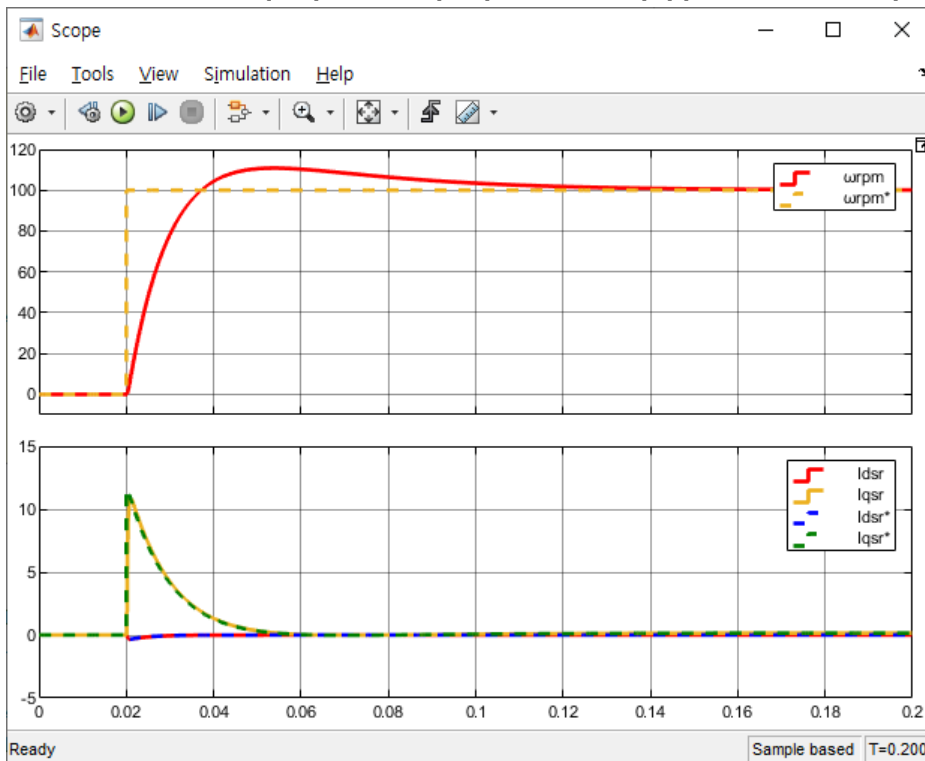
- ▶ 제어기 블록에 토크 지령 대신 속도 지령을 입력
- ▶ 속도 제어기가 토크 지령을 생성
- ▶ Mode.SC_Type을 조절하여 PI, IP 제어기 모두 구현 가능

```
Mode.SC_Type=1;    % Speed controller type
                  % 1: PI controller, 2: IP controller
```

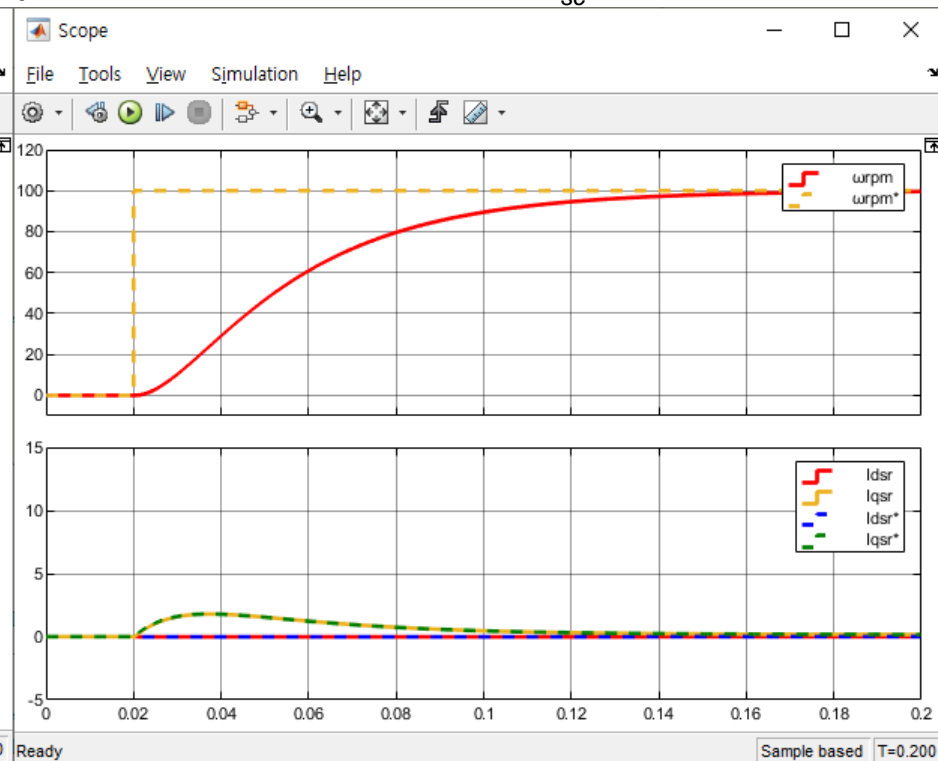


❖ 예제 2-6: PI 제어와 IP 제어 비교

- ▶ 11kW YEC IPMSM, $V_{dc} = 310 \text{ V}$, $\omega_{sc} = 2\pi \cdot 20\text{Hz}$
- ▶ $\omega_{rpm}^* = 0 \text{ r/min} \rightarrow 100 \text{ r/min}$
- ▶ PI 제어: 더 빠르지만 오버 슈트 발생
- ▶ IP 제어: 느리지만 오버슈트 발생하지 않음 ← 같은 출력 제한에서 ω_{sc} 를 증가 시킬 수 있음



<PI 제어 적용(Mode.SC_Type=1)>



<IP 제어 적용(Mode.SC_Type=2)>

3. 통합 PMSM 시뮬레이션

2. 유닛 LIAISON 기호 디자인

❖ PMSM의 모든 제어 기능을 실행할 수 있는 하나의 통합 시뮬레이션 모델

❖ 모드 변수 (A_PMSM.m)

- ▶ Mode.Ctrl: 제어 모드
 - ✓ 1: 토크 제어, 2: 속도 제어
- ▶ Mode.PWM: PWM 방법
 - ✓ 1: SCPWM, 2: 60deg DPWM, 3: 120deg(on) DPWM, 4: 120deg(off) DPWM
- ▶ Mode.CC_Type: 전류 제어기 형태
 - ✓ 1: 상태 궤환 전류 제어기, 2: 복소수 벡터 전류 제어기
- ▶ Mode.SC_Type: 속도 제어기 형태
 - ✓ 1: PI 제어기, 2: IP 제어기
- ▶ Mode.AntiWindup: 안티 와인드업
 - ✓ 0: 안티 와인드업 비활성화, 1: 안티 와인드업 활성화
- ▶ Mode.FW: 약자속 제어
 - ✓ 0: 약자속 제어 비활성화, 1: 약자속 제어 활성화

❖ 커맨드 변수 (A_PMSM.m)

▶ 토크 제어 모드

- ✓ Te_Ref_Set: 5 스텝의 토크 지령
 - Ex) Te_Ref_Set=[0 0.25 0.5 0.75 1]*Te_Rated;
- ✓ Te_Slew_Rate: 토크 지령의 슬루 레이트(slew rate)
 - 단위는 Nm/s
- ✓ Wrm_Init, Wrm_Fin: 시뮬레이션 시작 및 종료 시 속도
 - 속도는 Wrm_Init에서 Wrm_Fin까지 선형 증가

▶ 속도 제어 모드

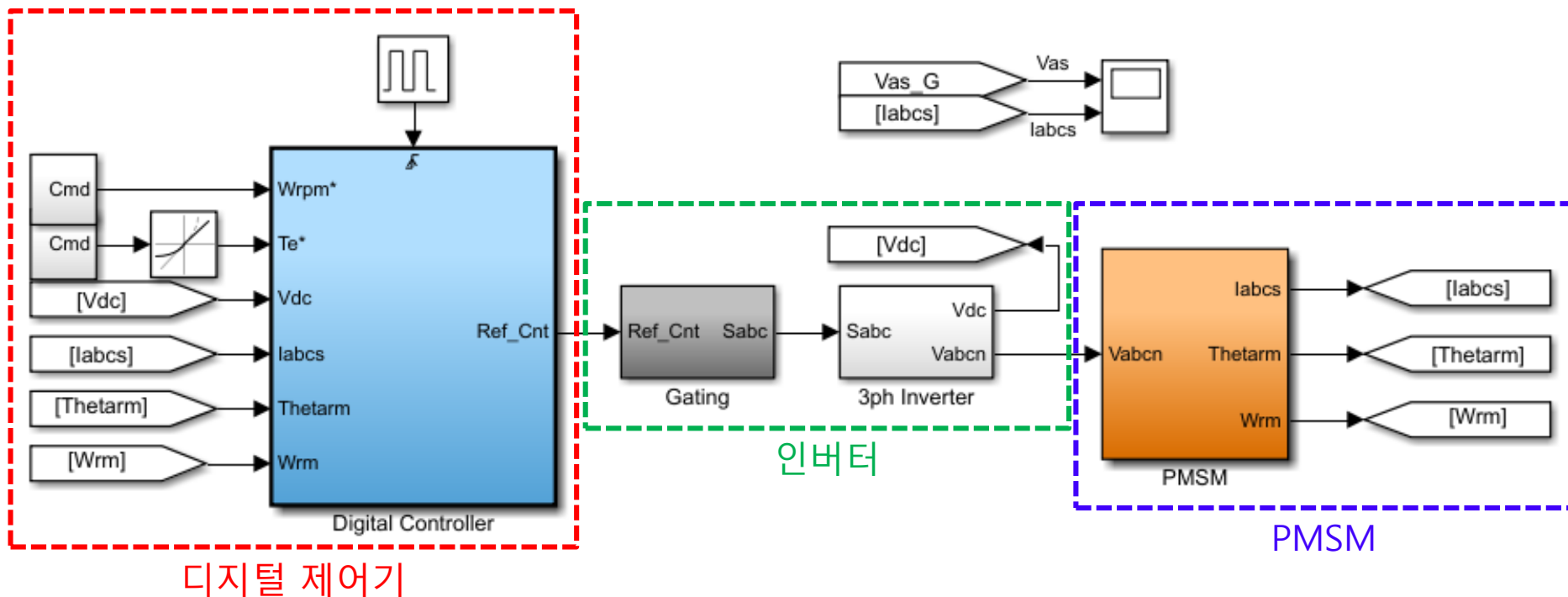
- ✓ Wrpm_Ref_Set: 5 스텝의 속도 지령
- ✓ TL: 5 스텝의 부하 토크

▶ 시간

- ✓ Step_Time: 5 스텝의 인가 시간 (Te_Ref_Set, Wrpm_Ref_Set, TL)
- ✓ Stop_Time: 시뮬레이션 종료 시간

❖ Simulink 모델 (A_PMSM.slx)

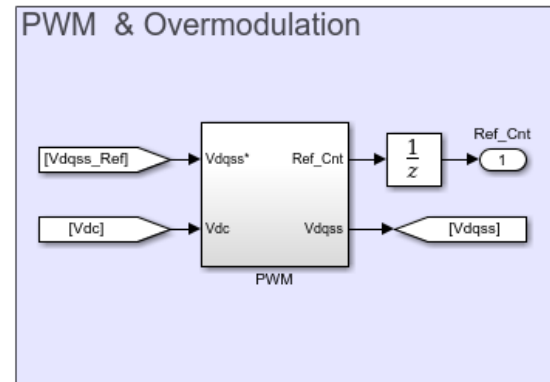
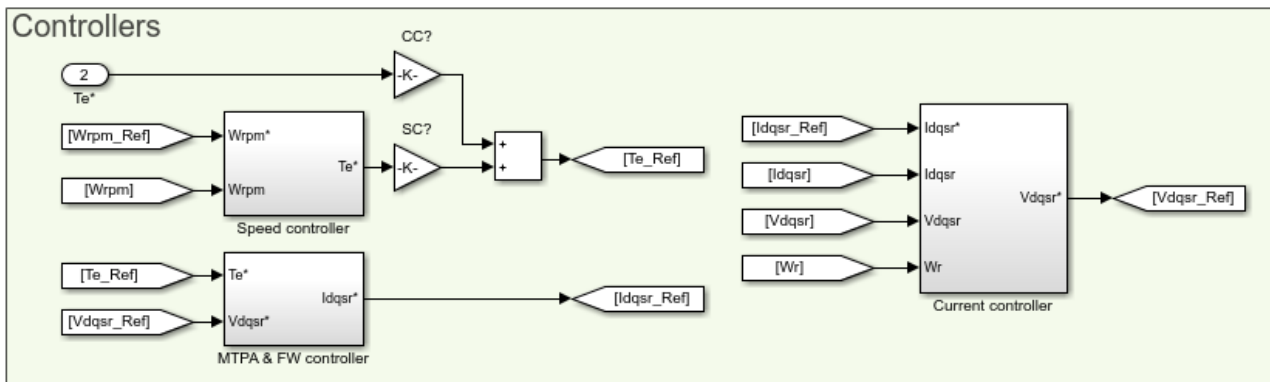
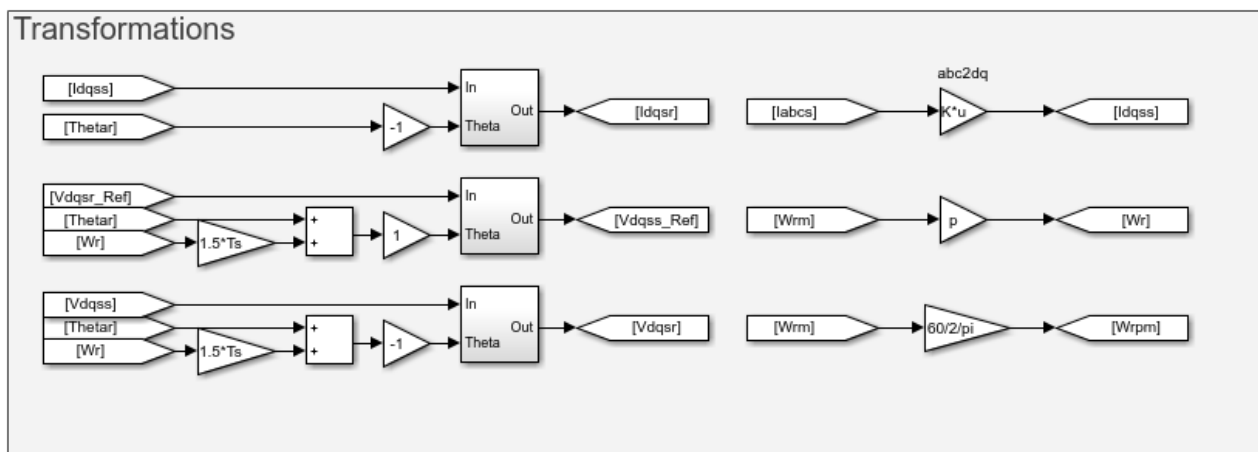
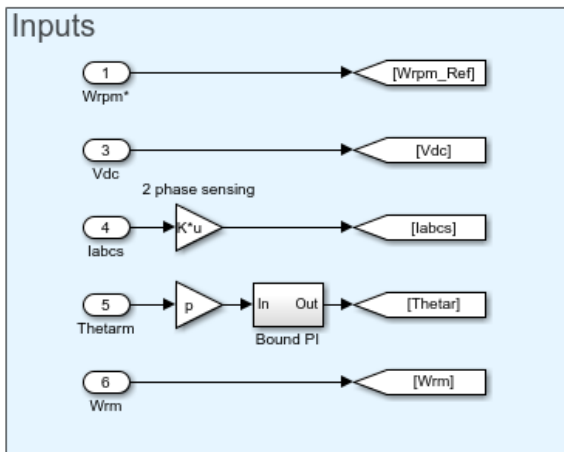
▶ 전체 블록도



▶ 디지털 제어기

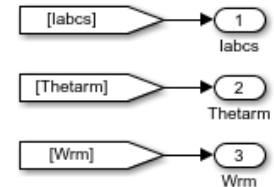
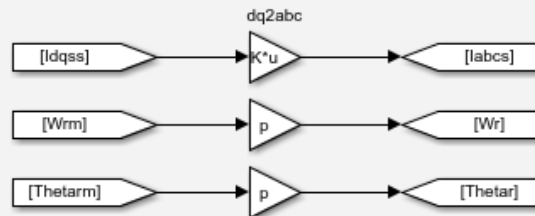
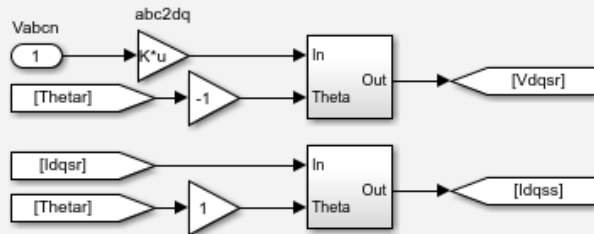


Trigger

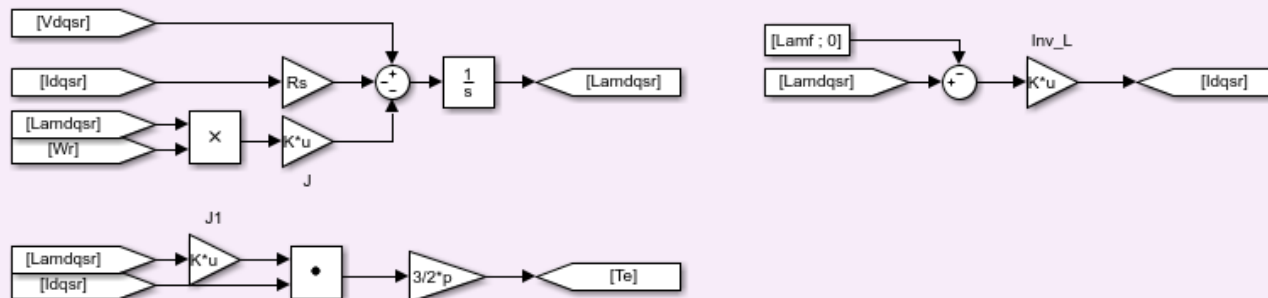


▶ PMSM 모델

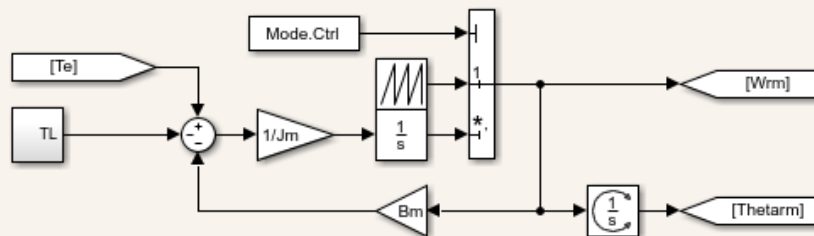
Transformations



Electrical Model



Mechanical Model



❖ 조건 1: 능력 곡선 추출

▶ 속도를 0 r/min에서 10000 r/min까지 증가시키며 PMSM이 내는 최대 토크 관찰

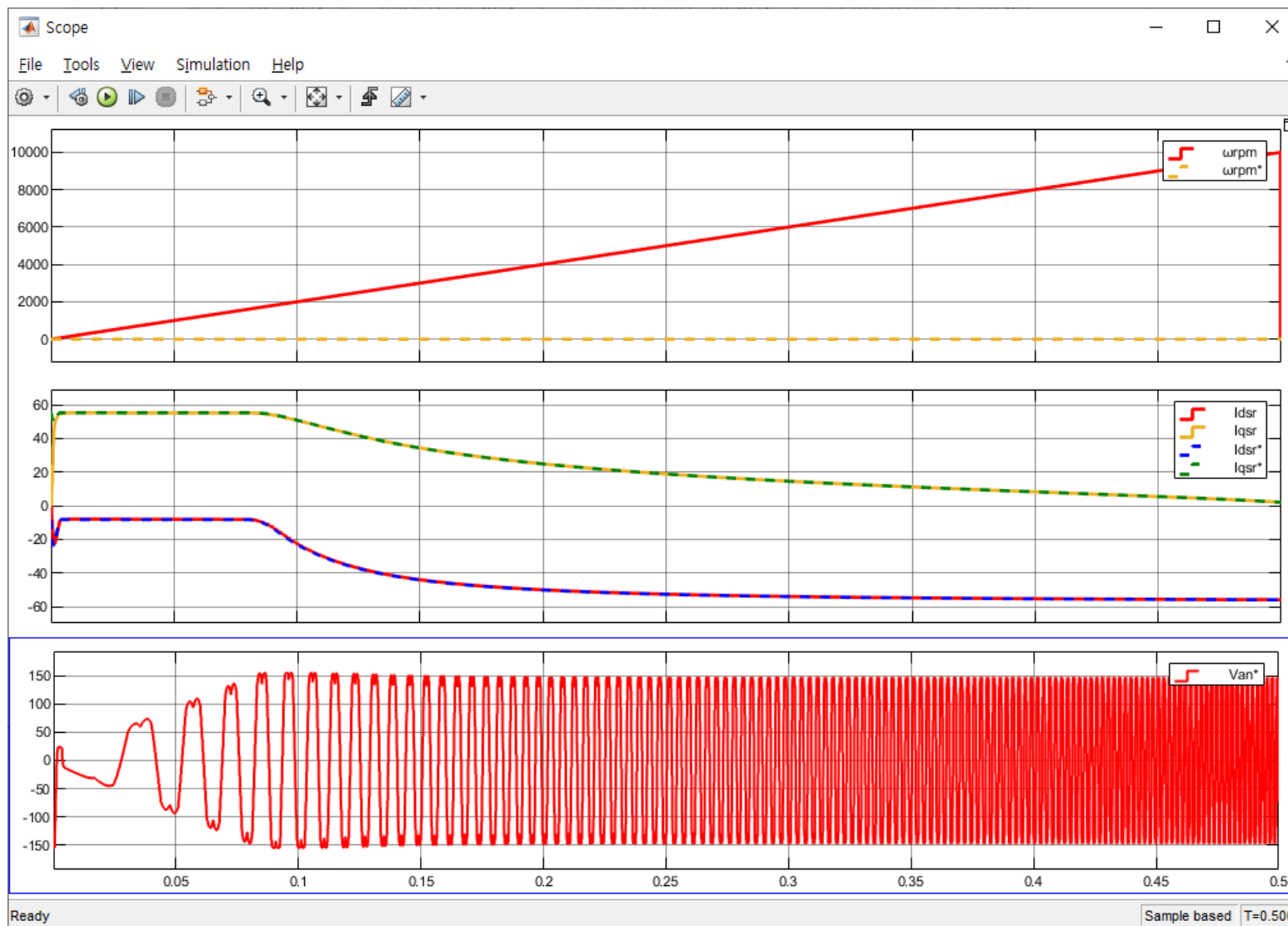
▶ 시뮬레이션 모드 설정

Mode.Ctrl	Mode.PWM	Mode.CC_Type	Mode.SC_Type	Mode.AntiWindup	Mode.FW
1	1	2	2	1	1

▶ 커맨드 설정

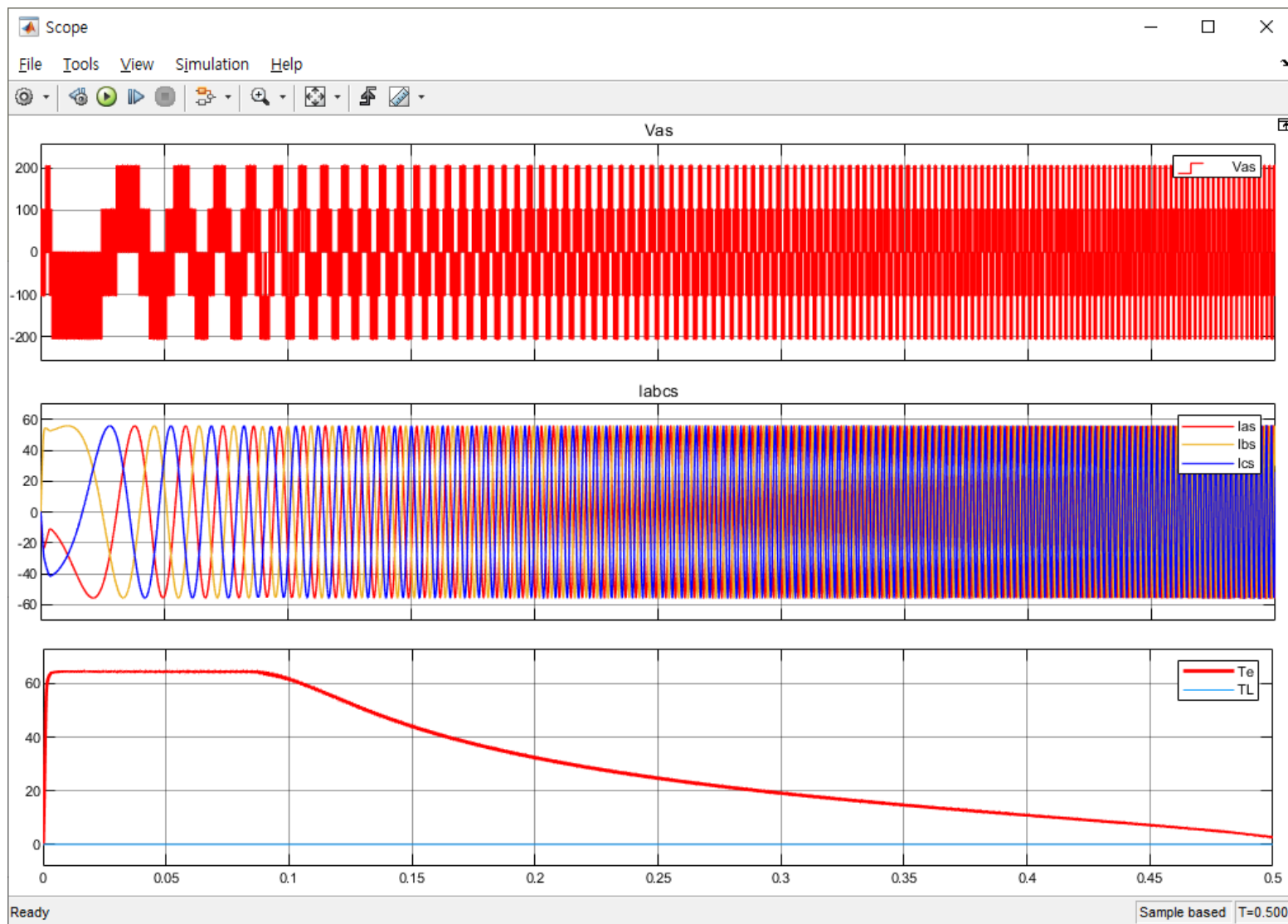
- ✓ Step_Time=[0.1 0.2 0.3 0.4];
- ✓ Stop_Time=0.5;
- ✓ Te_Ref_Set=ones(1,5)*Te_Rated;
 - 토크 지령은 1pu로 유지
- ✓ Wrm_Init=0*2*pi/60;
 - 시작 속도는 0 r/min
- ✓ Wrm_Fin=10000*2*pi/60;
 - 마지막 속도는 10000 r/min

▶ 속도, 동기 좌표계 전류, 극 전압 지령 (디지털 제어기 내부 변수)



3 통합 PMSM 시뮬레이션

▶ 상 전압, 전류, 토크 (연속 시간 변수)



❖ 조건 2: 속도 제어 성능 확인

▶ 속도 지령을 바꿔가며 제어 성능 확인

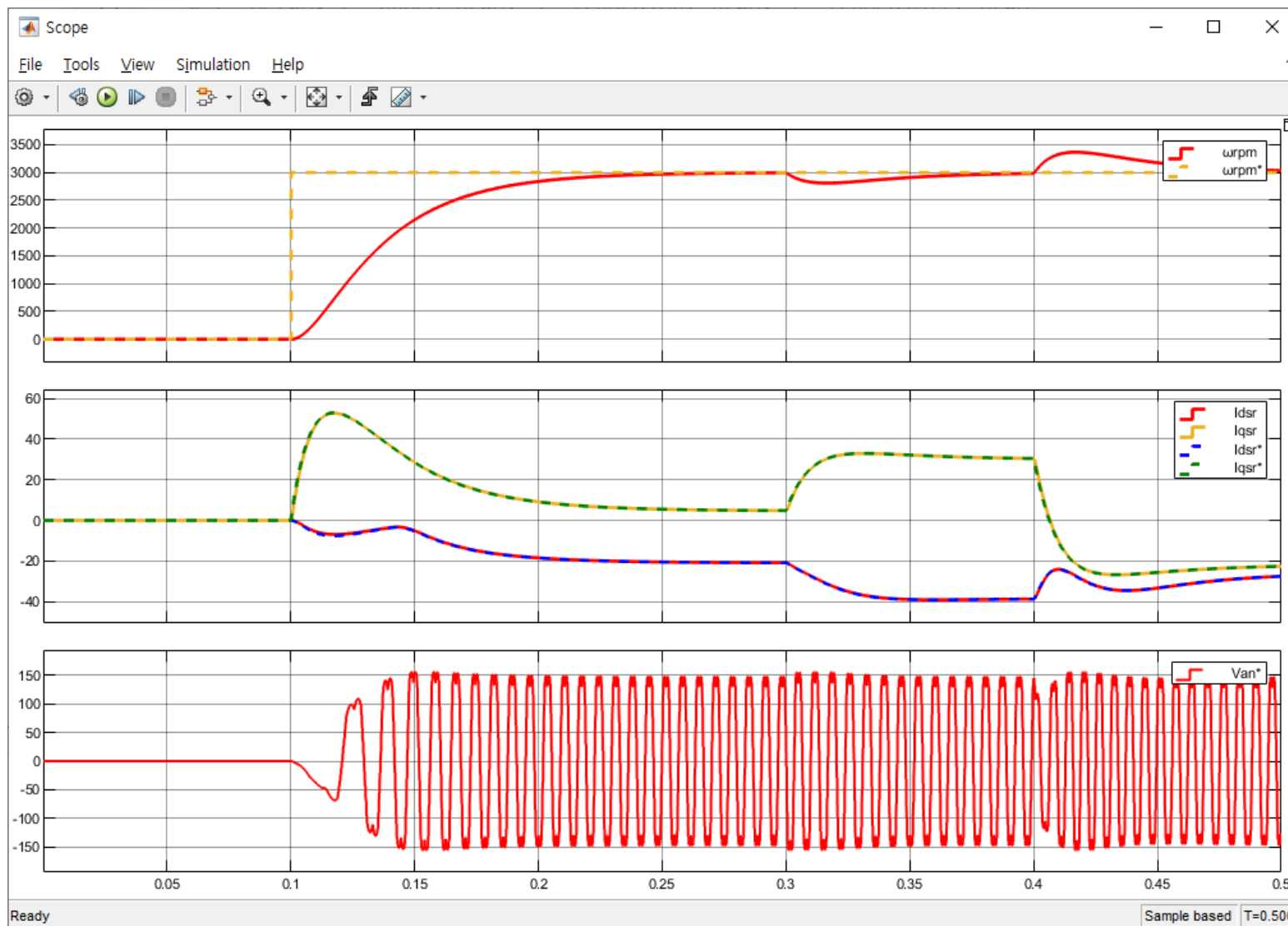
▶ 시뮬레이션 모드 설정

Mode.Ctrl	Mode.PWM	Mode.CC_Type	Mode.SC_Type	Mode.AntiWindup	Mode.FW
2	1	2	2	1	1

▶ 커맨드 설정

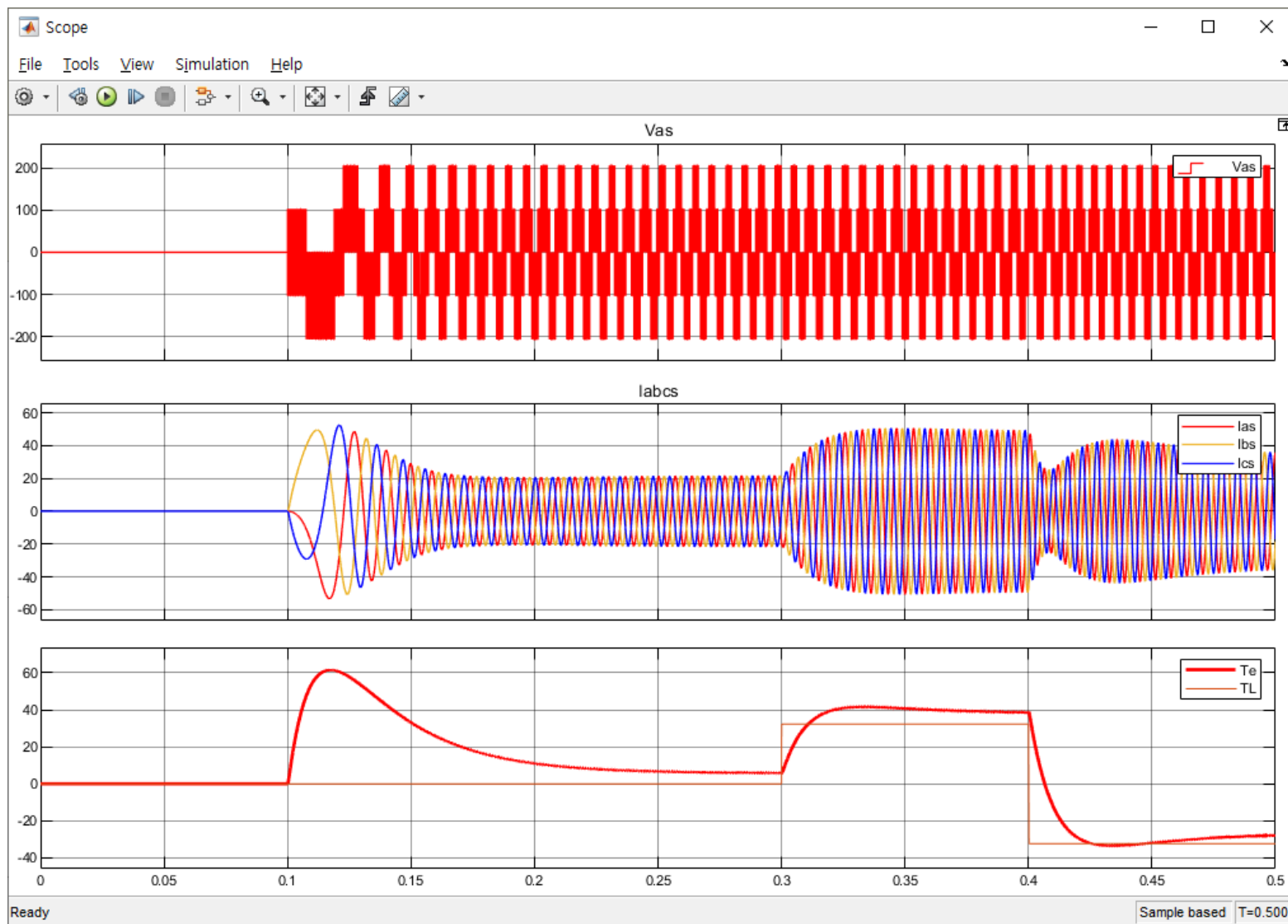
- ✓ Step_Time=[0.1 0.2 0.3 0.4];
- ✓ Stop_Time=0.5;
- ✓ Wrpm_Ref_Set=[0 3000 3000 3000 3000];
 - 0.1초에 속도 지령이 0 r/min → 3000 r/min으로 증가
- ✓ TL=[0 0 0 0.5 0.5]*Te_Rated;
 - 0.3초에 토크 지령이 0 pu → 0.5 pu로 증가

▶ 속도, 동기 좌표계 전류, 극 전압 지령 (디지털 제어기 내부 변수)



3 통합 PMSM 시뮬레이션

▶ 상 전압, 전류, 토크 (연속 시간 변수)



감사합니다!

kyc@plecko.biz