

# パワーエレクトロニクスシステムの 基礎と応用

～ 実践 システム設計・モデリング技術 ～



長崎大学  
NAGASAKI UNIVERSITY

長崎大学大学院 工学研究科

電気・情報科学分野

准教授 阿部 貴志



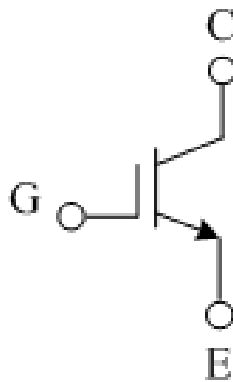
# 講義概要

- パワーエレクトロニクスの概要
- 直流－直流変換技術と直流電動機への応用
  - 降圧形, 昇圧形, 双方向チョッパの原理
  - 直流電動機の原理
  - 直流ドライブシステムと制御
- 直流－交流変換技術と交流電動機への応用
  - 単相, 三相インバータ, PWM制御法の原理
  - 永久磁石形同期電動機の原理
  - 交流ドライブシステムと制御

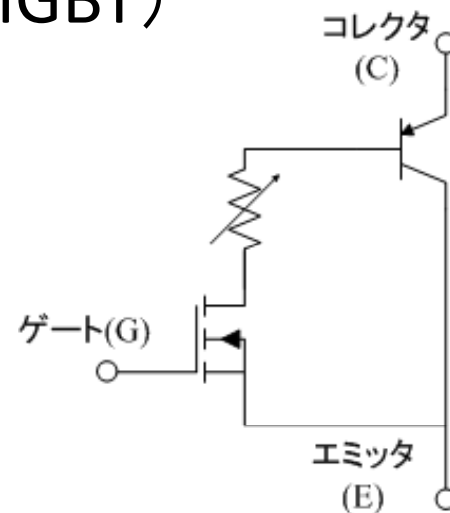


# パワーエレの基礎

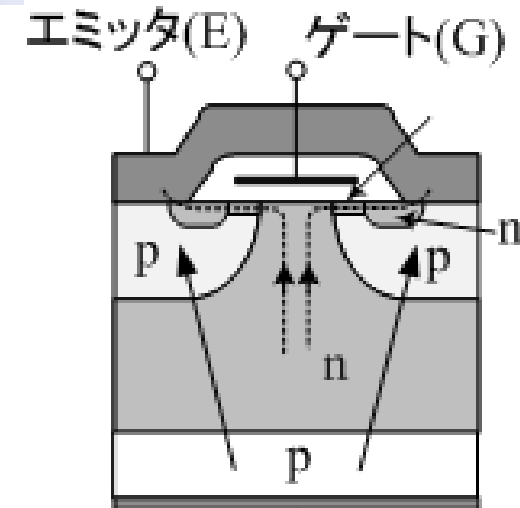
## スイッチングデバイス (IGBT)



nチャネル形IGBT



等価回路



コレクタ(C)  
構造概略図

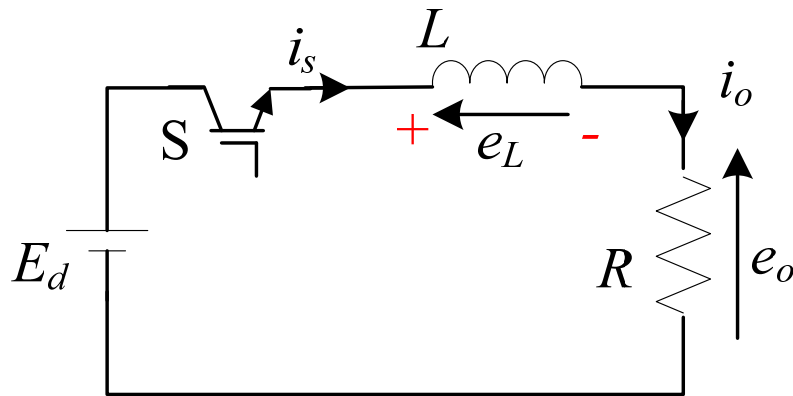
- ・バイポーラトランジスタとMOSFETを1チップ上に複合した素子。
- ・nチャネル形において、コレクタに正、エミッタに負の電圧を与え、ゲートにエミッタに対して正電圧を加えるとオン、負(または0)電圧を加えるとオフ。オン時にコレクタ→エミッタと電流が流れる。
- ・電圧制御形であり、駆動電力が小さい。
- ・MOSFETと同様に、高速スイッチングが可能。
- ・トランジスタと同様に、オン抵抗が小さく、低損失、大容量。



# 降圧チョツパの基礎

誘導性負荷

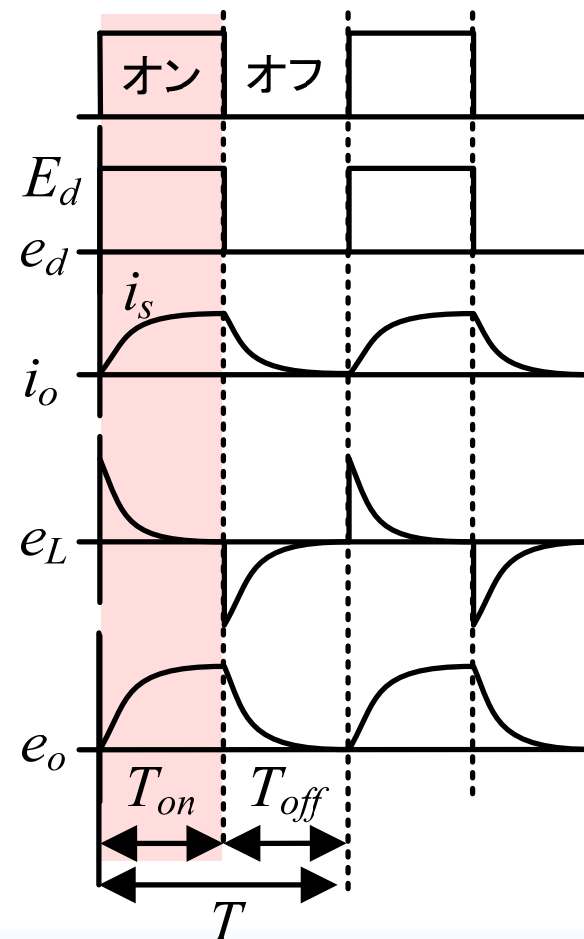
インダクタは電流の変化に対し、起電力を生じ、電流の変化を妨げようとする。



IGBT : オン

電流は増加し、それを妨げようとインダクタに起電力が生じる。この時、以下のようなになる。

$$i_o = i_s, \quad E_d = e_L + e_o$$

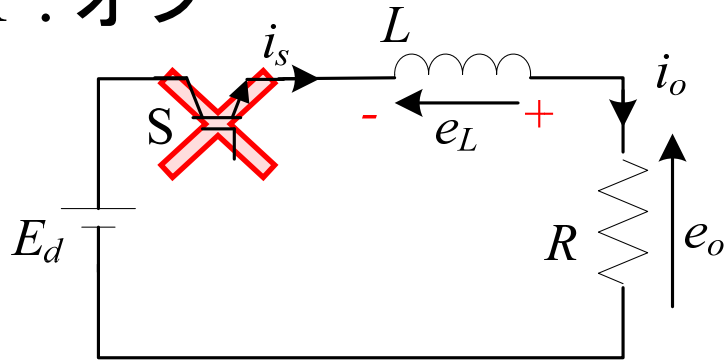




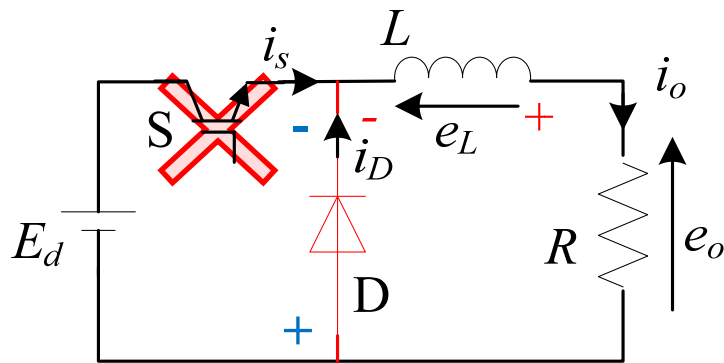
# 降圧チョツパの基礎

IGBT : オフ

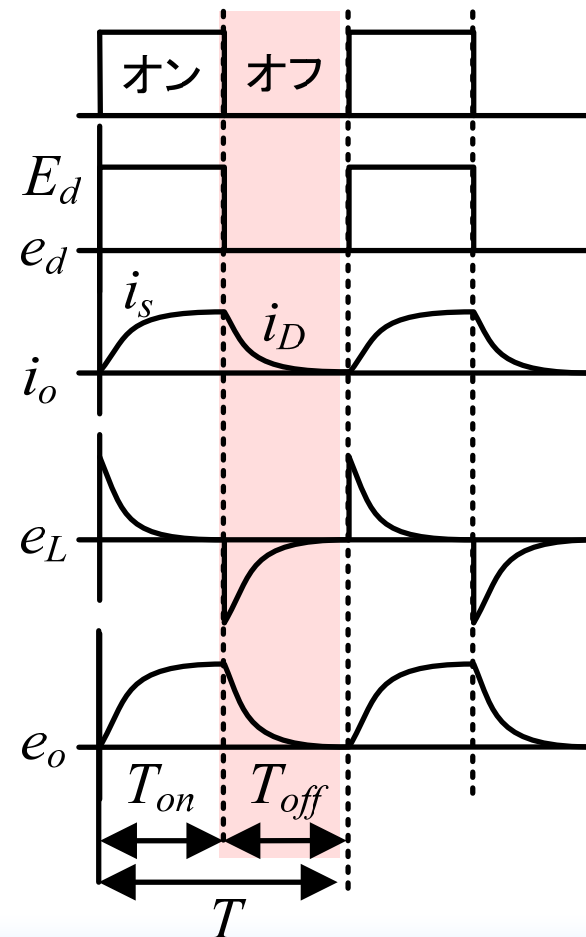
誘導性負荷



電流は減少し、インダクタに起電力が生じ、電流を保持しようとするが、上図では電流の経路が無い。そこでダイオードを挿入。



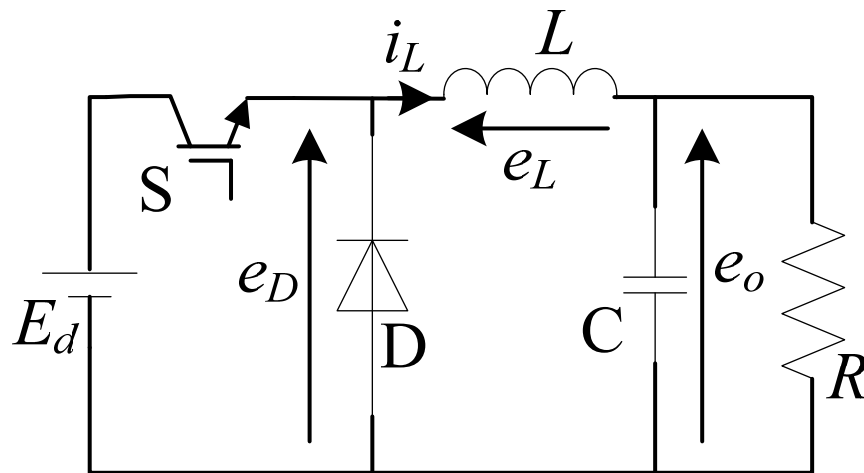
$$i_o = i_D, \quad 0 = e_L + e_o$$



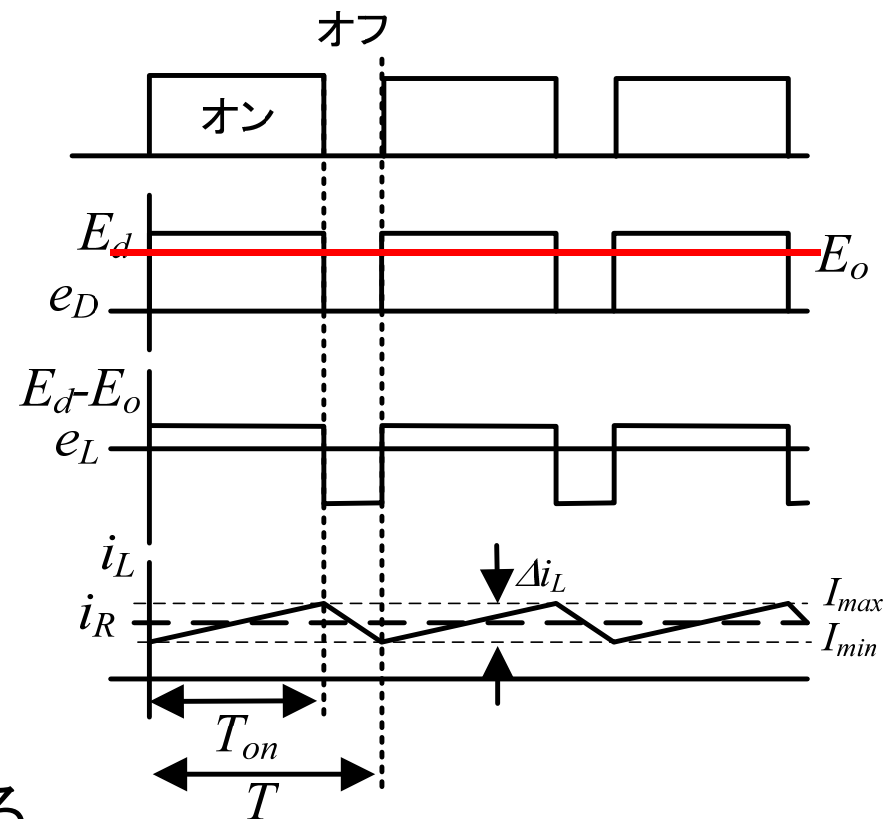


# 降圧チョツパ

実際に使用される回路(出力にコンデンサ)



十分に大きな C を挿入すると、LPFとして作用し、出力電圧  $e_o$  は常に一定値  $E_o = DE_d$  となる。  
また、出力電流は  $i_R = E_o / R$  となる。



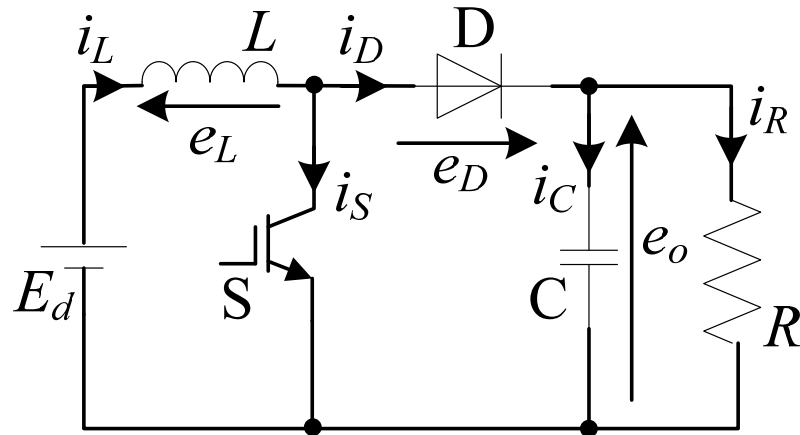
$R = 5\Omega$   $L = 20\mu\text{H}$ ,  $C = 100\mu\text{F}$   
 $E_d = 10\text{V}$ ,  $T = 10\mu\text{s}$ ,  $D = 0.75$

$E_o = 7.5\text{V}$ ,  $i_R = 1.5\text{A}$ ,  $\Delta i_L = 0.9375\text{A}$



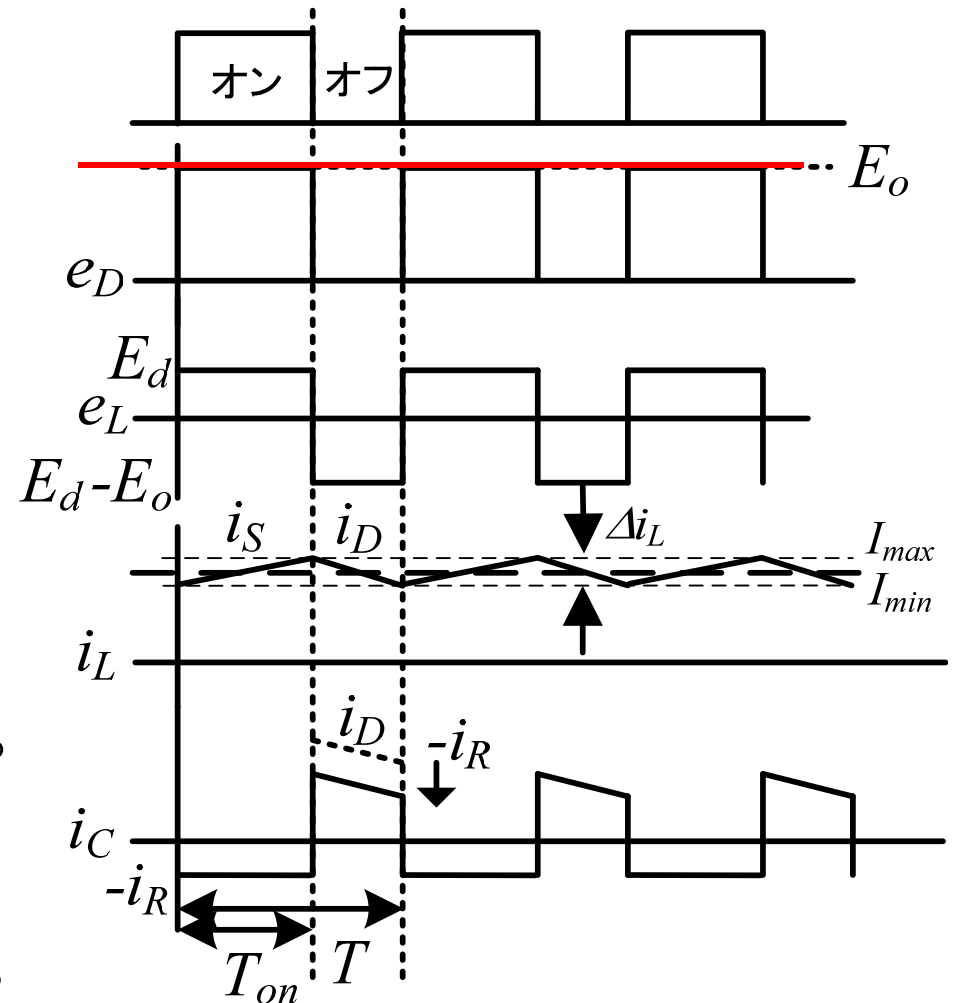
# 昇圧チョツパ

## 昇圧チョツパの実用回路



昇圧形コンバータとも呼ばれ、  
入力より高い出力電圧が得られる。

十分に大きなCを挿入しており、  
出力電圧 $e_o$ は常に一定値 $E_o$ となる。



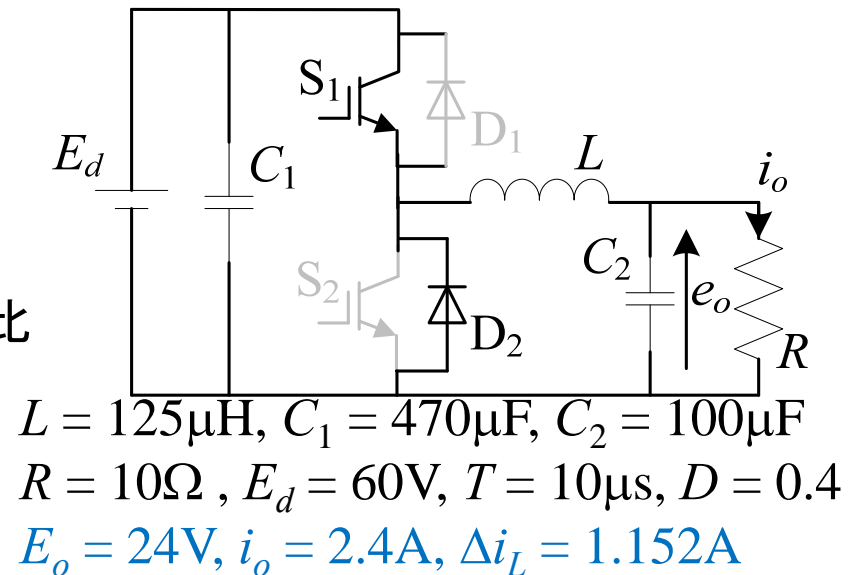
$$R = 10\Omega \quad L = 125\mu\text{H}, \quad C = 470\mu\text{F}$$
$$E_d = 24\text{V}, \quad T = 10\mu\text{s}, \quad D = 0.6$$



## 双方向チョツパ

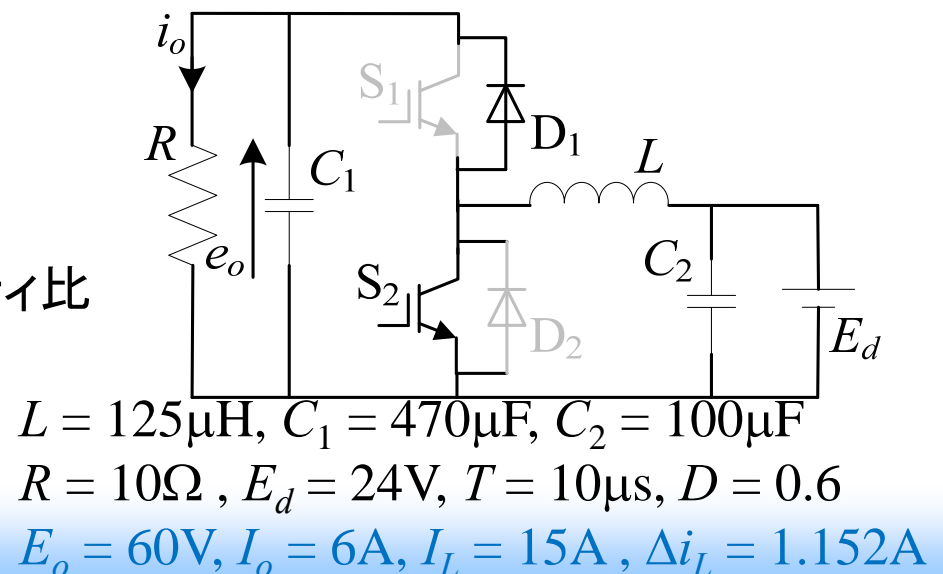
### A→B 降圧チョツパ

Aに電源, Bに負荷を接続。  
 $S_2$ には常にオフ信号を与え,  $S_1$ に対して  
スイッチング信号を供給する。  
 $S_1$ に対するスイッチング信号のデューティ比  
により出力電圧が決まる。



### B→A 昇圧チョツパ

Aに負荷, Bに電源を接続。  
 $S_1$ に常にオフ信号を与え,  $S_2$ に対して  
スイッチング信号を供給する。  
 $S_2$ に対するスイッチング信号のデューティ比  
により出力電圧が決まる。

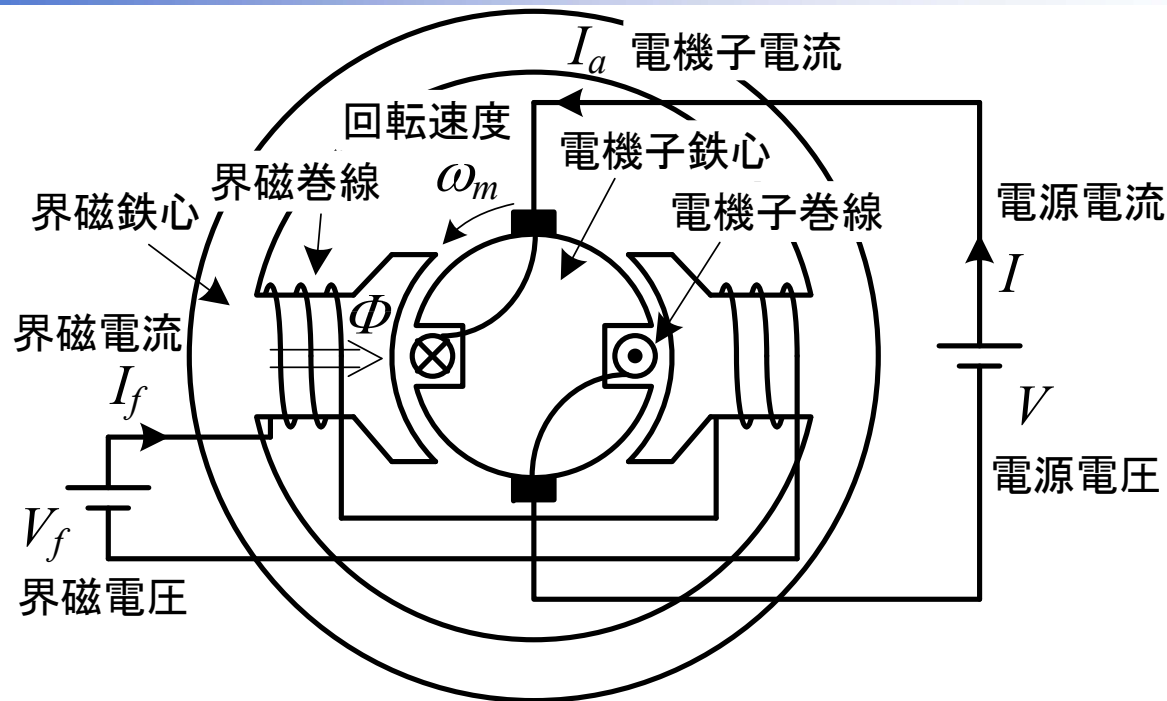






# 直流電動機の原理

他励式を例に



発生トルク

$$T = K_a \Phi I_a = K_t I_a$$

誘導起電力

$$E_0 = K_a \Phi \omega_m = K_e n$$

電圧方程式

$$V = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_0$$

運動方程式

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L$$

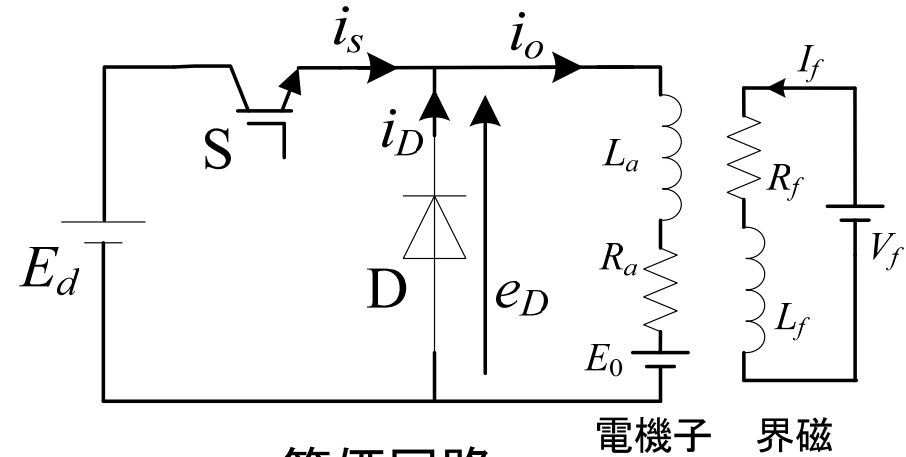
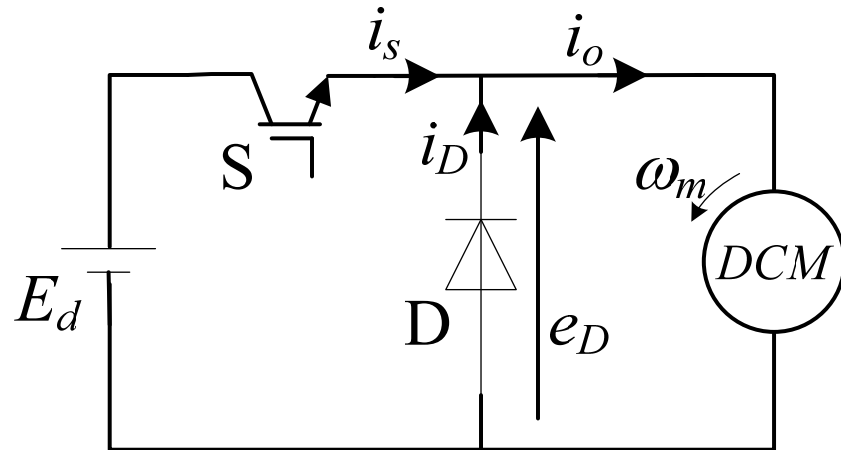
ここで、 $K_a = pN_a = pZ / 2\pi a$  ,  
 $K_t = 2\pi K_e / 60$  ,  $p$ :極対数,  $N_a$ :電機子有効巻数,  $Z$ :電機子全導体数,  $a$ :並列回路数,  $n$ :毎分の回転数[rpm],  
 $\omega_m$ :回転角速度[rad/s],  $\Phi$ :1極有効磁束[wb],  $R_a$ :電機子抵抗,  $L_a$ :電機子巻線インダクタンス,  $T_L$ :負荷トルク,  $J$ :慣性モーメント



# 直流ドライブシステム

見本

## 降圧チョッパ+直流電動機



等価回路

電機子 界磁

電動機の時定数  $L_a / R_a$  が十分に大きく、  
 周期  $T$  も早く、電流が連続とする。  
 ダイオード両端電圧の平均値は、

$$E_D = \frac{1}{T} \int_0^T e_D dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^{T_{on}} E_d dt = \frac{T_{on}}{T} E_d = DE_d$$

これを電動機への入力電圧とする。

発生トルク  $T = K_a \Phi I_a = K_t I_a$

誘導起電力  $E_0 = K_a \Phi \omega_m = K_e n$

電圧方程式  $DE_d = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_0$

回転角速度  $\omega_m = \frac{DE_d}{K_a \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \Phi)^2} T_L$



# 直流ドライブシステム

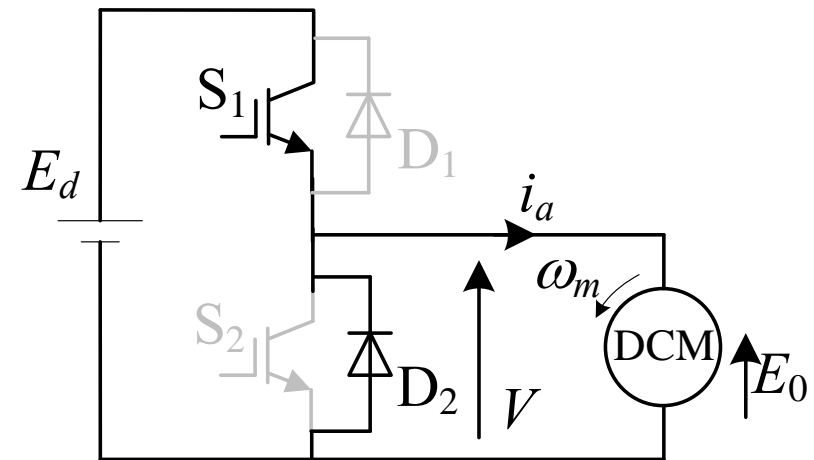
見本

## 第2象限までの運転範囲拡大 双方向チョッパの利用

### 第1象限運転

$S_2$ に常にオフ信号を与え,  $S_1$ に対してスイッチング信号を供給する。  
 $S_1$ に対するスイッチング信号のデューティ比により出力電圧 $V$ が決まる。

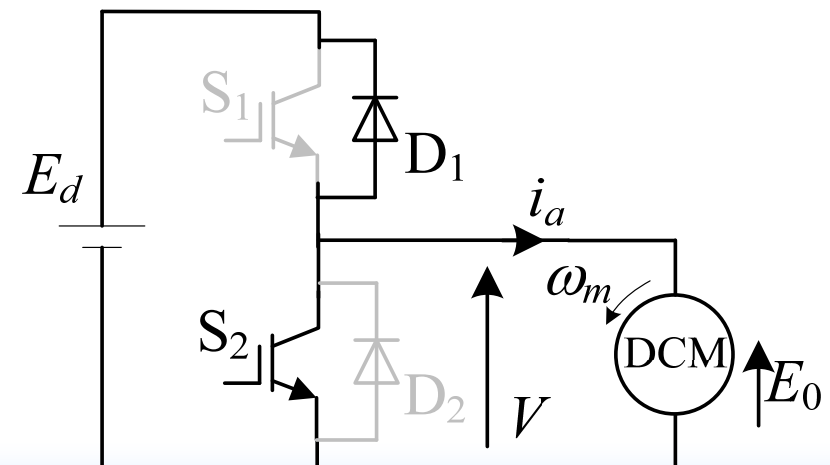
$$i_a > 0, V > E_0 > 0$$



### 第2象限運転

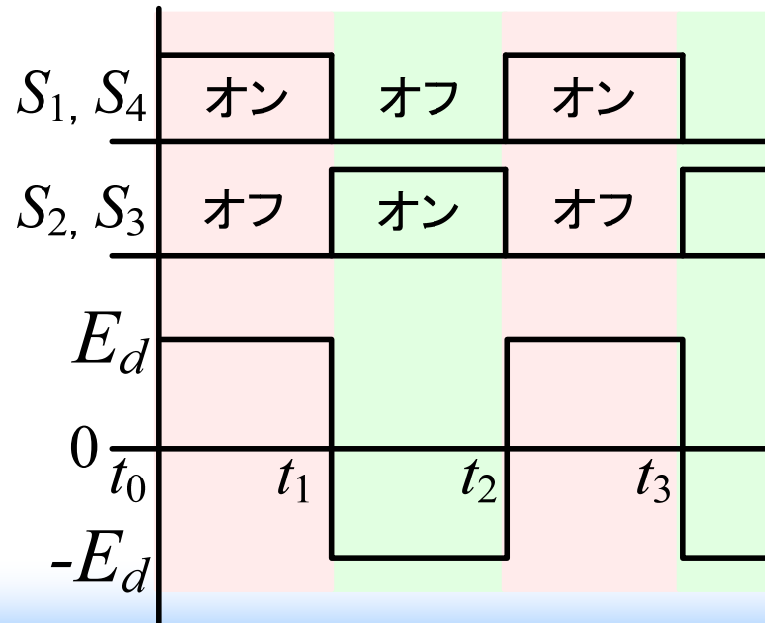
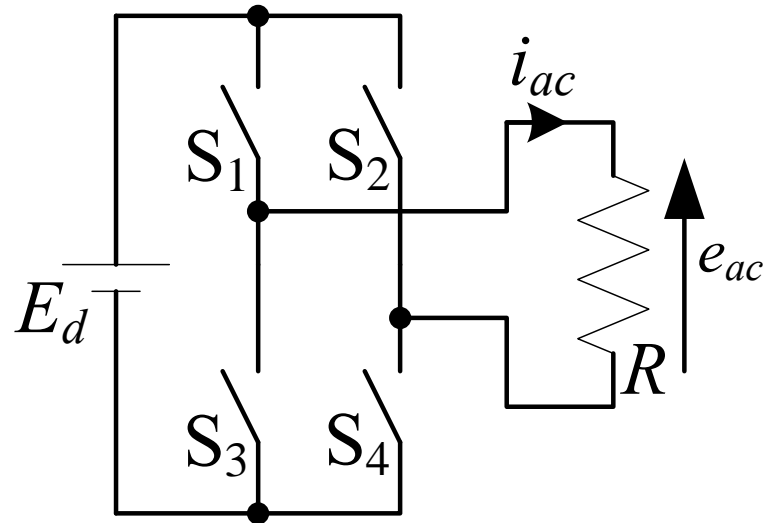
$S_1$ に常にオフ信号を与え,  $S_2$ に対してスイッチング信号を供給する。  
 $S_2$ に対するスイッチング信号のデューティ比により電源  $E_d$  への回生割合が決まる。

$$i_a < 0, E_0 > V > 0$$

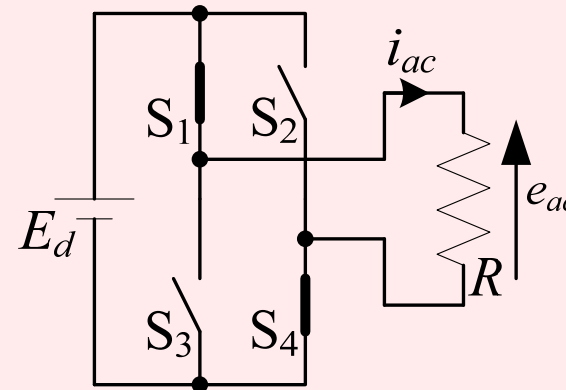




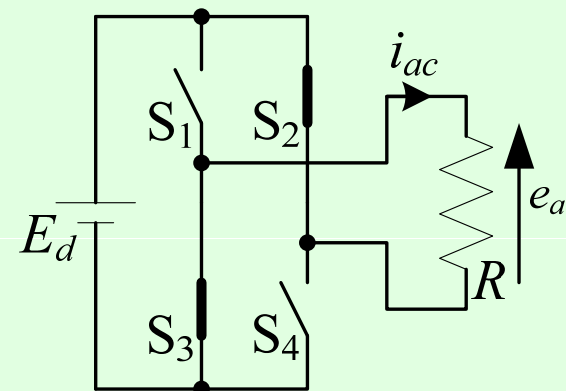
# インバータの基礎



$t_0 \sim t_1$ :  $S_1$ と $S_4$ をオン,  $S_2$ と $S_3$ をオフ  
負荷Rに正の電源電圧  $E_d$

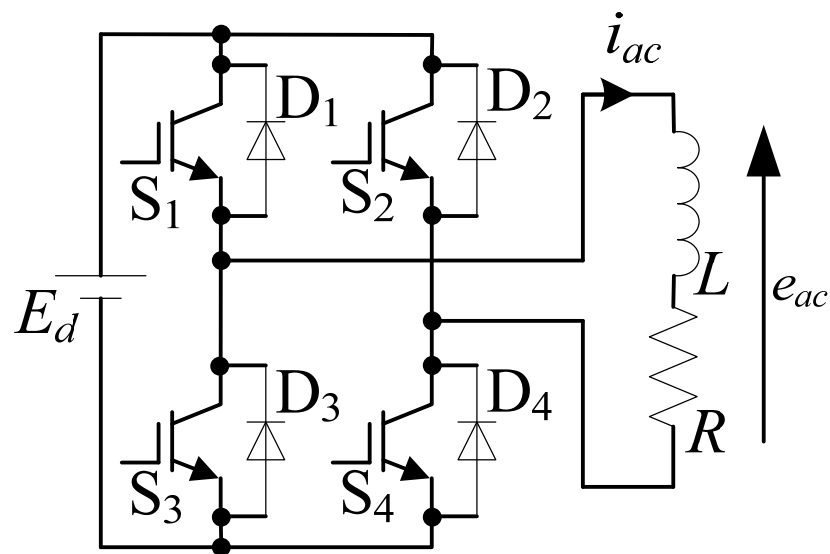


$t_1 \sim t_2$ :  $S_2$ と $S_3$ をオン,  $S_1$ と $S_4$ をオフ  
負荷Rに負の電源電圧  $-E_d$





# 単相電圧形方形波インバータ

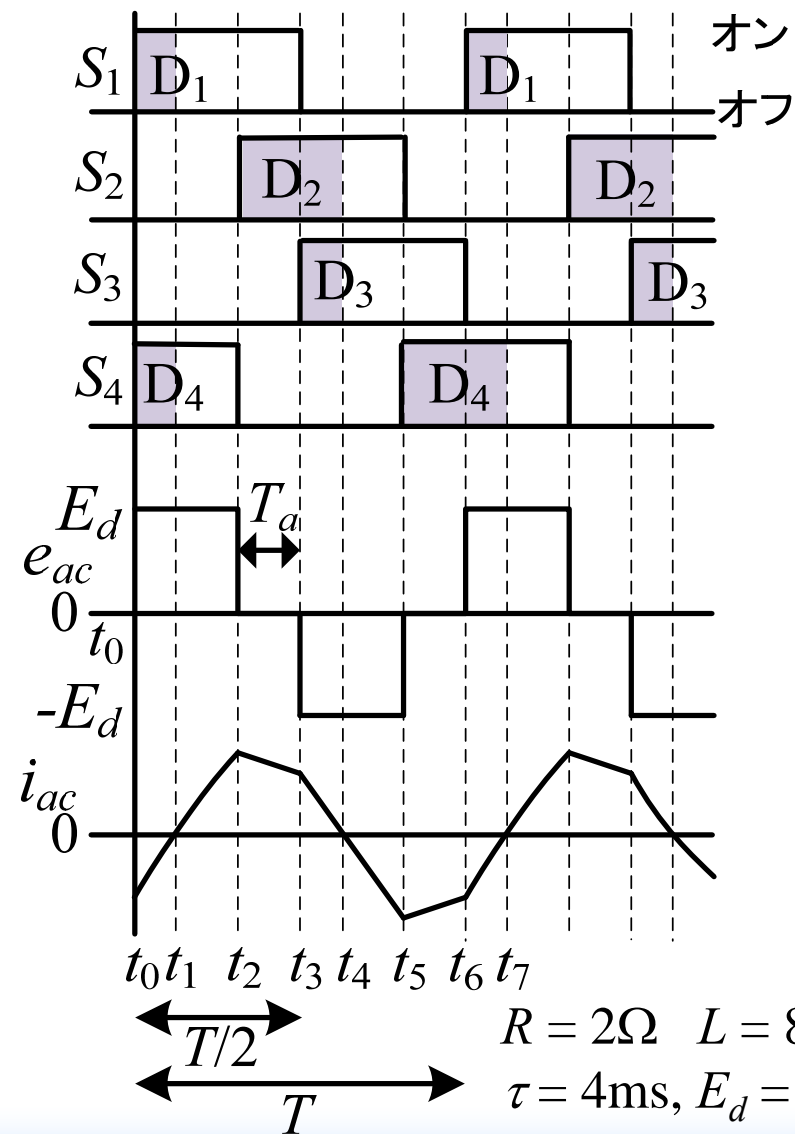


出力電圧実効値

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\beta - \alpha} \int_{\alpha}^{\beta} f(t)^2 dt} = E_d \sqrt{1 - \frac{2T_a}{T}}$$

出力電圧 基本波実効値

$$V_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_d \cos\left(\frac{\pi T_a}{T}\right)$$

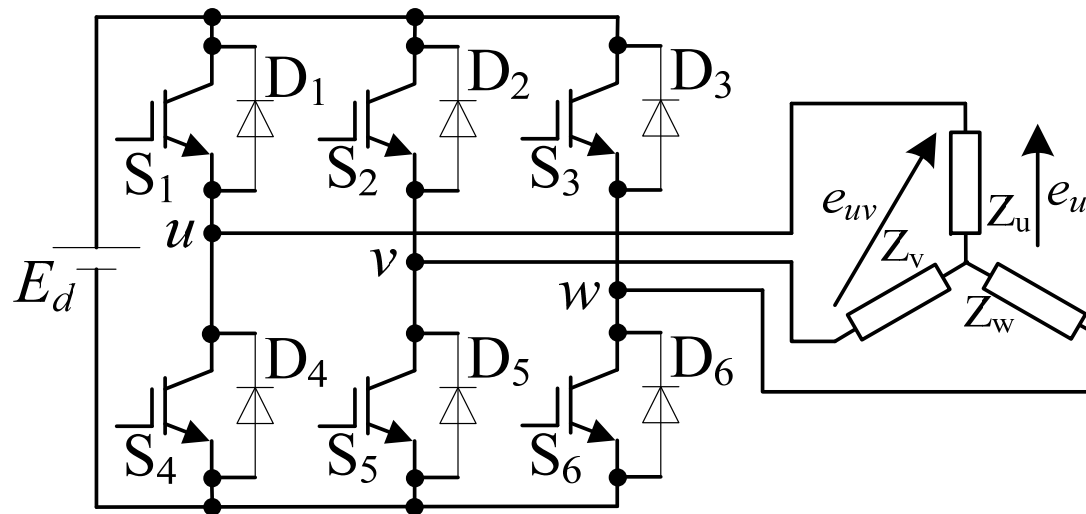


$$R = 2\Omega \quad L = 8\text{mH}, \\ \tau = 4\text{ms}, \quad E_d = 50\text{V}, \\ T = 10\text{ms}, \quad T_a = 2\pi/5$$

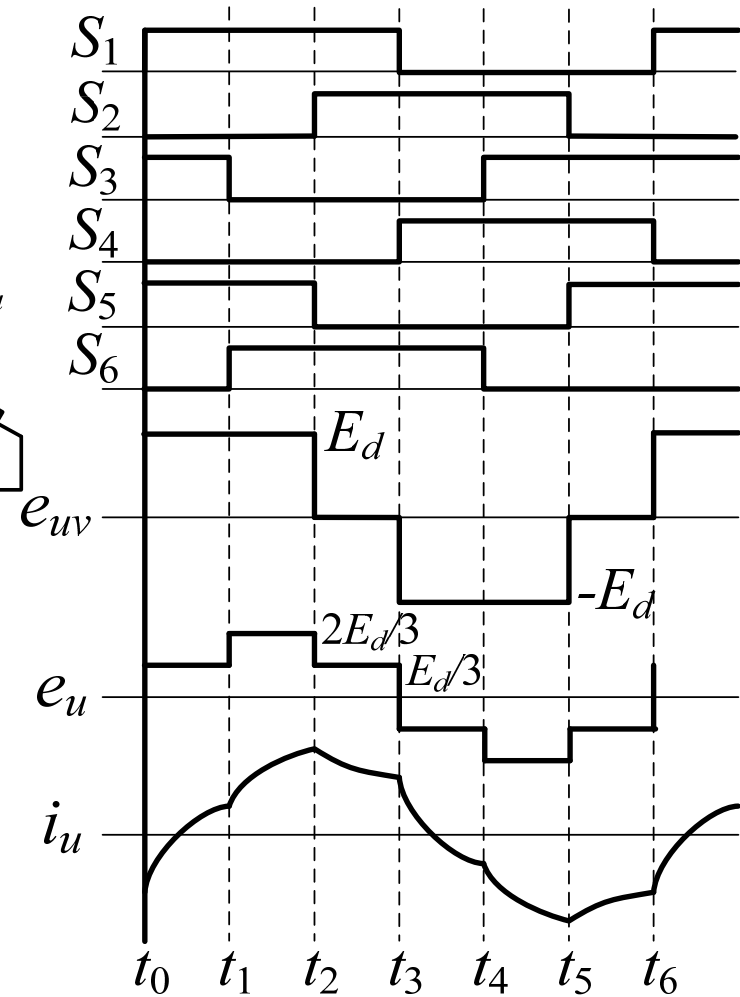


# 三相電圧形方形波インバータ

## 180度通電方形波方式



基本構成のレグを3つ並列に  
接続し, 3相構成とする。  
各スイッチを180度期間オンし,  
各相は120度ずらして点弧する。  
平衡三相負荷が接続。

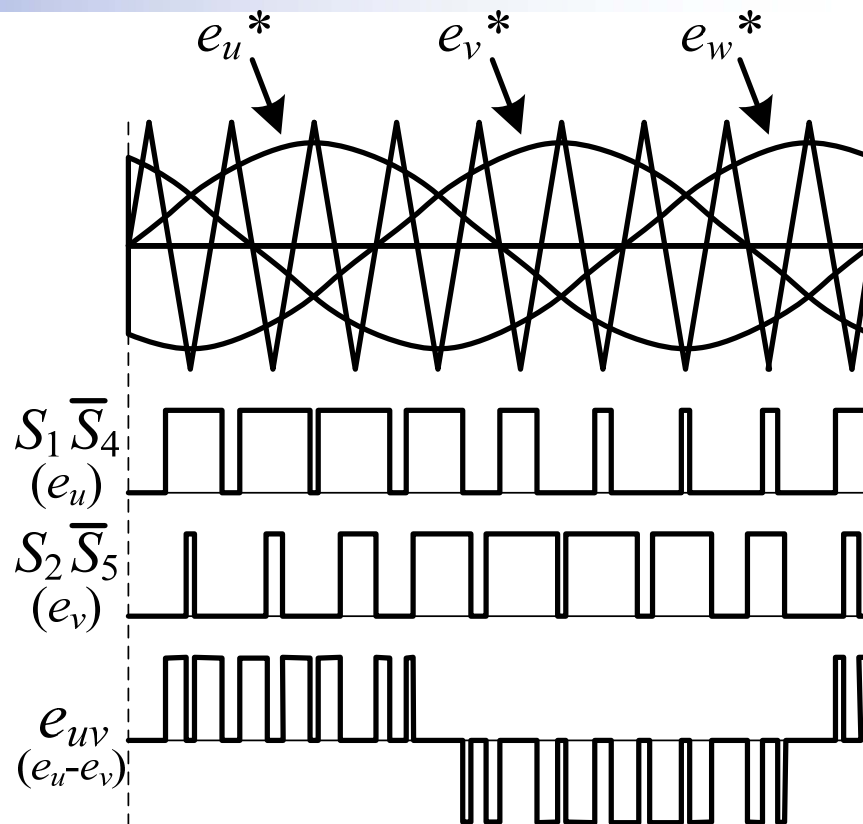
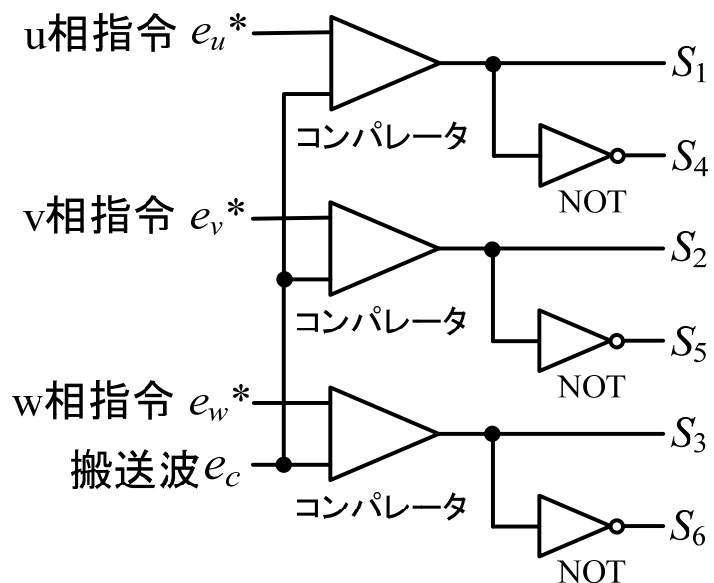
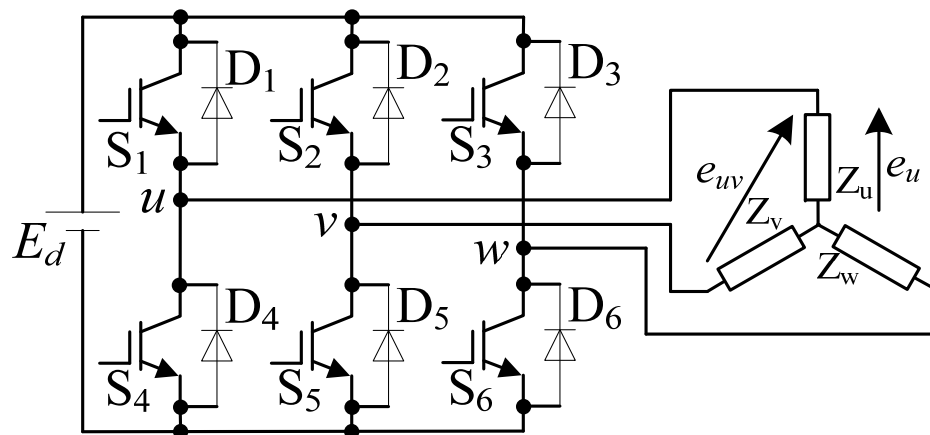


$$R = 2\Omega \quad L = 2\text{mH}, \quad \tau = 1\text{ms}$$

$$E_d = 50\text{V}, \quad T = 10\text{ms}$$



# 三相電圧形正弦波インバータ



指令電圧: 実効値  $V_s = 30\text{V}$ , 周波数  $f_s = 100\text{Hz}$

$$u\text{相指令} = \sqrt{2} V_s / E_d \sin \omega t,$$

$$v\text{相指令} = \sqrt{2} V_s / E_d \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

$$w\text{相指令} = \sqrt{2} V_s / E_d \sin(\omega t - 4\pi/3),$$

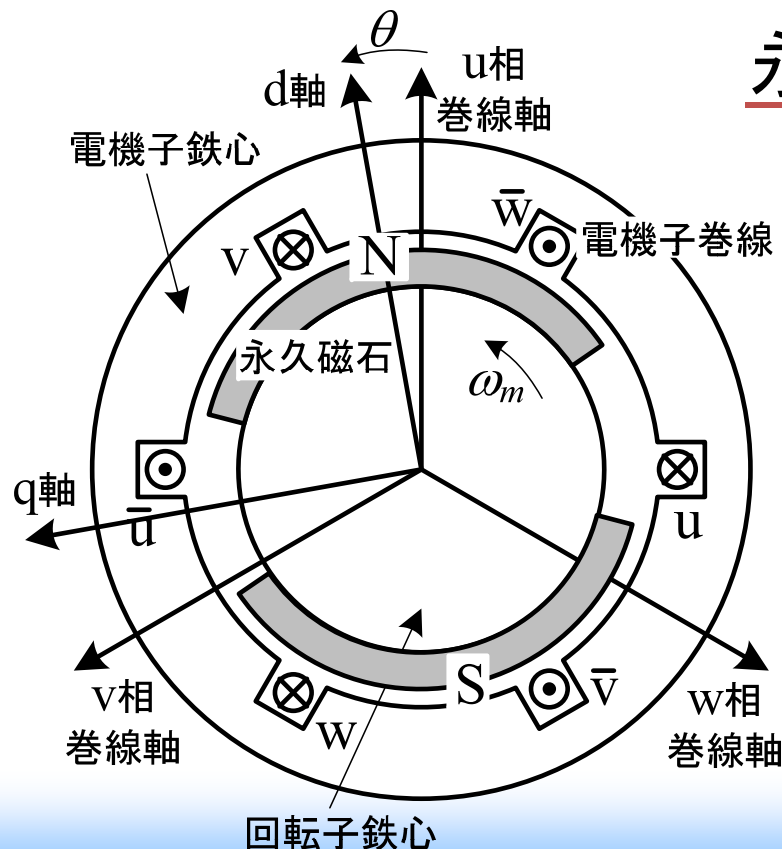
搬送波: 振幅: 1, 周波数  $f_c = 900\text{Hz}$ , 入力  $E_d = 50\text{V}$



# 永久磁石形同期電動機

交流電動機には、誘導電動機と同期電動機があるが、高効率、小型・軽量、制御性能などの理由で、永久磁石形同期電動機が、家電用、工作機器、ロボット、鉄道車両に多く利用され、最近では、自動車用の主機として応用されている。

## 永久磁石形同期電動機の構造



### 1) 電機子

$2\pi/3$ の位相差を持つ三相固定子電機子巻線。平衡三相電機子電流を流し、図のように、各相巻線軸を定義。

### 2) 界磁

永久磁石を持つ回転子。円周方向の磁束密度を正弦波状に工夫。N極の向きをd軸，回転方向90度先をq軸。