

PWM주파수의 변화를 이용한 BLDC모터의 속도 제어

2002. 6.29

원종문

목 차

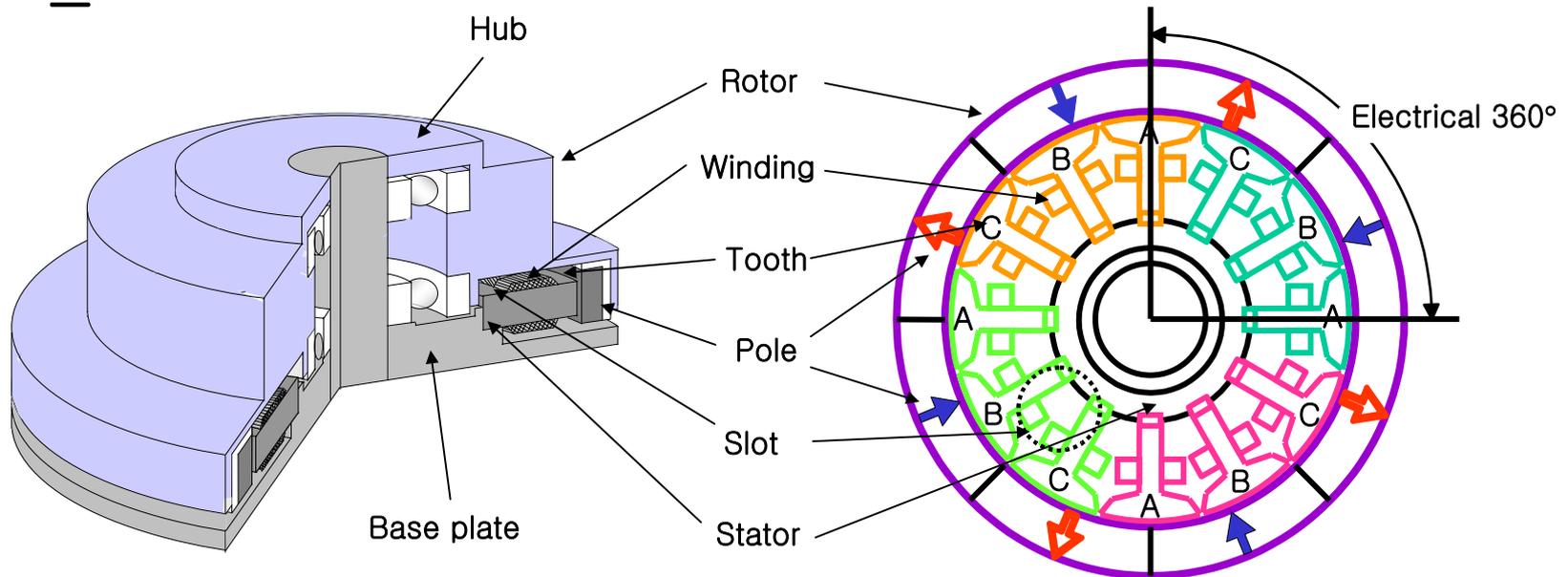
- 연구 동기
- 모터 구동의 원리 (상전압 분사 방식)
- PWM 방식의 원리
- 기존의 PWM 방식의 문제점
- PWM 주파수 변화 방식 제안
- 이론적 해석 방법 제안
- 결론
- 향후 과제

연구 동기

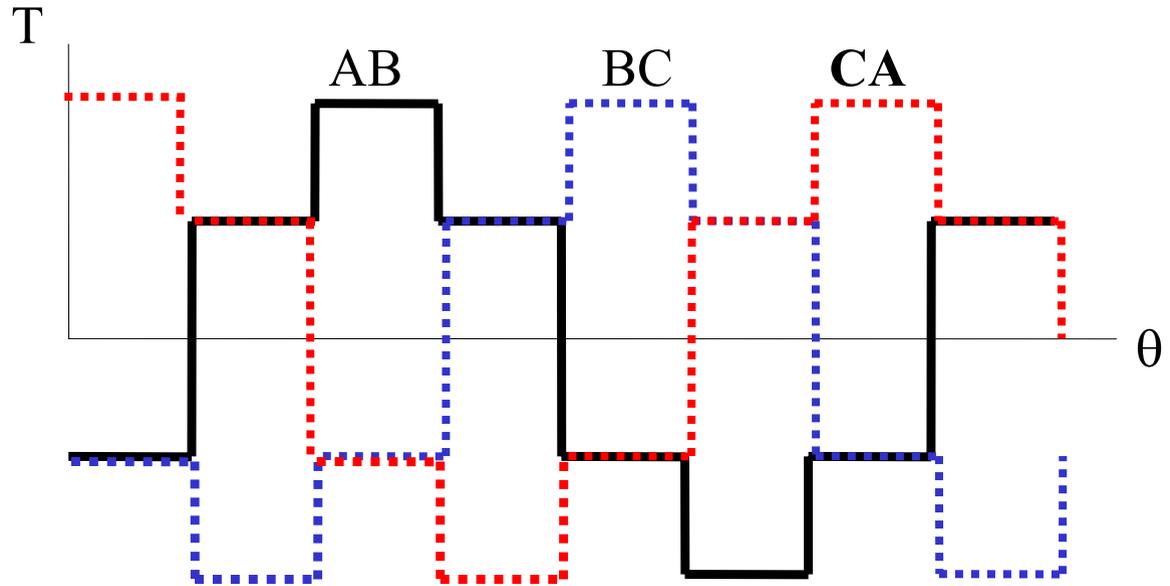
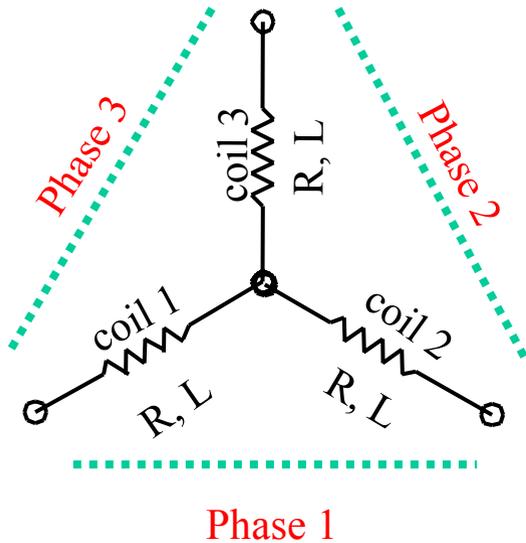
- 기존의 PWM을 이용한 모터의 제어방법은 PWM신호의 발생적 문제들을 고려하지 않거나 외부의 회로 요소로 해결하였다.
- PWM신호의 duty ratio뿐만 아니라 period의 크기 또한 제어 요소가 될 수 있다.

모터 구동의 원리

- HDD 스피ndl 모터의 구조(8Pole 12Slot)



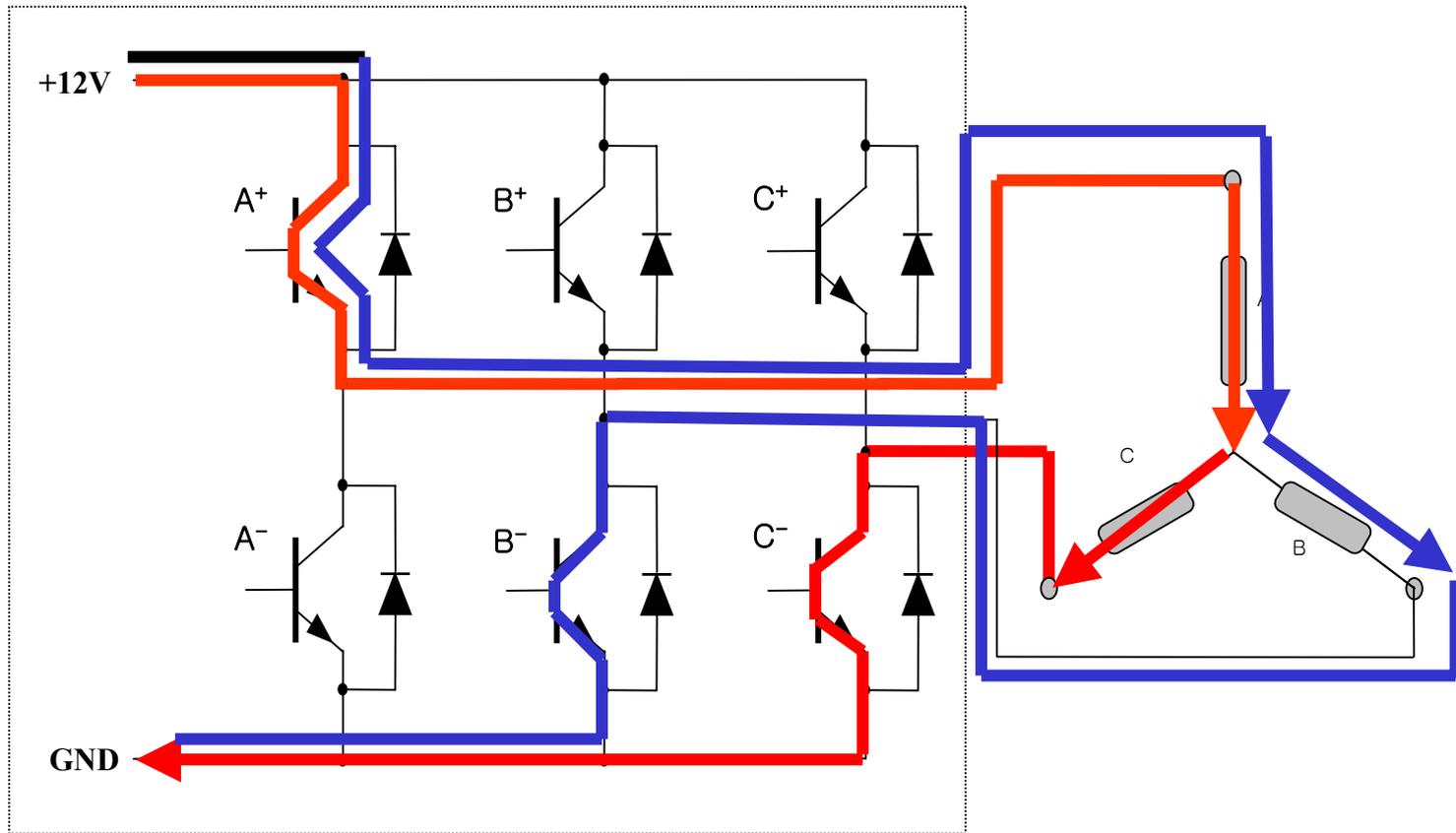
- Communitation(Wye Wound)



reverse torque

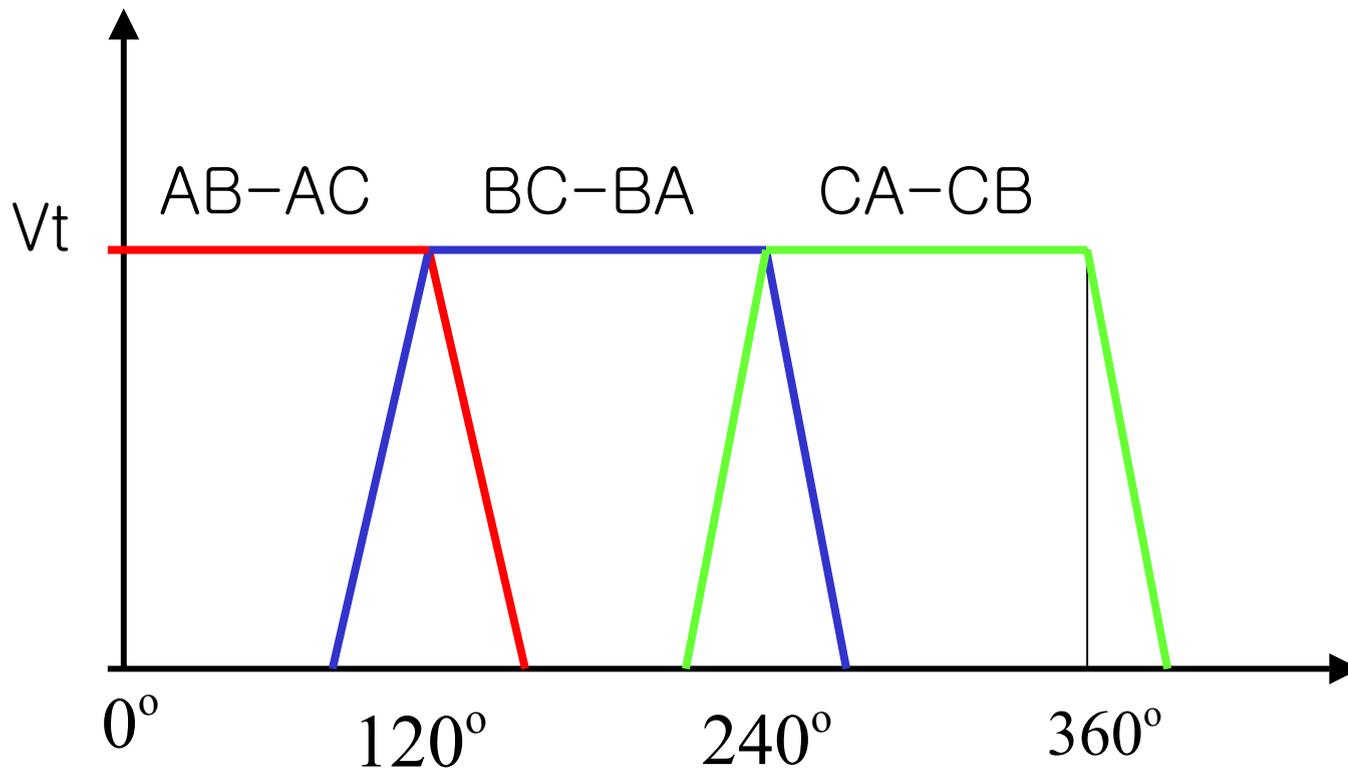
– AB-AC-BC-BA-CA-CB

- 인버터의 작동(AB-AC)



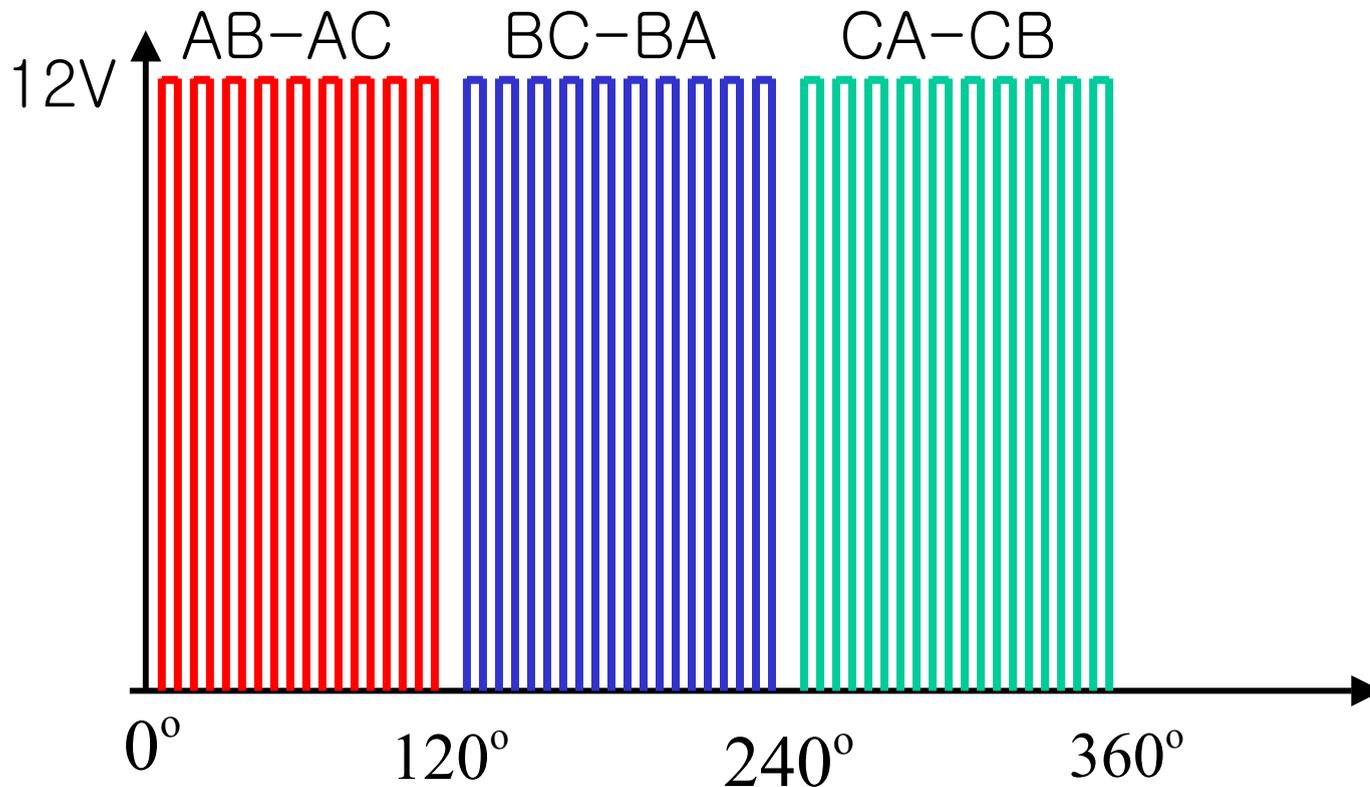
- 상전압 분사의 방법

- 전압의 크기를 변화시키는 방법



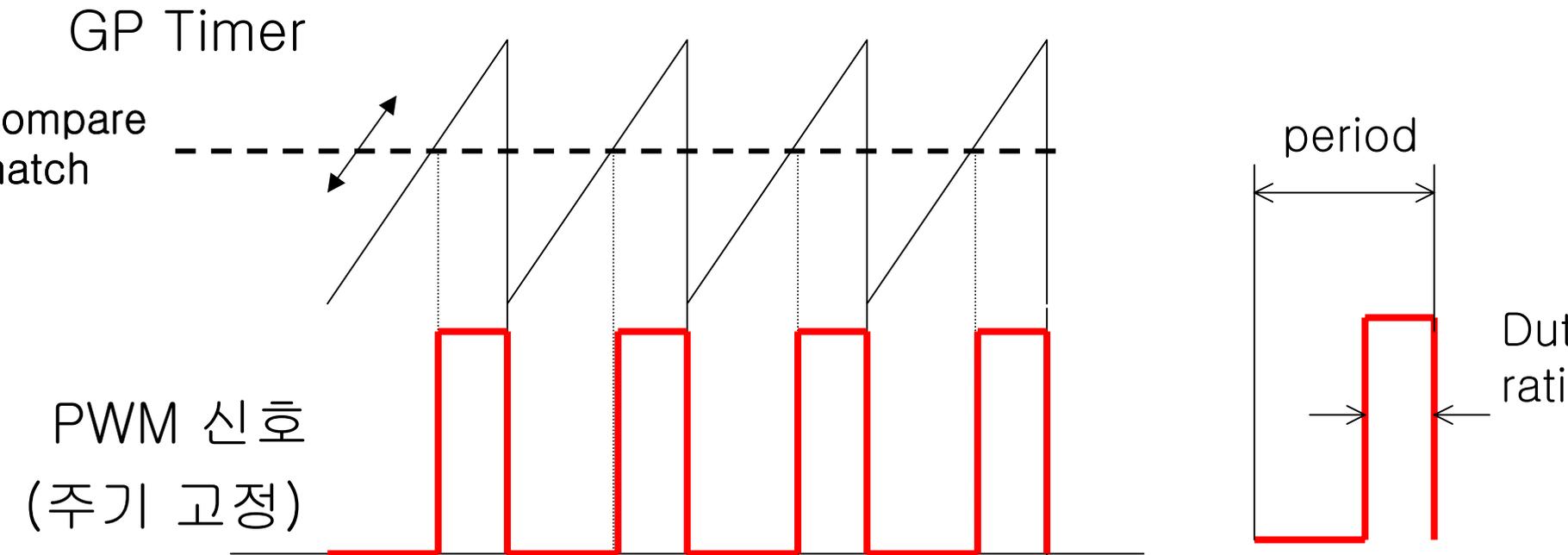
- 상전압 분사의 방법

- PWM의 duty ratio를 변화시키는 방법

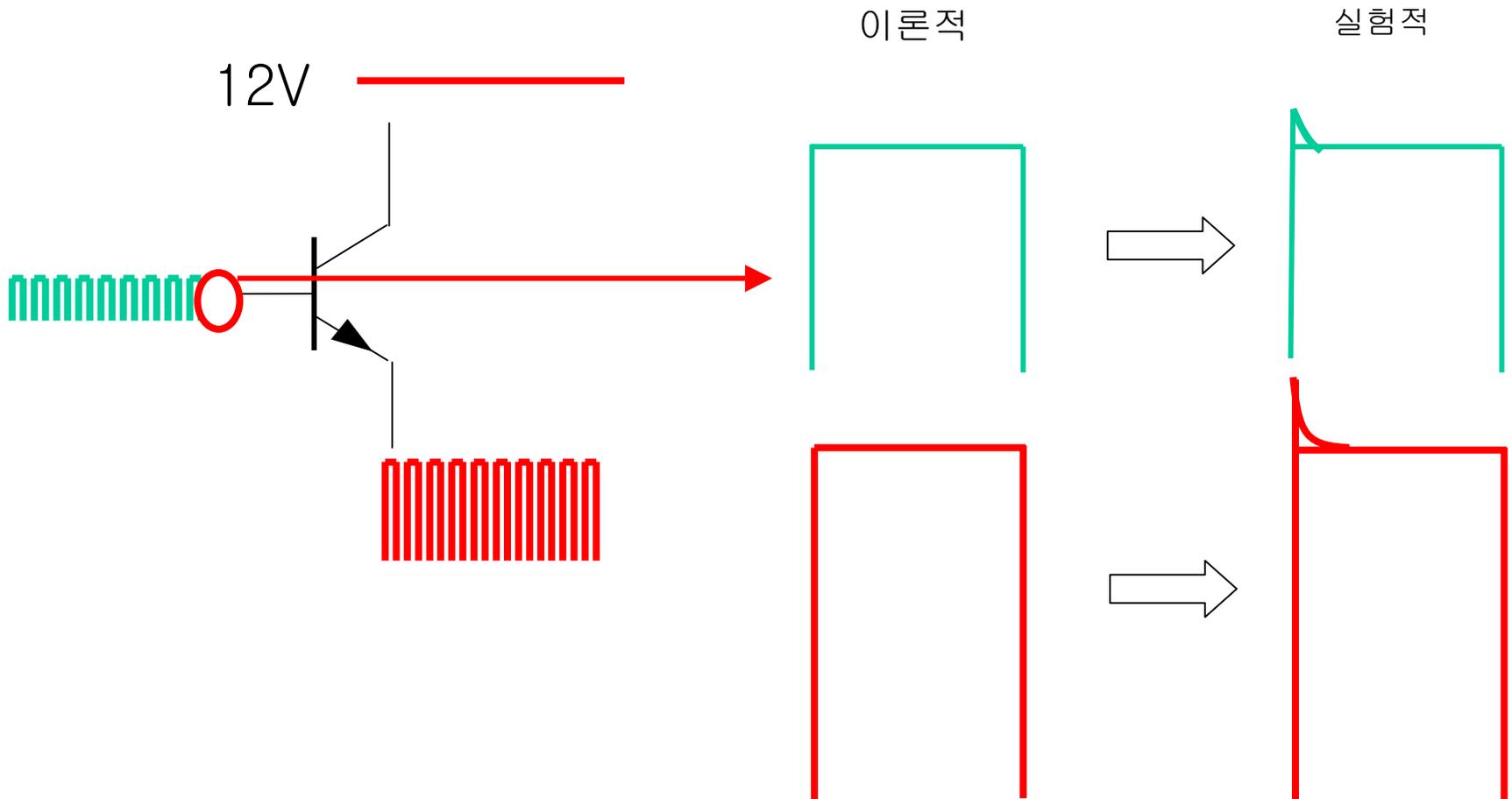


PWM 방식의 문제점

- PWM 신호의 생성 방식(TMS320F240)

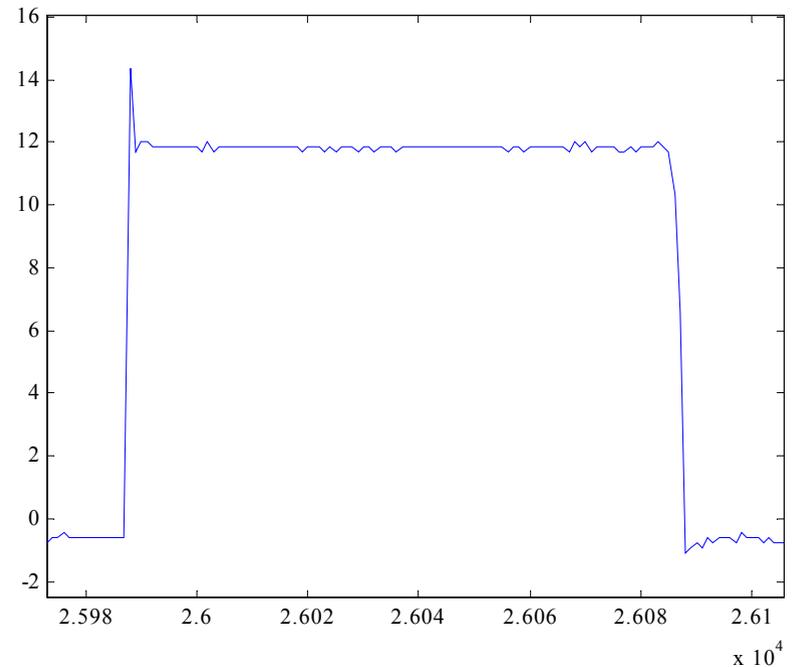
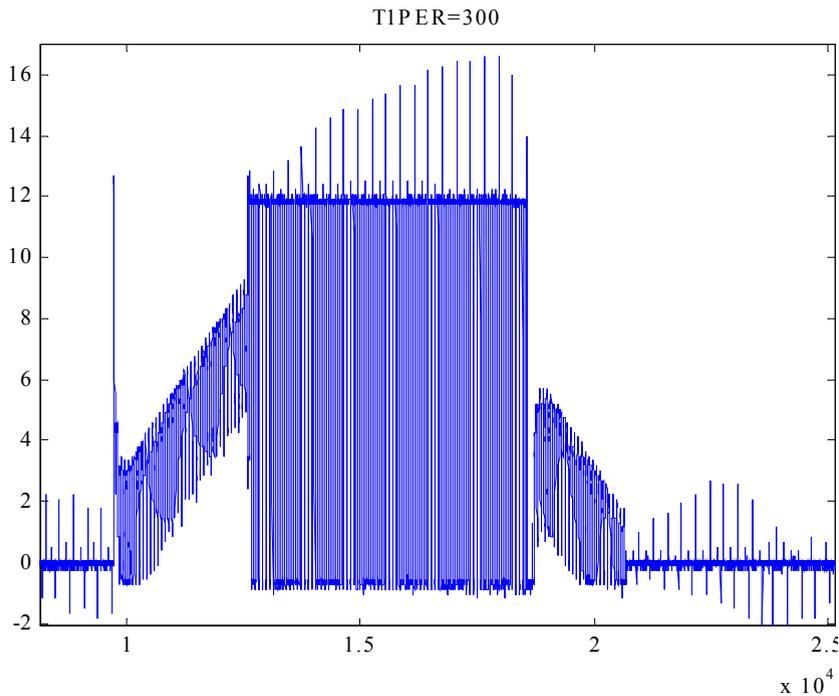


- 1st : overshoot



- 실험 수치

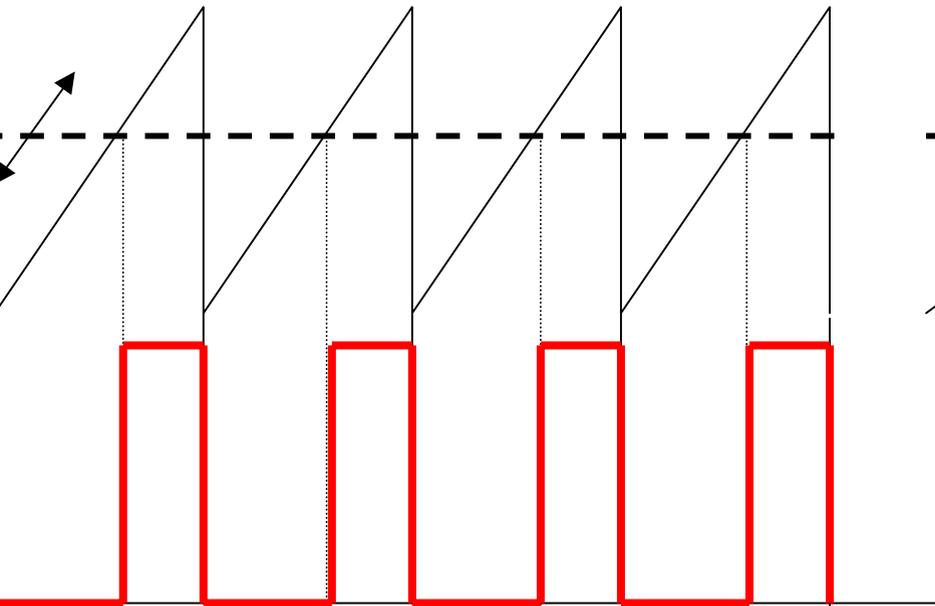
- 4500rpm, Timer frequency:33.3KHz, A phase



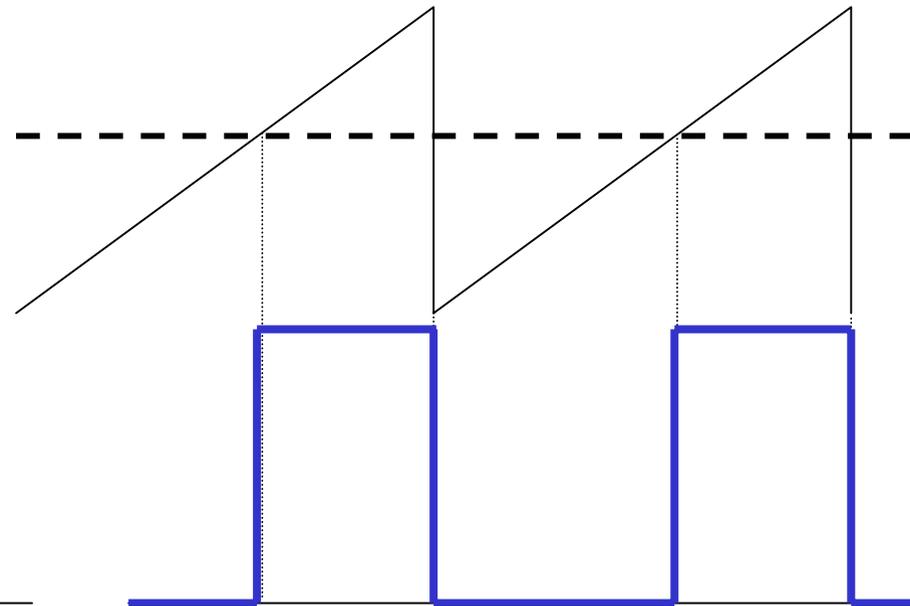
- 2nd : 최적의 주파수

GP Timer

N Hz



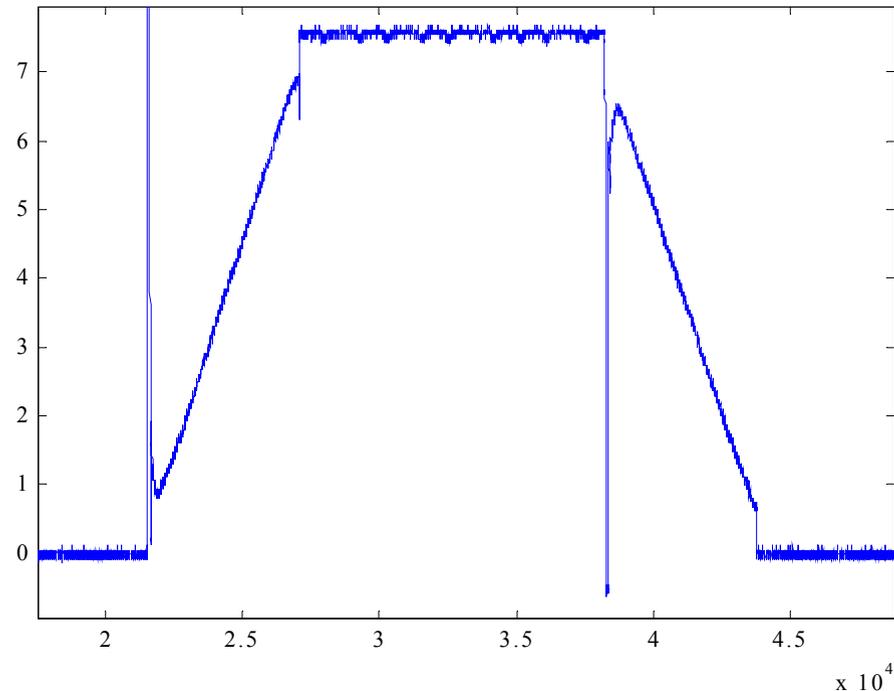
N/2 Hz



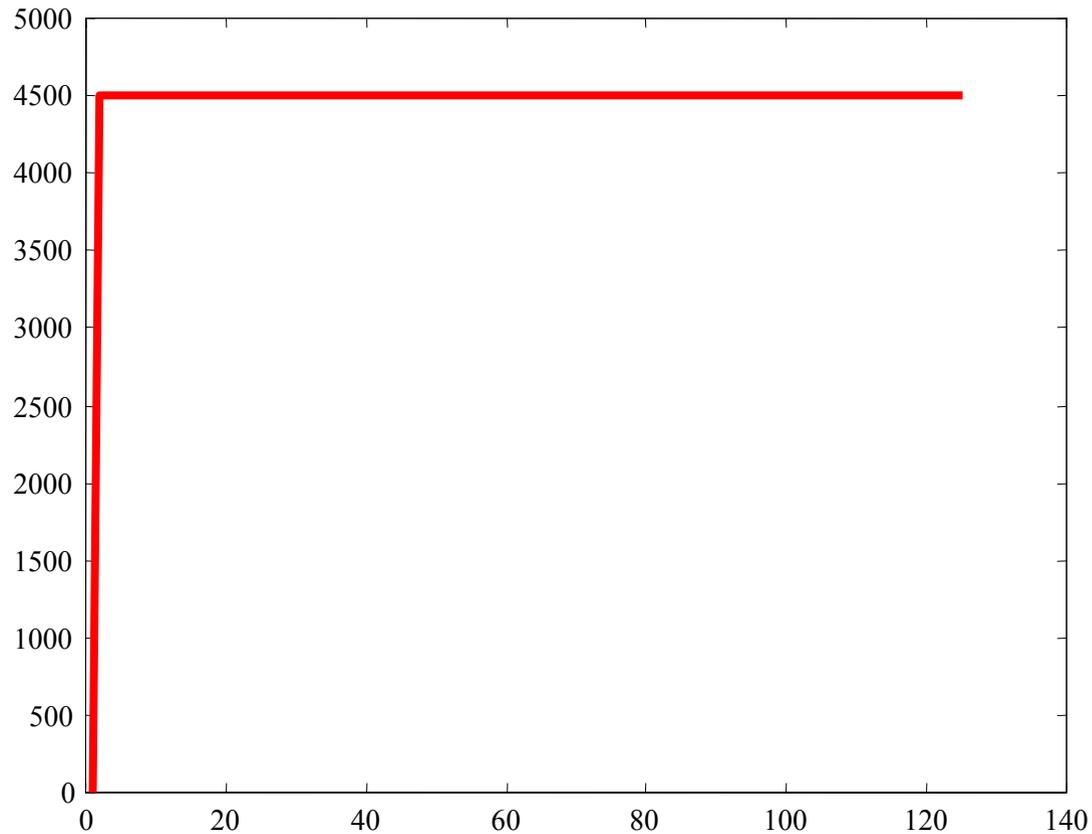
- 최적의 주파수 효과
 - overshoot등의 노이즈 감소
 - 기존의 고정 주파수는 제어 변수가 duty ratio뿐이었지만, 가변 주파수방식에서는 주파수와 duty ratio 두 개의 제어 변수가 존재한다.
 - 기준속도의 변화에 대한 auto tuning의 가능성

주파수 변위에 의한 실험

- 전압의 크기 변화에 의한 제어(winbel)



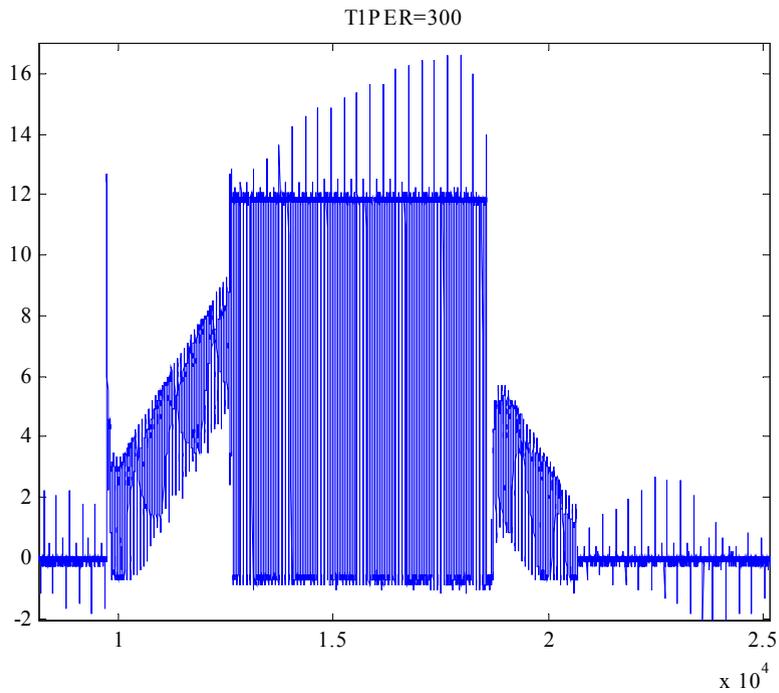
-속도 그래프



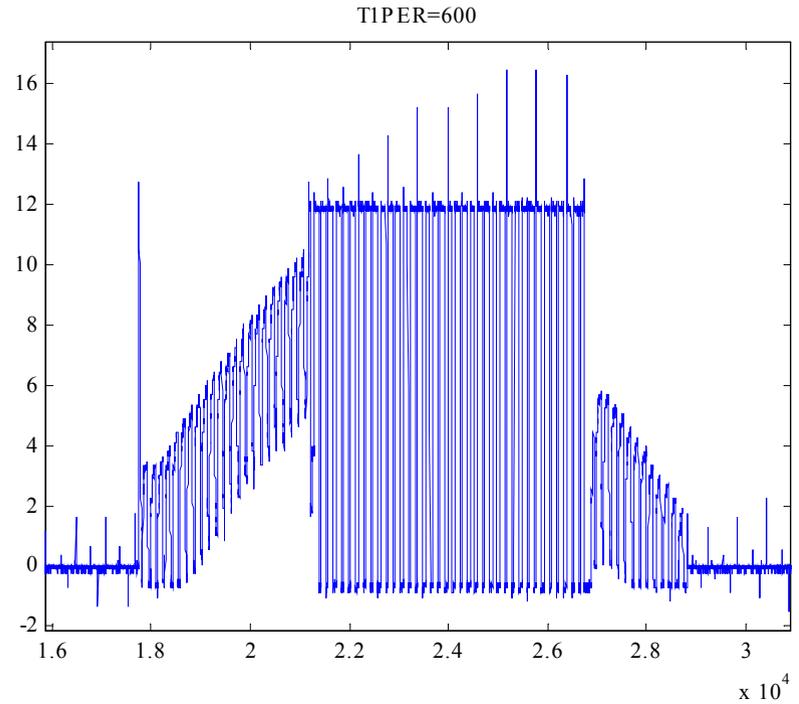
- 실험 방법

- 삼성 워너 모터
- 정격 속도 : 4500rpm
- 초기 구동 : align and go
- 정상 상태 : BEMF zero crossing
- 제어 방법 : PI control을 이용한 속도차에 의한 duty ratio 조절
- PWM 주파수를 변화시켜 상전압과 속도 프로파일을 측정

- 33.3KHz

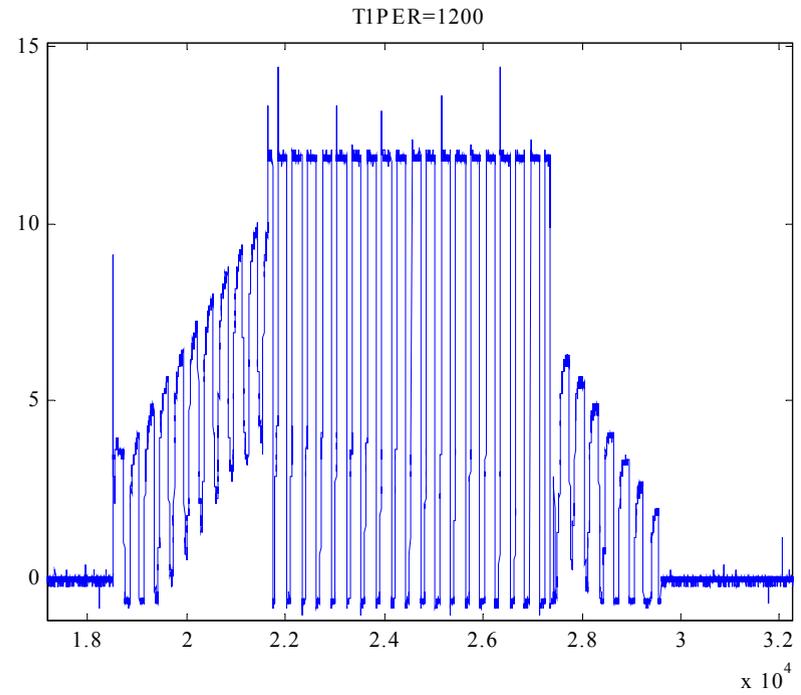
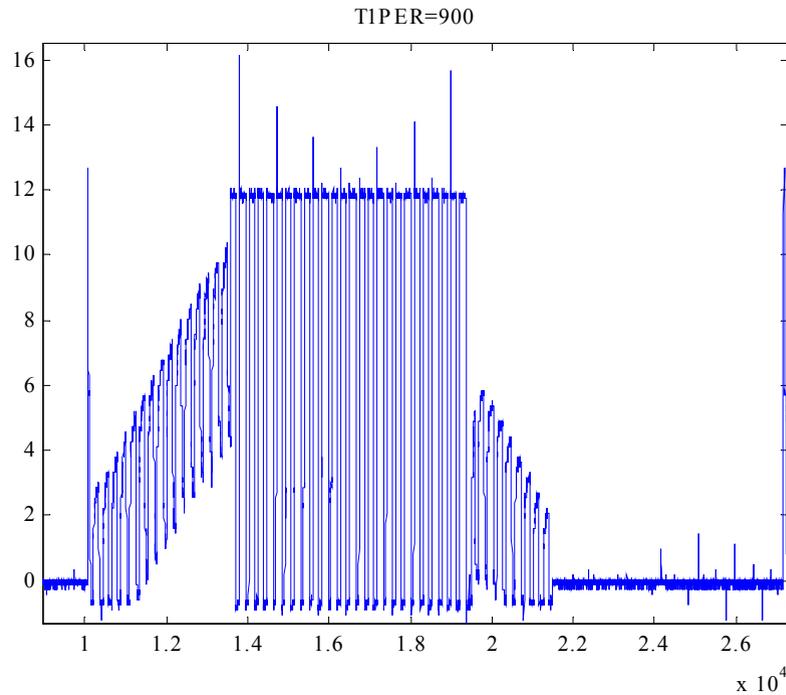


- 16.6KHz



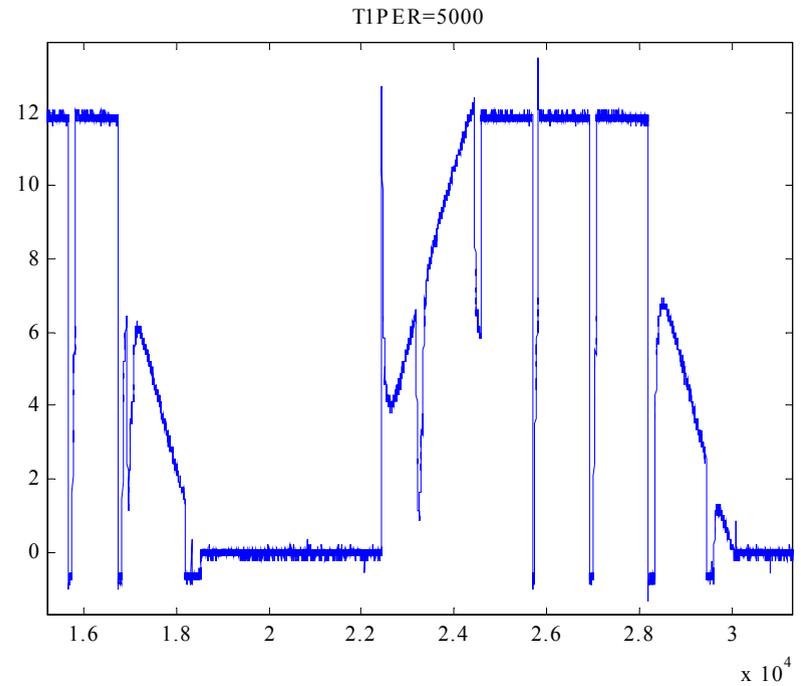
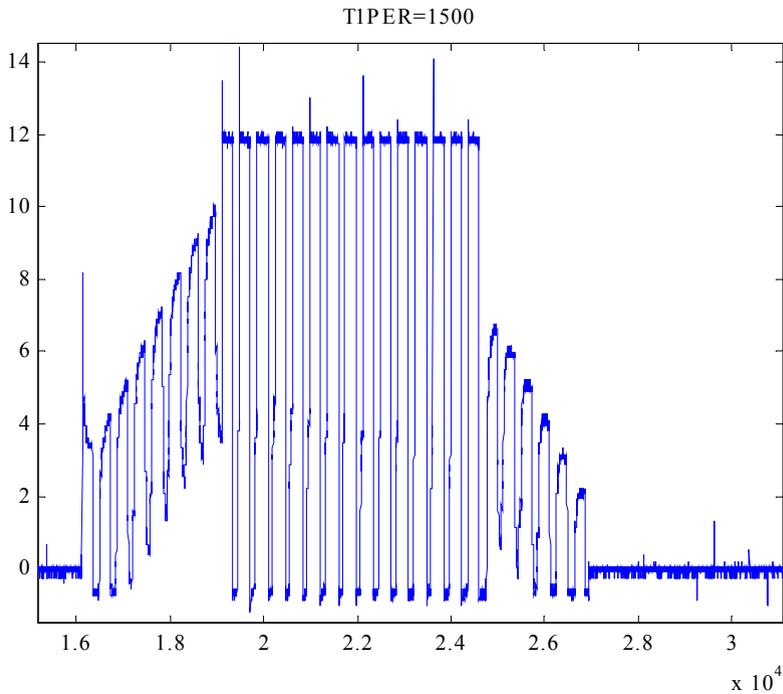
- 11.1KHz

- 8.3KHz

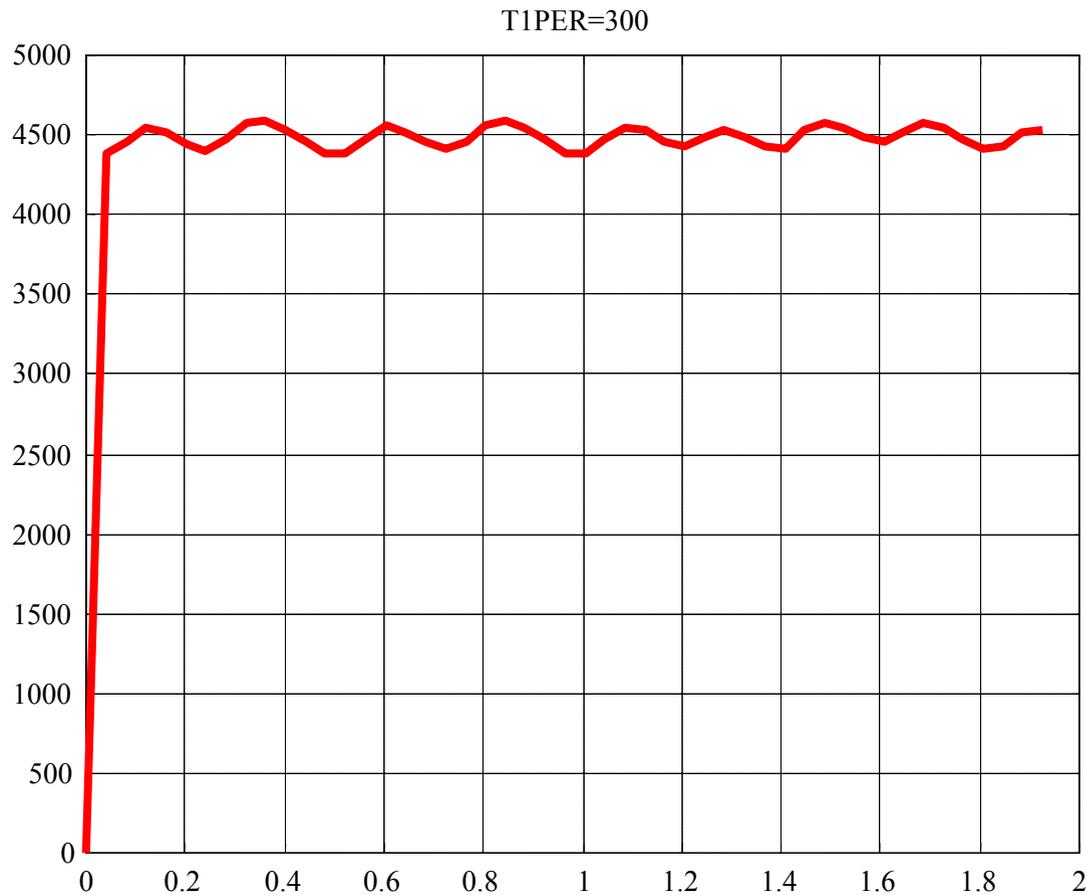


- 6.6KHz

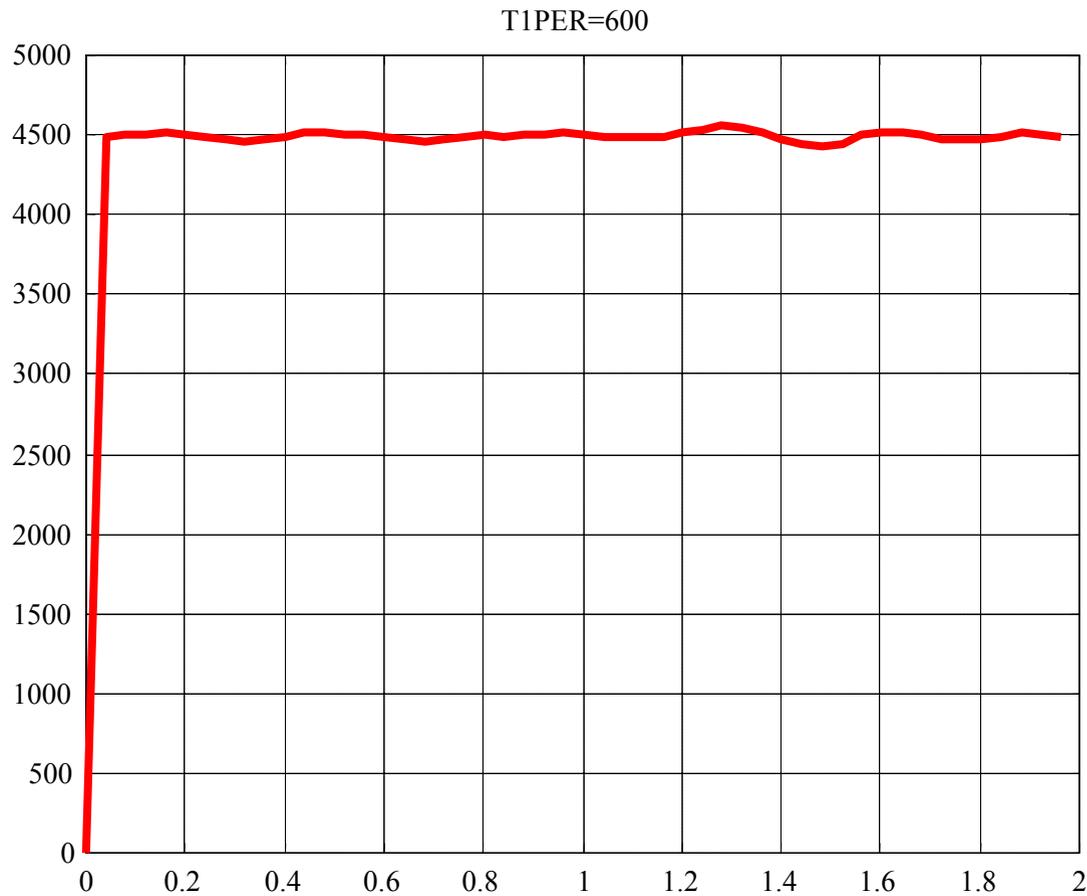
- 2KHz



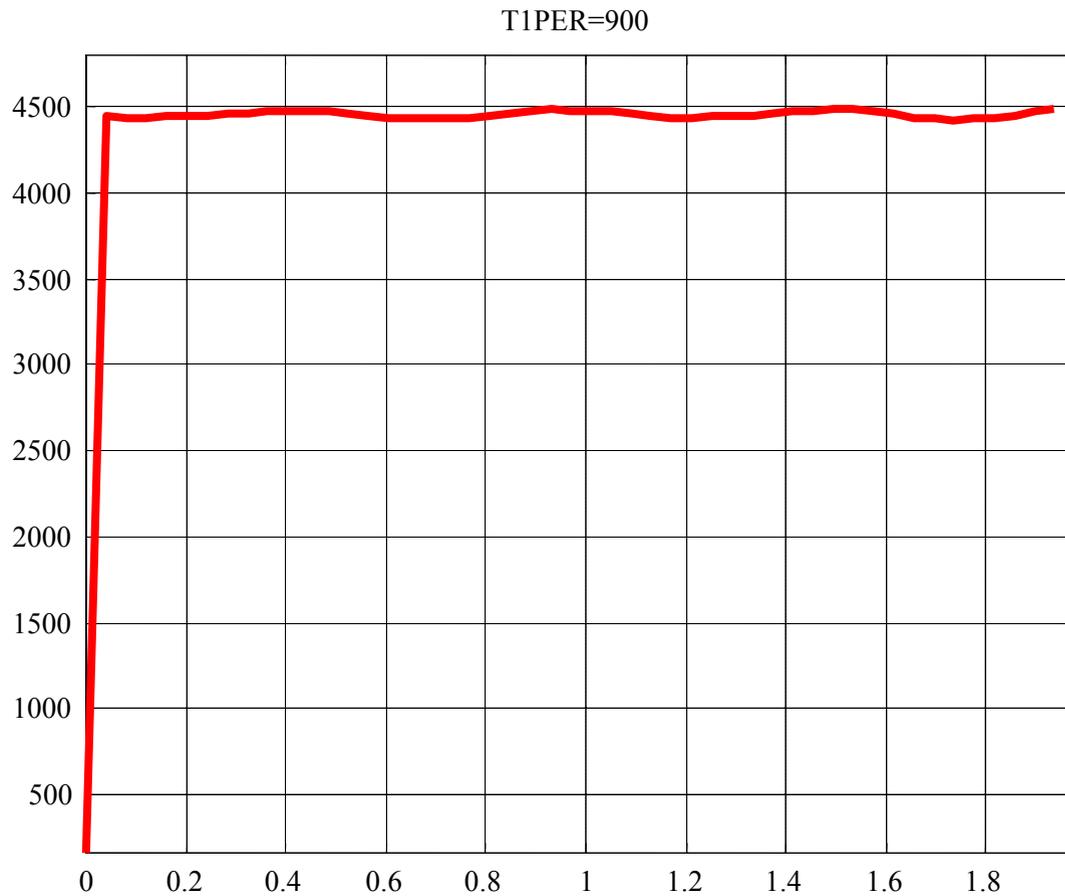
- 주파수에 따른 속도 프로파일 (33.3kHz)



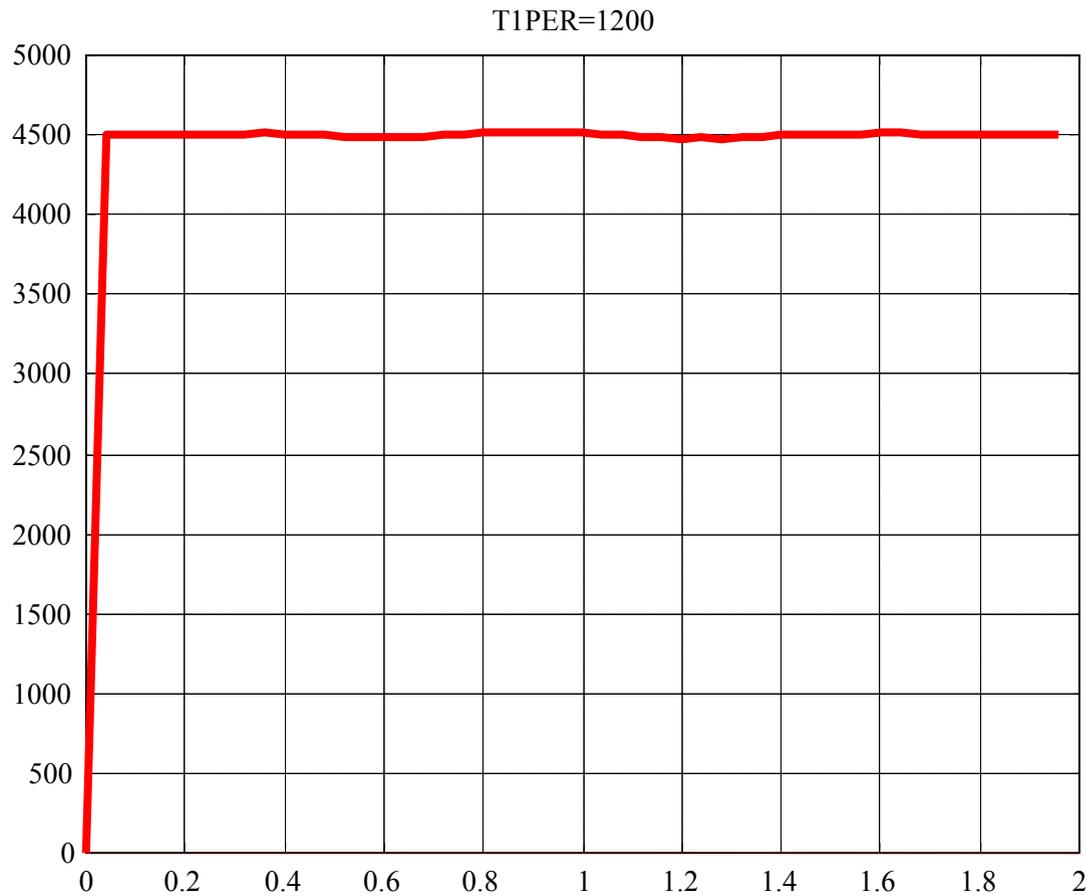
- 16.6kHz



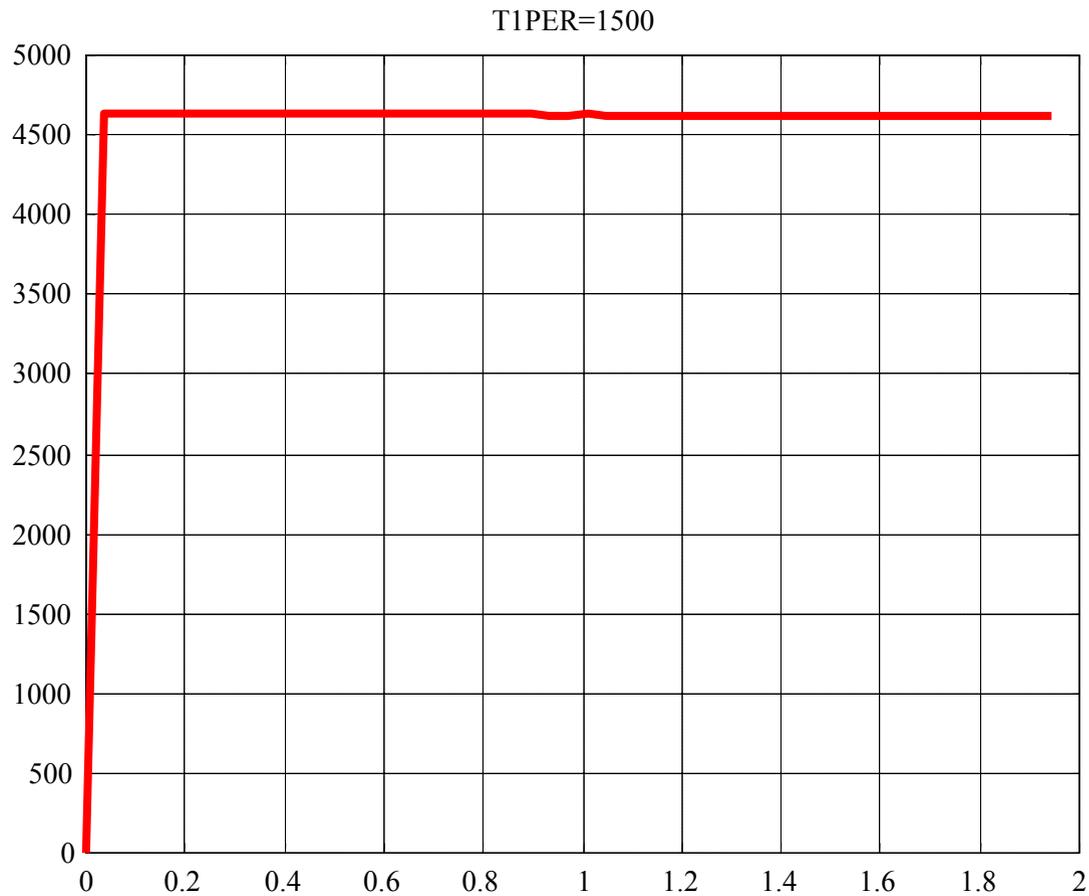
- 11.1kHz



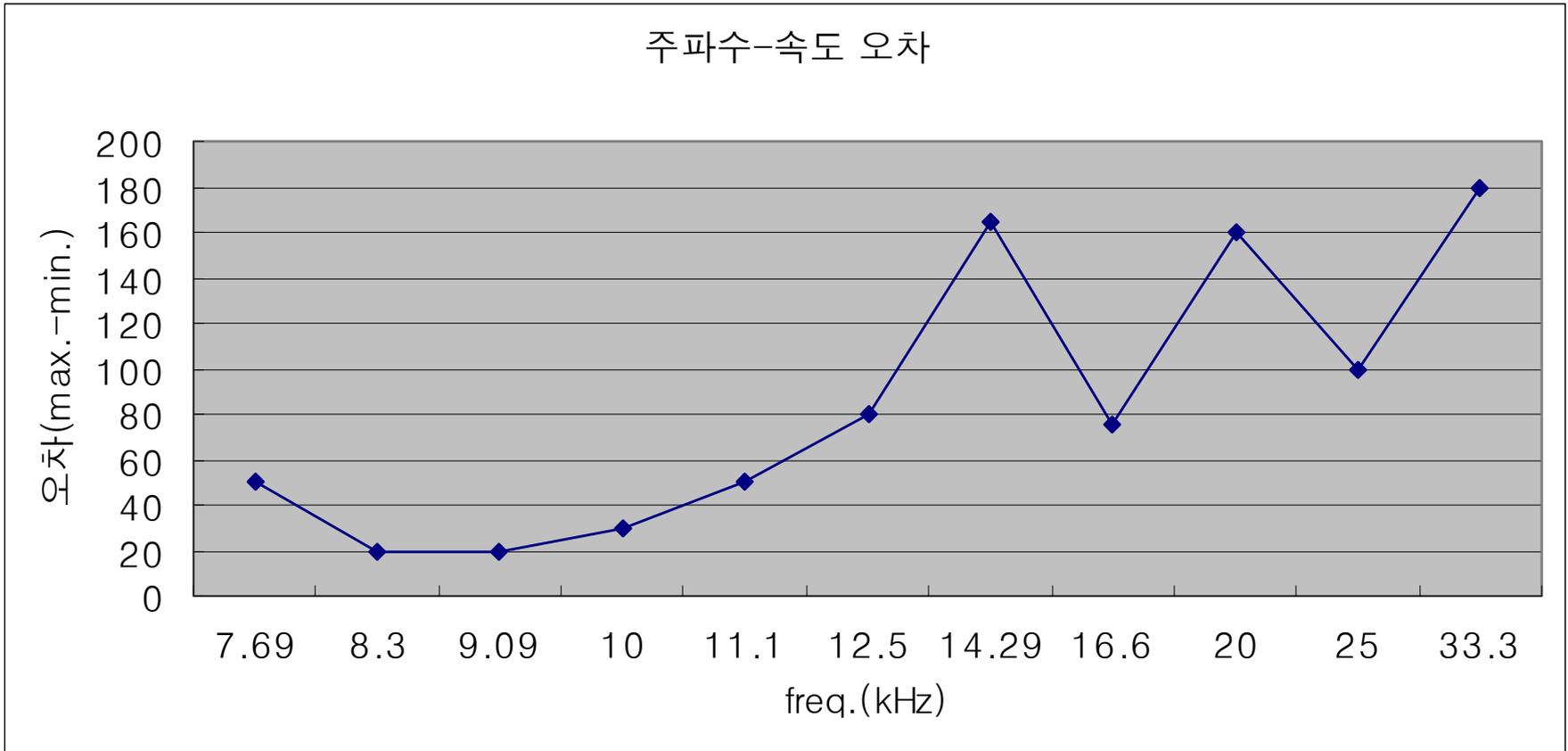
- 8.3kHz



- 6.6kHz



- PWM 주파수와 오차 그래프



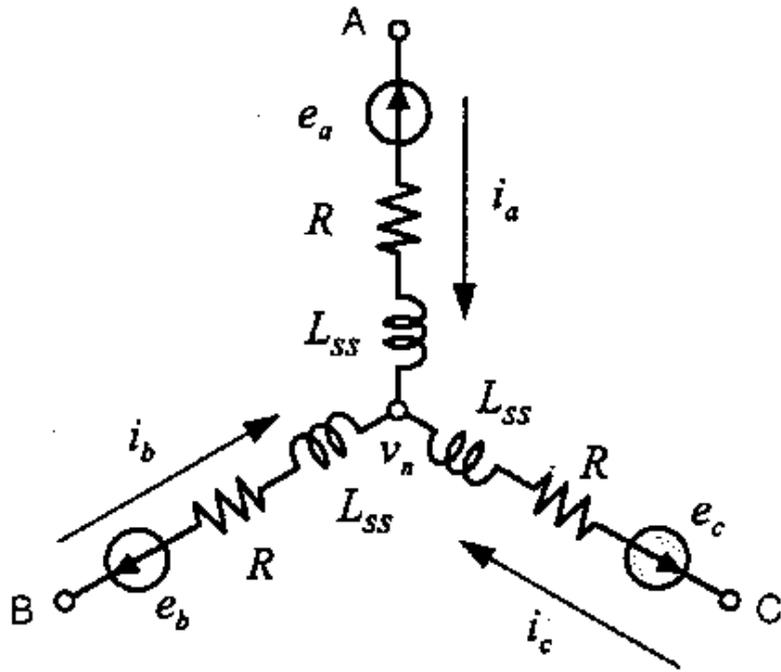
PWM 주파수 변화 방식

- 기존의 속도-duty ratio 루프만으로는 PWM의 overshoot에 의한 속도 오차를 제어하는데 한계가 있다.
- 속도-PWM 주파수 루프를 추가하여 최적의 속도 오차를 만족시킬 수 있다.

이론적 해석 방법

- 3상 Y결선 모터의 회로방정식
- Simulink를 이용한 bldc motor model 구현
- 제어 시스템과 결합된 motor driver의 시뮬레이션 실험
- Overshoot와 주파수변화를 이용한 해석

- 회로 방정식



Y-connected phase winding

$$v_{abc} = r_s i_{abc} + p \lambda_{abc}$$

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{abc} = L_s i_{abc} + p \lambda'_m$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

– From Faraday's Law

$$\frac{d}{dt} \lambda'_m = e_{abc} = [e_a \ e_b \ e_c]^T$$

– Mutual inductance

$$L_{ij} = L_{ss} \cos \theta \Big|_{\theta=2\pi/3} = -0.5L_{ss} \quad i, j = a, b, c (i \neq j)$$

– 공극 일정, 누설 자속 무시

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ss} & -0.5L_{ss} & -0.5L_{ss} \\ -0.5L_{ss} & L_{ss} & -0.5L_{ss} \\ -0.5L_{ss} & -0.5L_{ss} & L_{ss} \end{bmatrix}$$

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

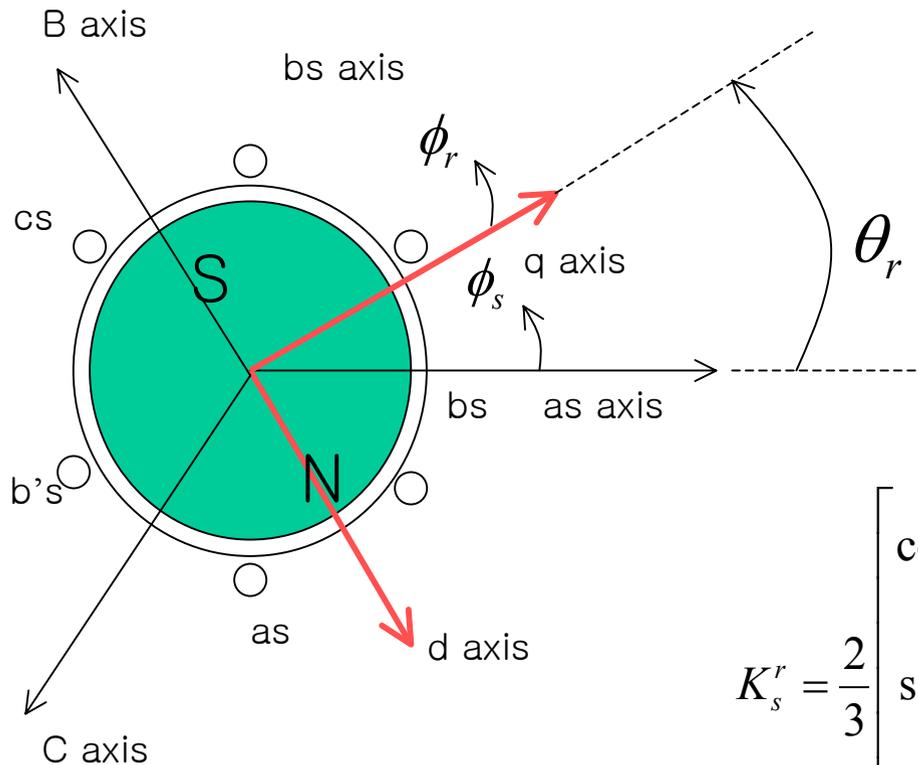
- 회로 방정식 ★

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.5L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 1.5L_{ss} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

- electromagnetic torque

$$T_e = \frac{P}{2} \lambda'_m \left[\left(i_{as} - \frac{1}{2} i_{bs} - \frac{1}{2} i_{cs} \right) \cos \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{bs} - i_{cs}) \sin \theta_r \right]$$

- Rotor Reference Frame (d-q frame)



$$\phi_s = \theta_r + \phi_r$$

$$f_{qd0s}^r = K_s^r f_{abcs}$$

$$\left(K_s^r\right)^{-1} f_{qd0s}^r = f_{abcs}$$

$$K_s^r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin \theta_r & \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad \Longrightarrow \quad (K_s^r)^{-1} f_{qd0s}^r = f_{abcs}$$

$$v_{qd0s}^r = r_s i_{qd0s}^r + \omega_r \lambda_{dqs}^r + p \lambda_{qd0s}^r$$

$$\omega_r = \begin{bmatrix} 0 & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{qd0s}^r = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \lambda_m^r \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$v_{qs}^r = r_s i_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r + p \lambda_{qs}^r$$

$$\lambda_{qs}^r = L_{ss} i_{qs}^r$$

$$v_{ds}^r = r_s i_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r + p \lambda_{ds}^r$$

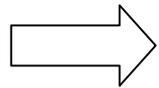
$$\lambda_{ds}^r = L_{ss} i_{ds}^r + \lambda_m^r$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s}$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_e) & \cos\left(\gamma_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\gamma_e) & \sin\left(\gamma_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\gamma_e - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \star$$

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r + T_L$$



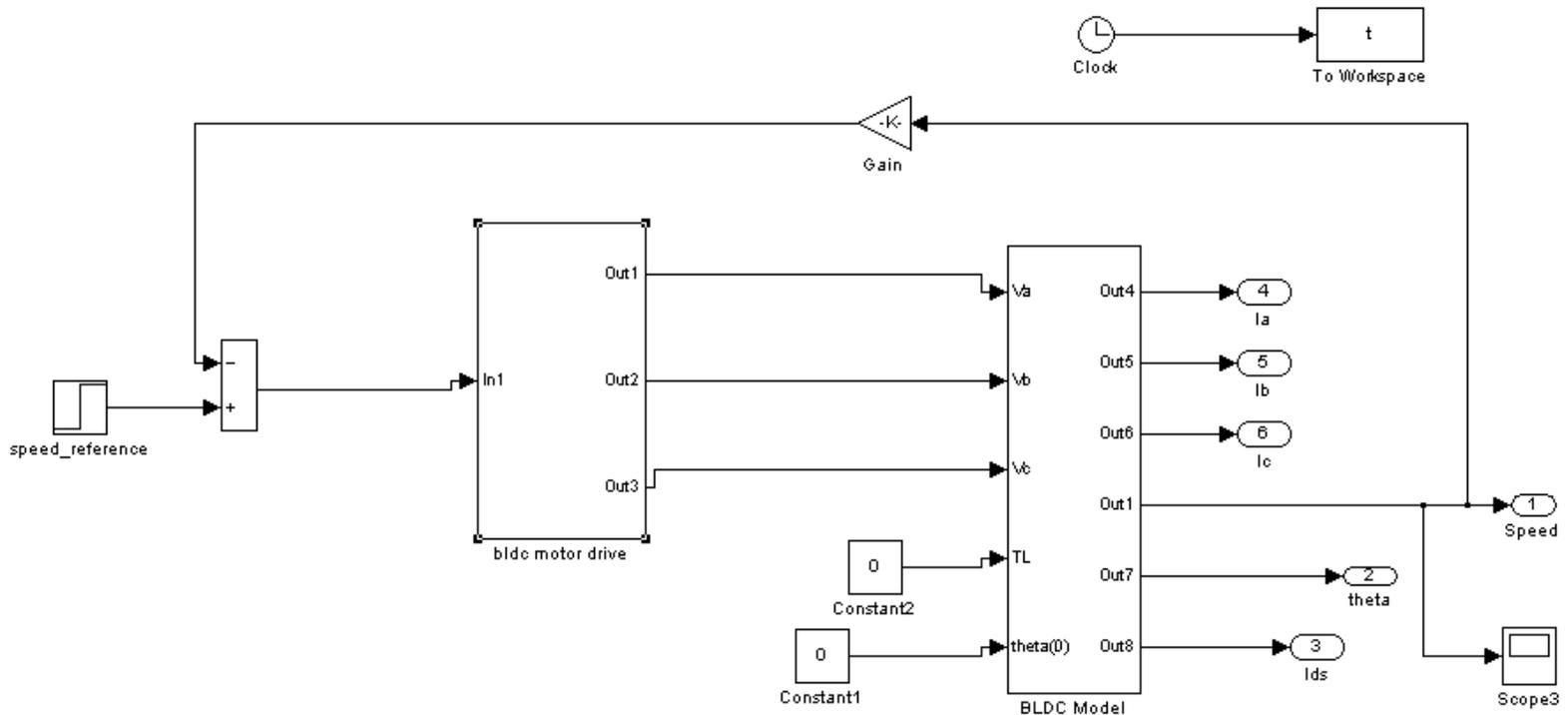
$$\mathbf{B}_m \approx 0,$$

$$\omega_r = \frac{P}{2} \frac{1}{J} \int (T_e - T_L)$$

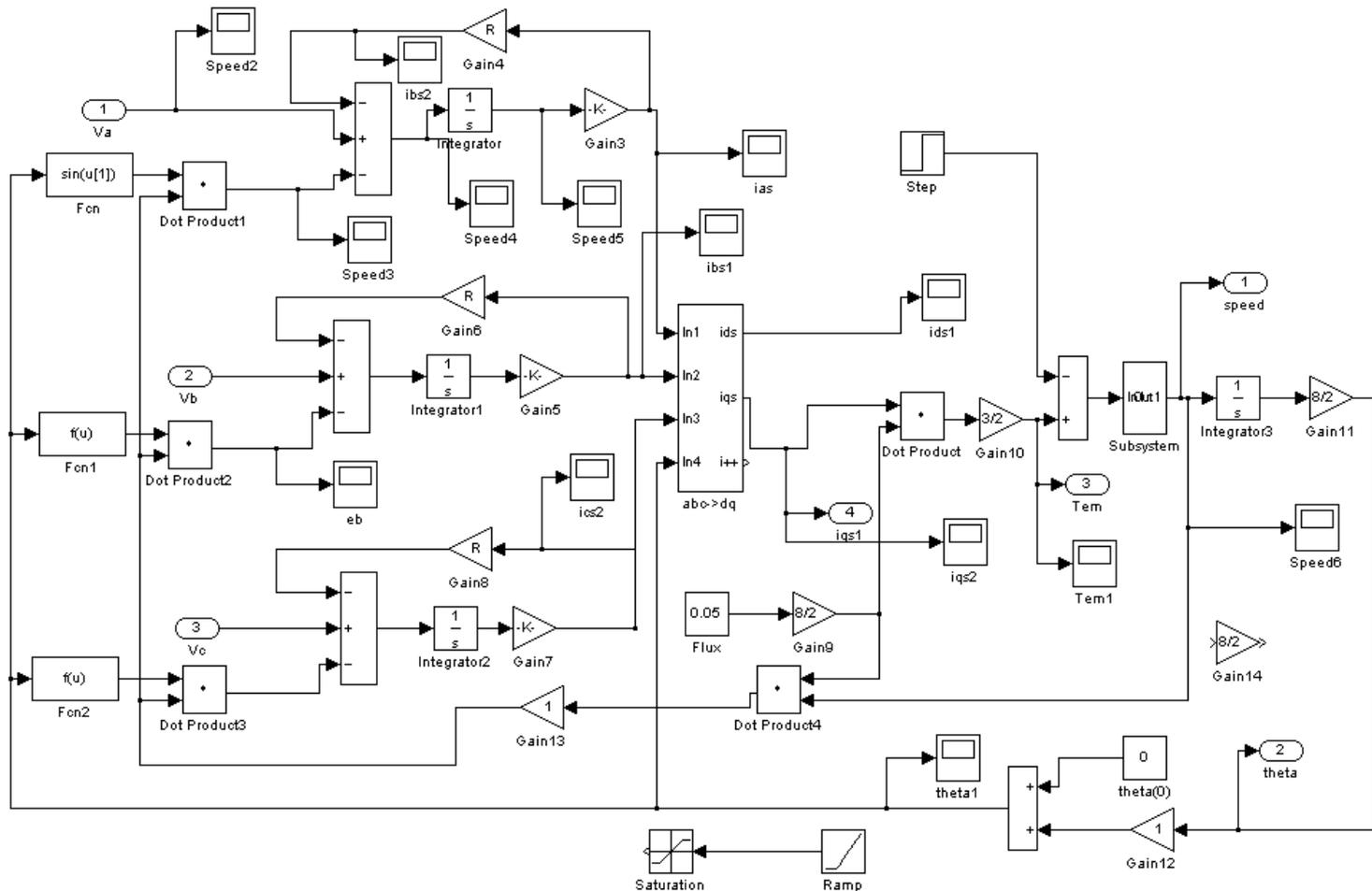
$$\theta_r = \int \omega_r$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_m^r i_{qs}^r \quad \star$$

- simulink를 이용한 motor drive 모델링



• BLDC Motor Model
$$v_x = Ri_x + 1.5L_{ss} \frac{di_x}{dt} + e_a$$



- Test

From bldc motor model,

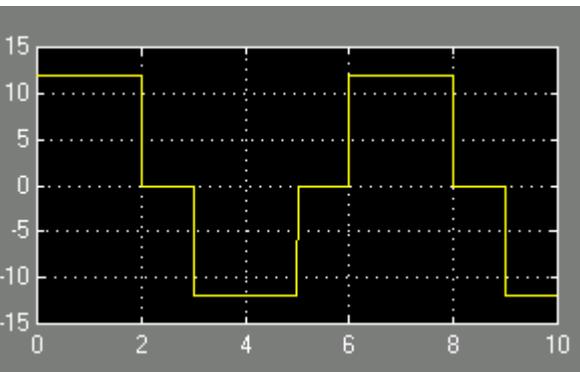
$$R = 2.8(\text{ohm})$$

$$L = 2.0\text{mH}$$

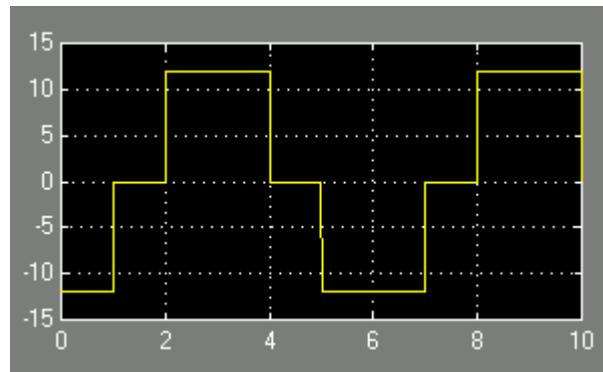
$$J = 2.208 \cdot 10^{(-8)} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

-입력 전압(V_a , V_b , V_c) : AB-AC-BC-BA-CA-CB

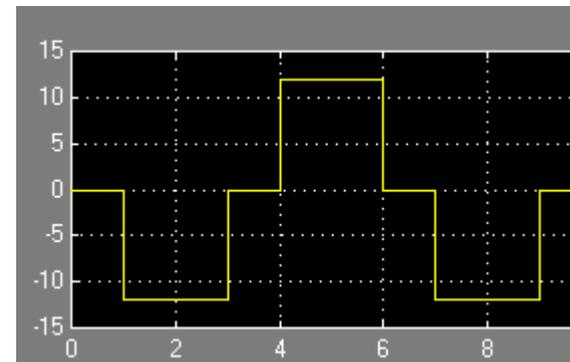
V_a



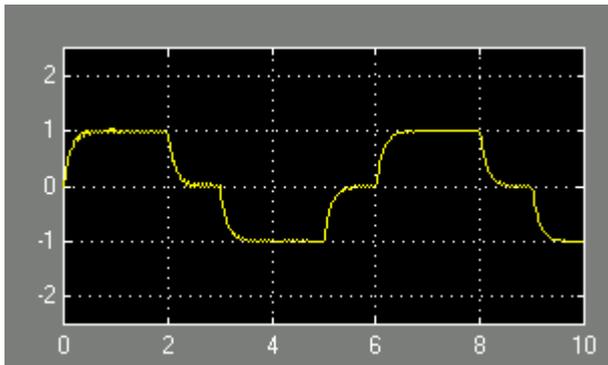
V_b



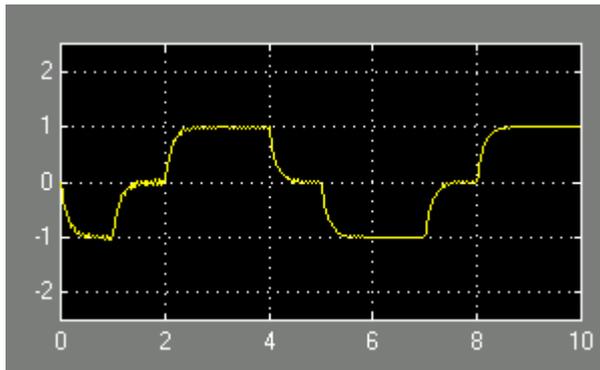
V_c



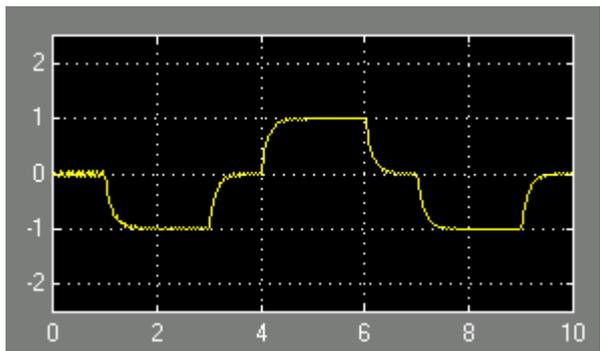
la



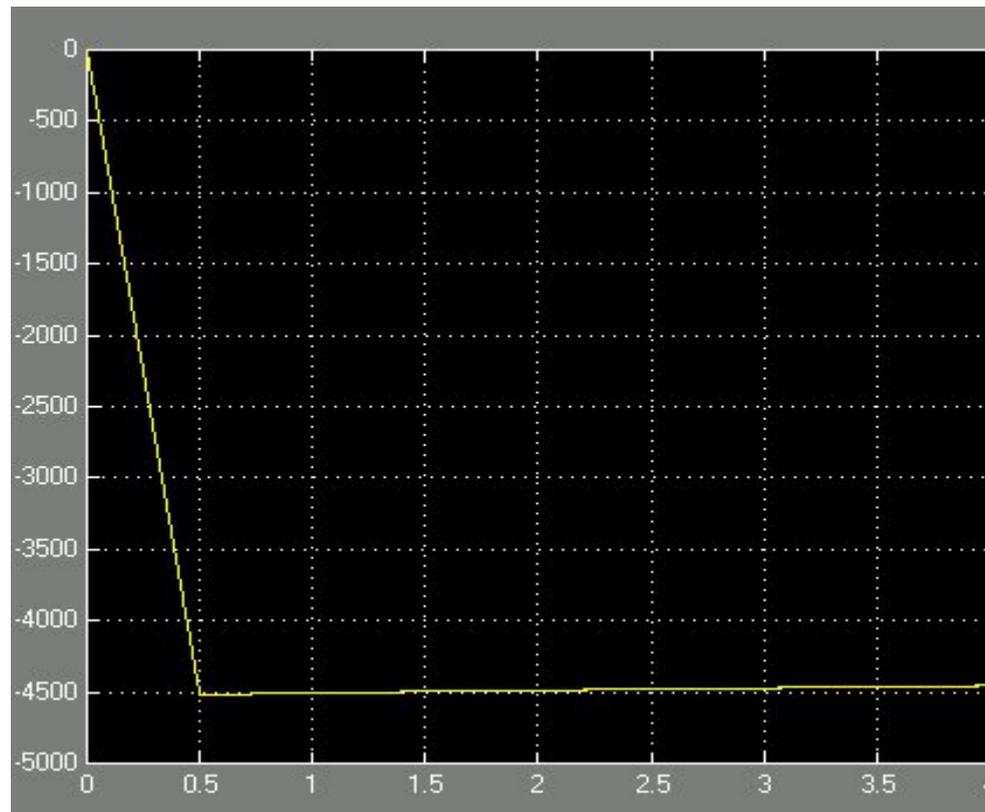
lb



lc



speed



결론

- PWM주파수에 따른 overshoot가 속도에 미치는 영향을 알 수 있다.
- 기준속도에 따라 속도의 오차를 최소로 줄일 수 있는 PWM주파수의 존재를 알 수 있다.
- Simulink 모델링을 이용한 bldc 모터의 구동을 시뮬레이션 할 수 있다.

향후 과제

- 제한된 함수의 simulink에서 PWM의 발생적 문제를 고려한 신호 구현
- 시뮬레이션을 통한 duty ratio와 주파수의 제어 루프의 효율성 검증
- Motor drive의 전기적 회로 구현