

パワーエレクトロニクス講義資料

第12回 三相インバータ

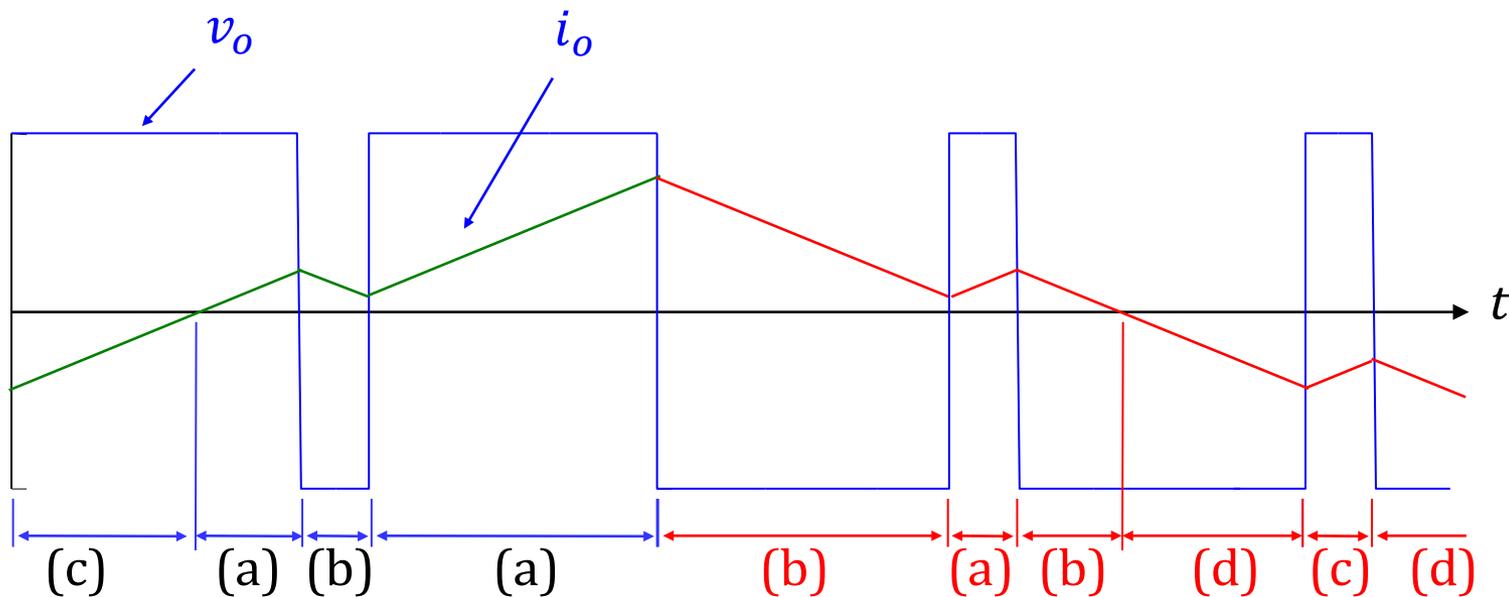
担当：古橋武

furuhashi@nuee.nagoya-u.ac.jp

STEP10 レポート課題(1) 解答

左図のフルブリッジインバータにおいて下図のような交流電圧 v_o が出力されているとして、以下の問いに答えよ。

- (1) 出力電流 i_o の波形を描け。ただし、インバータの負荷はインダクタンス L だけとしてよい。
- (2) インバータに発生している動作モードをそれぞれの区間も明記して示せ。動作モードの詳細はテキスト図10.7を参照せよ。



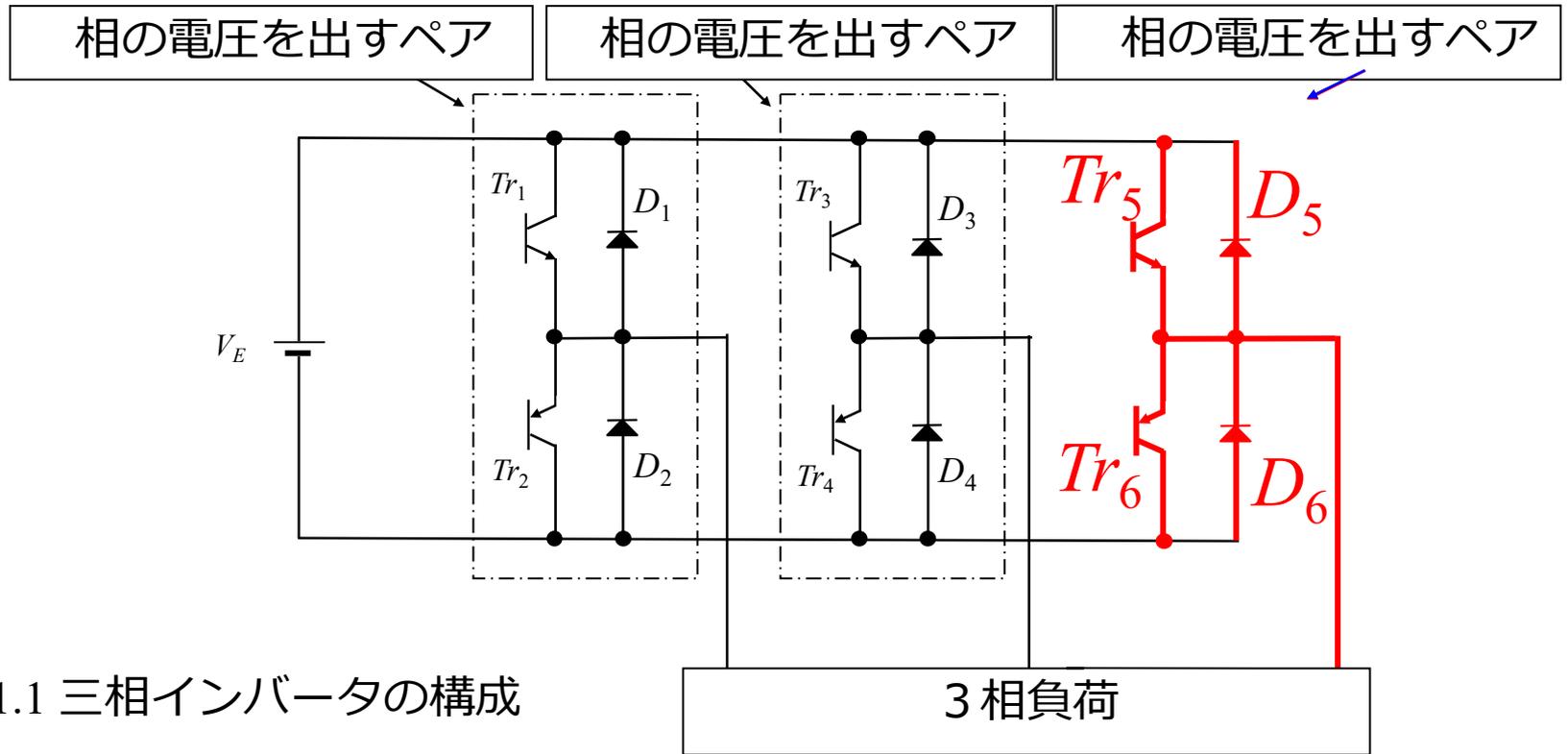
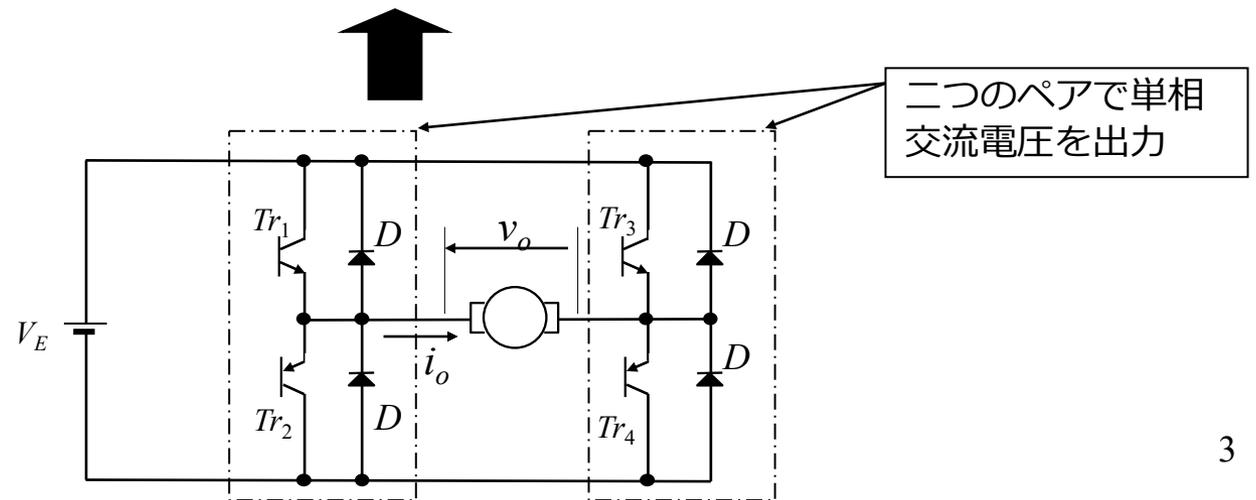


図11.1 三相インバータの構成



U 相の電圧を出すペア

V 相の電圧を出すペア

W 相の電圧を出すペア

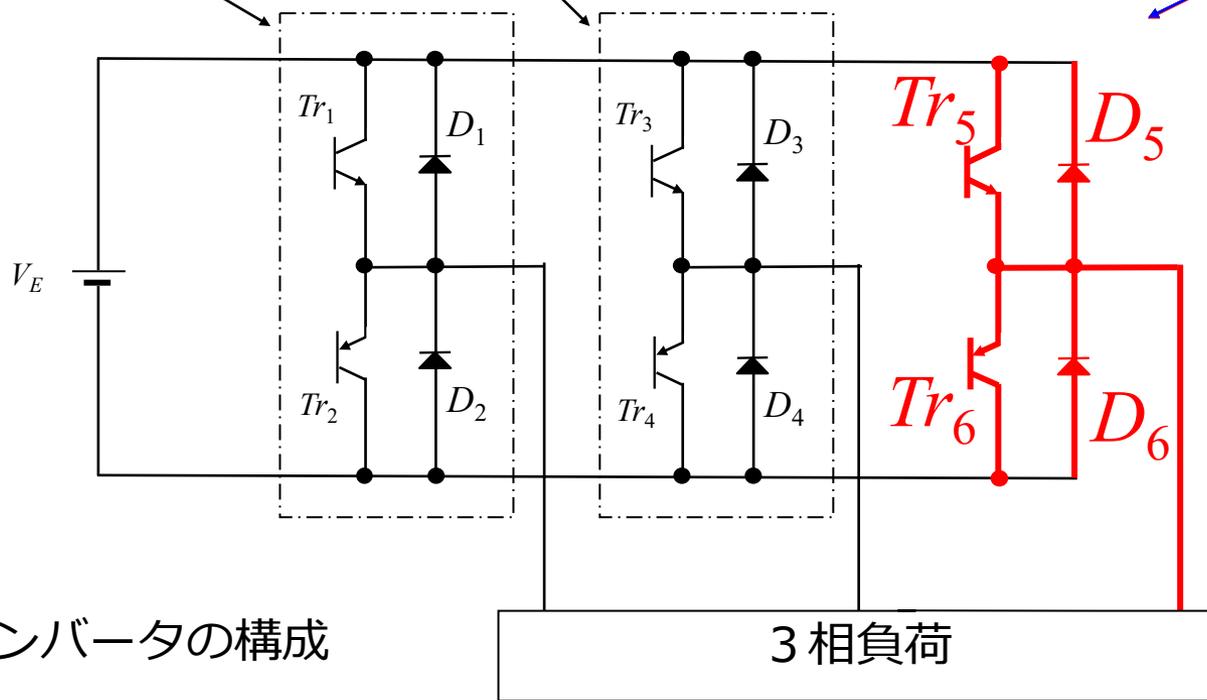
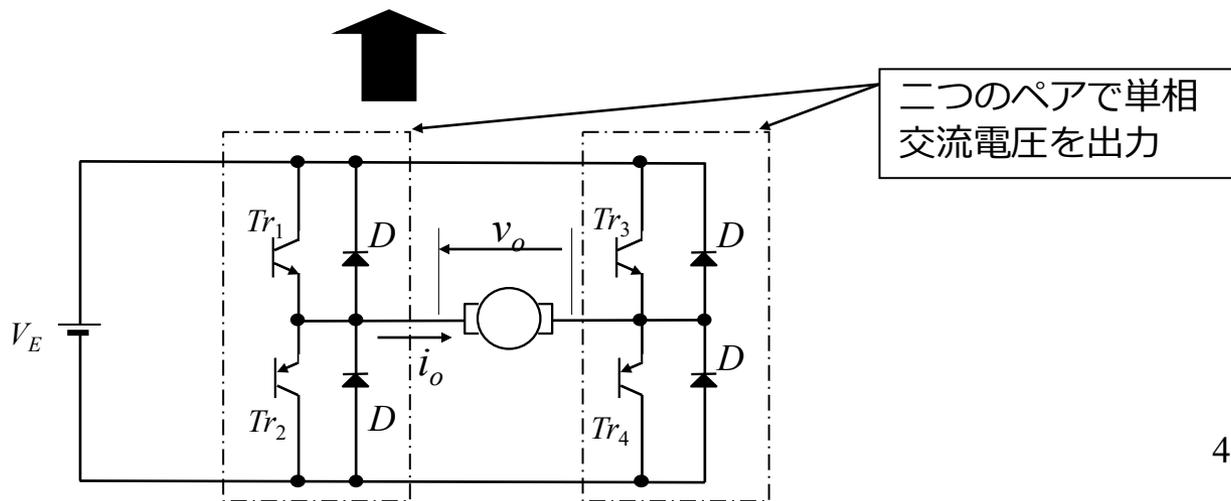
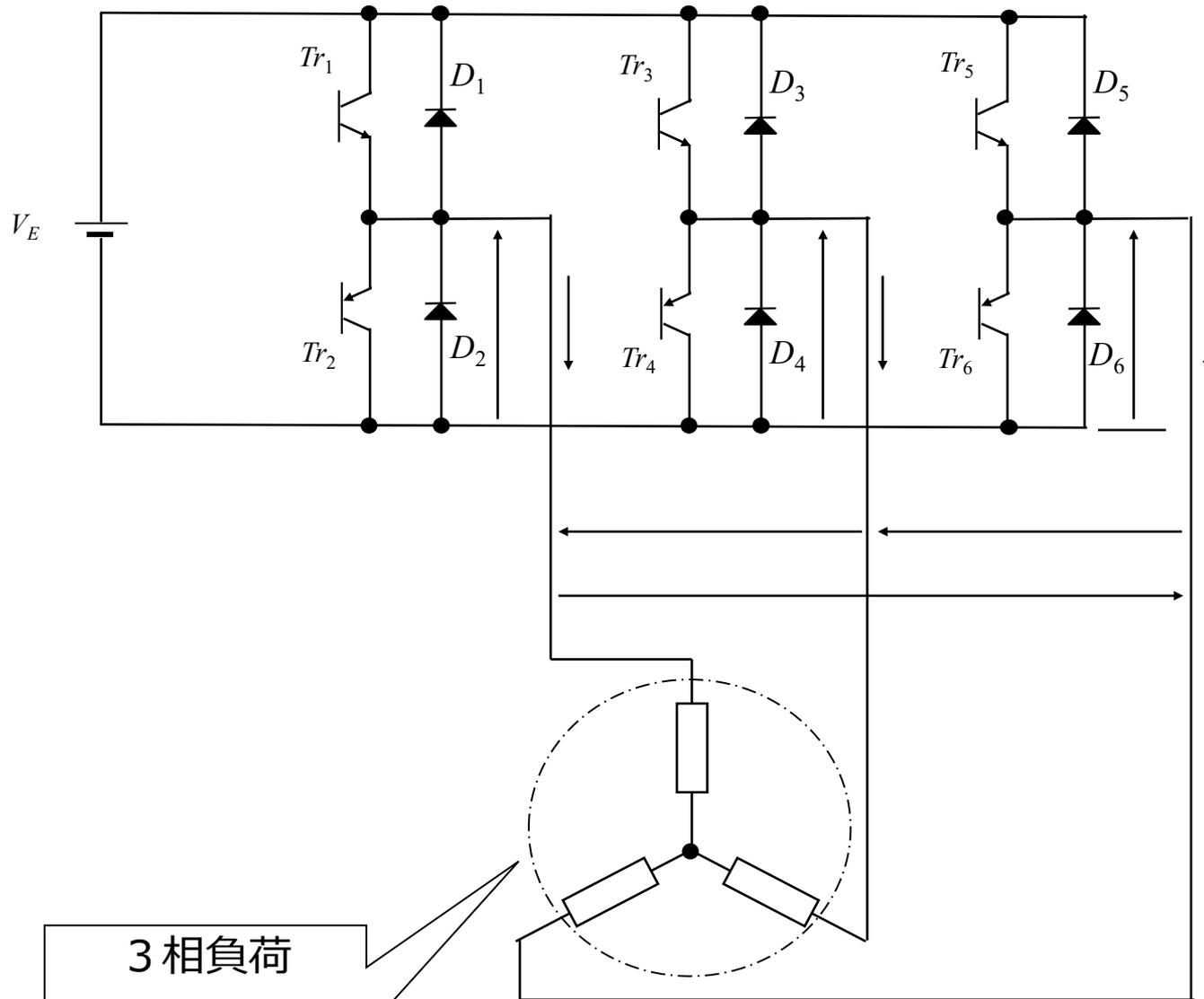


図11.1 三相インバータの構成





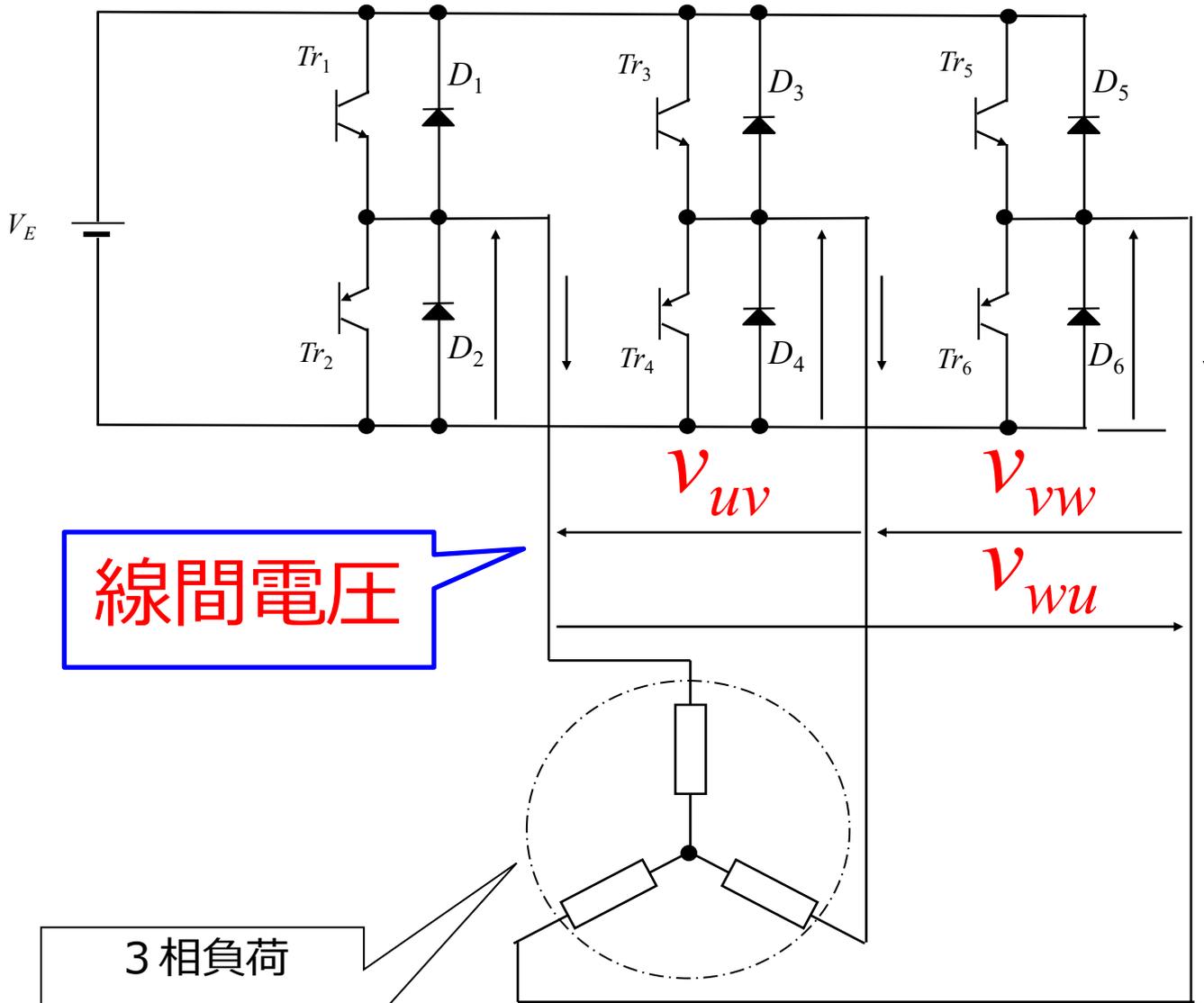
$$v_{uv} = v_u - v_v$$

$$v_{vw} = v_v - v_w$$

$$v_{wu} = v_w - v_u$$

3相負荷
例えば誘導
モータ

3相インバータ



線間電圧

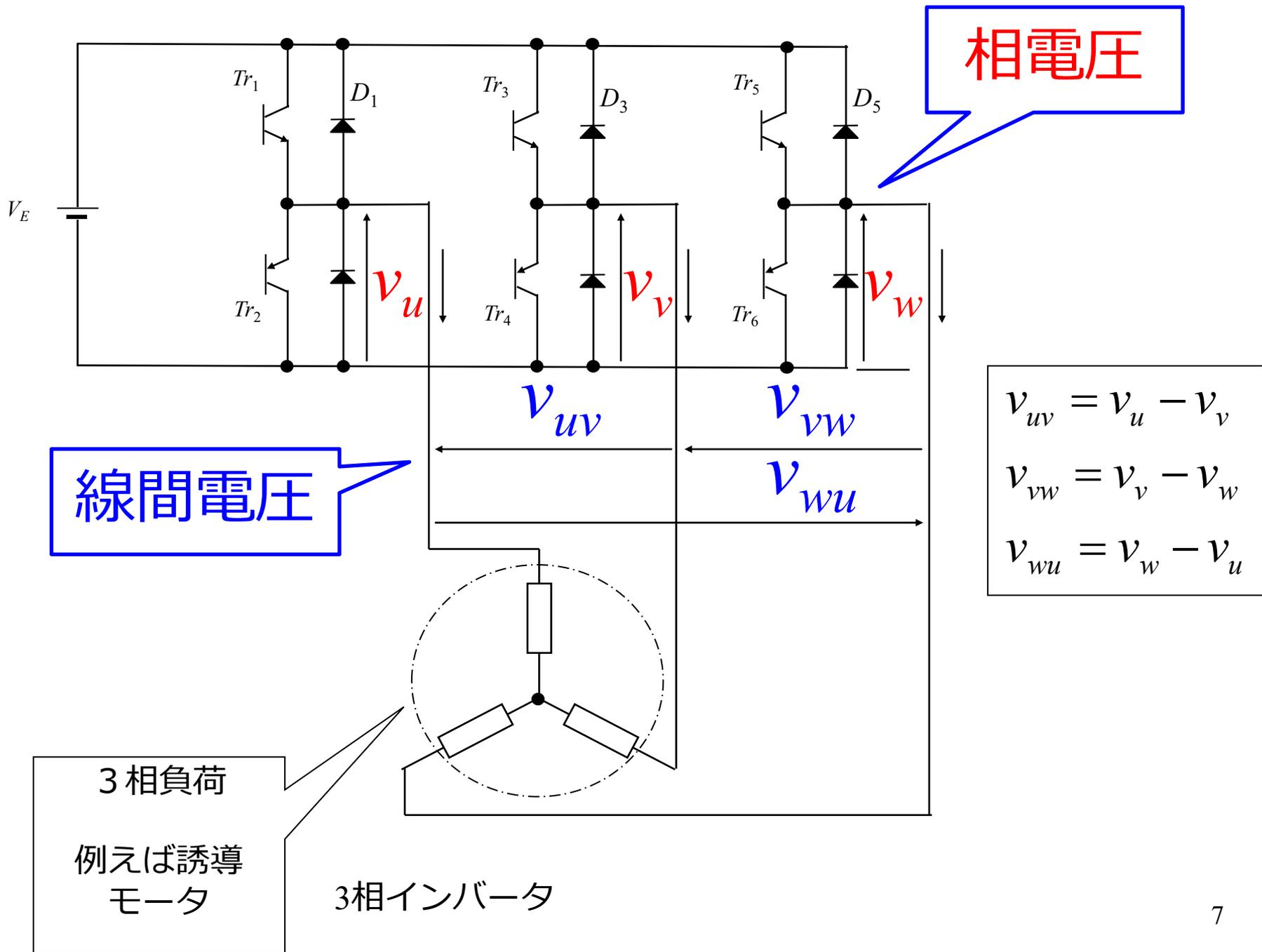
$$V_{uv} = V_u - V_v$$

$$V_{vw} = V_v - V_w$$

$$V_{wu} = V_w - V_u$$

3相負荷
例えば誘導
モータ

3相インバータ



相電圧

線間電圧

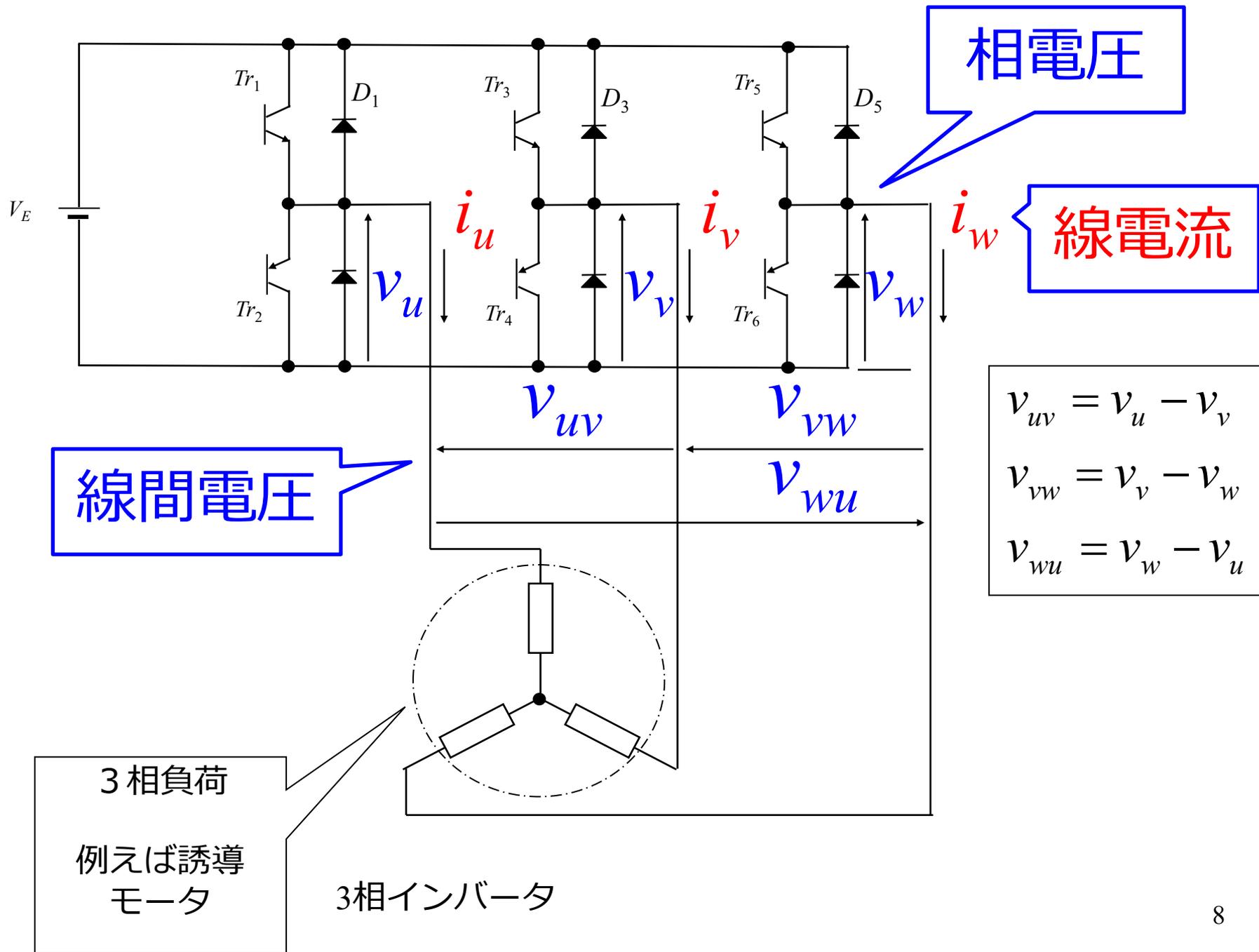
$$V_{uv} = V_u - V_v$$

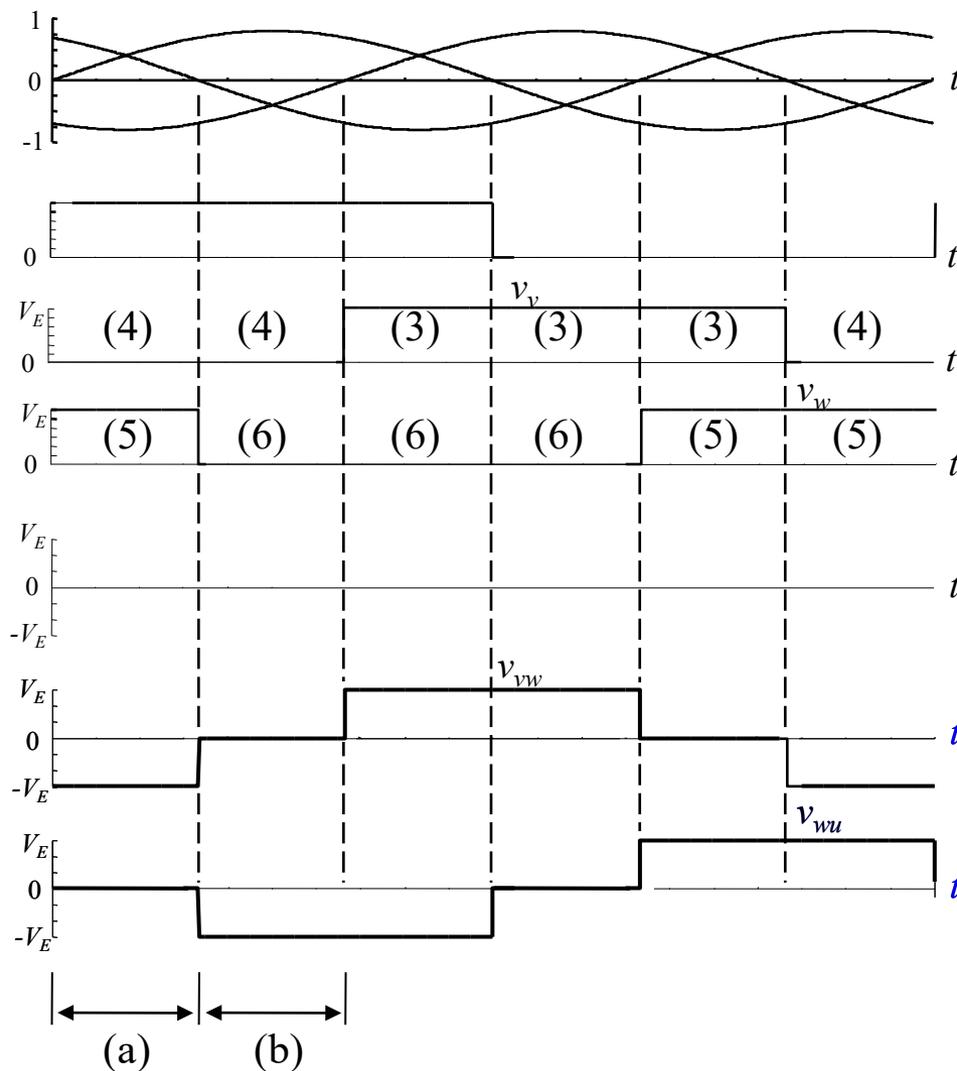
$$V_{vw} = V_v - V_w$$

$$V_{wu} = V_w - V_u$$

3相負荷
例えば誘導
モータ

3相インバータ





$v_{comu} \geq 0$ のとき
Tr1 , Tr2

$v_{comu} < 0$ のとき
Tr1 , Tr2

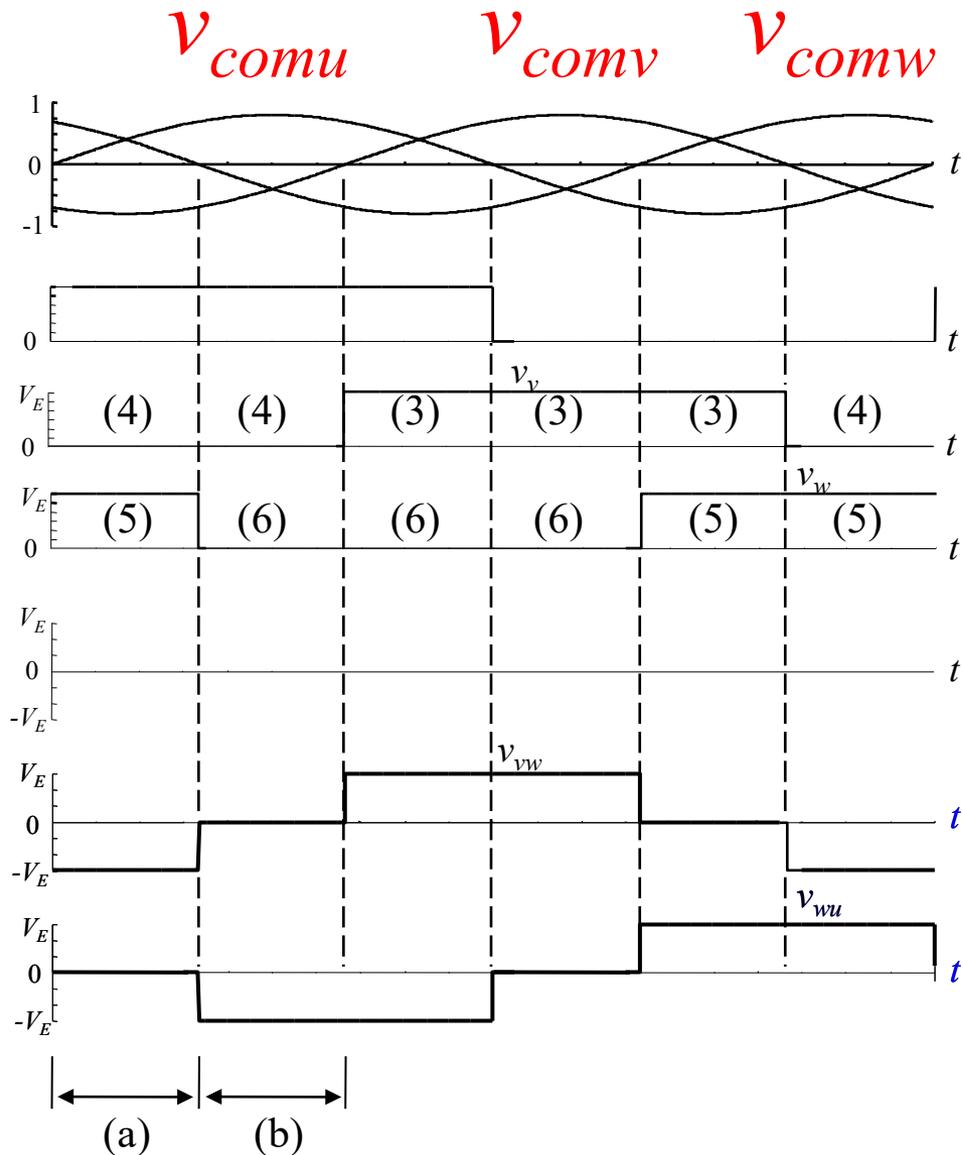
$v_{comv} \geq 0$ のとき
Tr3 オン, Tr4 オフ

$v_{comv} < 0$ のとき
Tr3 オフ, Tr4 オン

$v_{comw} \geq 0$ のとき
Tr5 オン, Tr6 オフ

$v_{comw} < 0$ のとき
Tr5 オフ, Tr6 オン

図11.3 120°通電型の出力電圧波形



$v_{comu} \geq 0$ のとき
Tr1 , Tr2

$v_{comu} < 0$ のとき
Tr1 , Tr2

$v_{comv} \geq 0$ のとき
Tr3 オン, Tr4 オフ

$v_{comv} < 0$ のとき
Tr3 オフ, Tr4 オン

$v_{comw} \geq 0$ のとき
Tr5 オン, Tr6 オフ

$v_{comw} < 0$ のとき
Tr5 オフ, Tr6 オン

図11.3 120°通電型の出力電圧波形

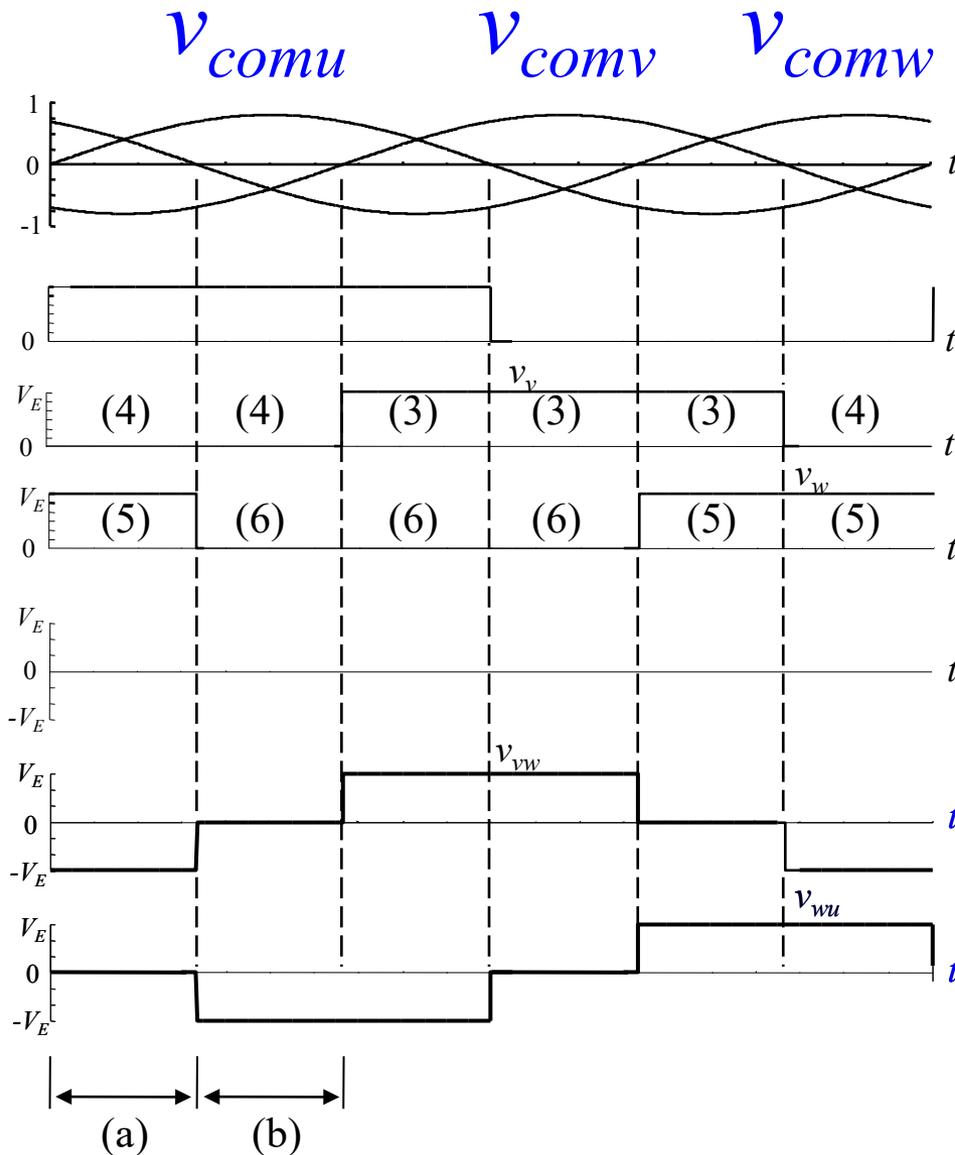
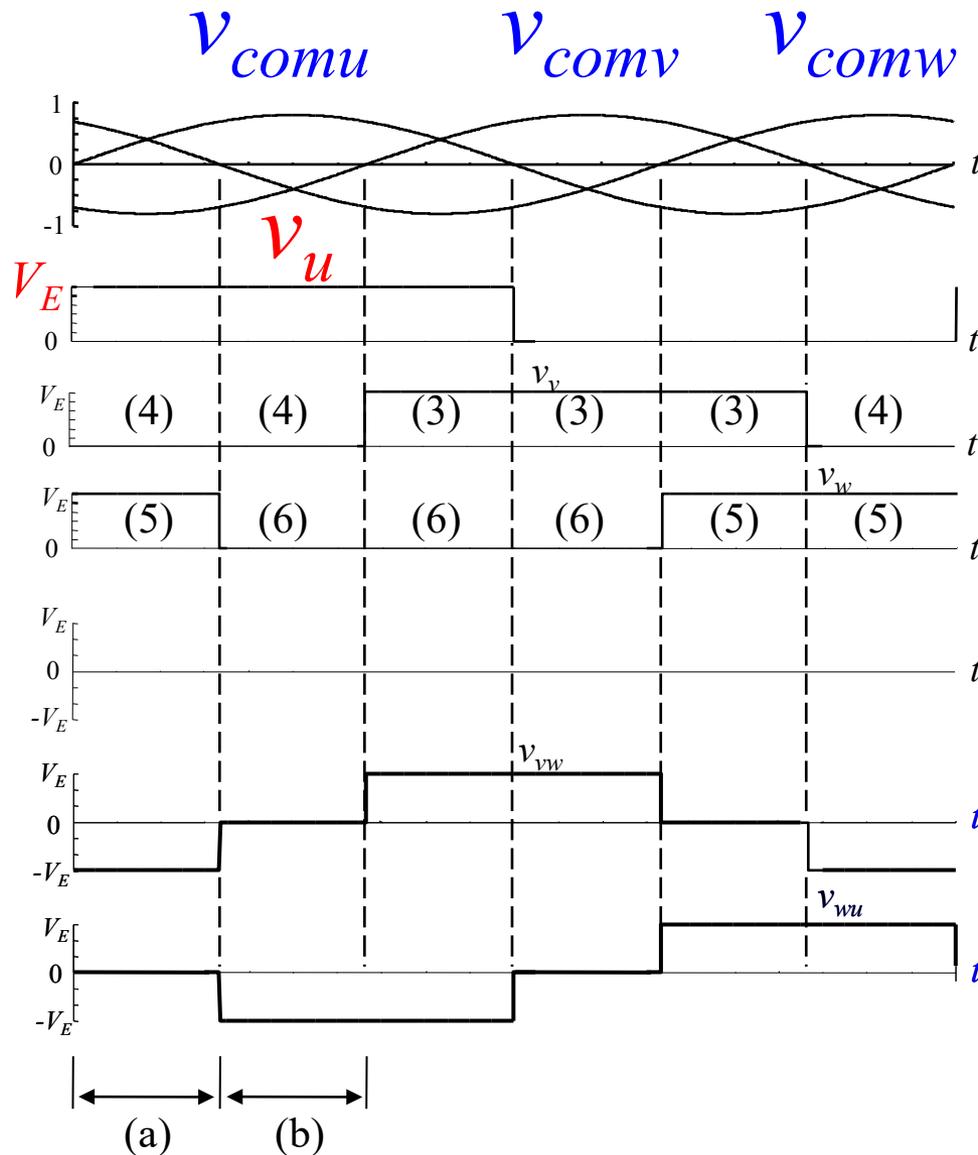


図11.3 120°通電型の出力電圧波形



$v_{comu} > 0$ のとき

Tr1 **オン**, Tr2 **オフ**

$v_{comu} < 0$ のとき

Tr1 **オフ**, Tr2 **オン**

$v_{comv} \geq 0$ のとき

Tr3 **オン**, Tr4 **オフ**

$v_{comv} < 0$ のとき

Tr3 **オフ**, Tr4 **オン**

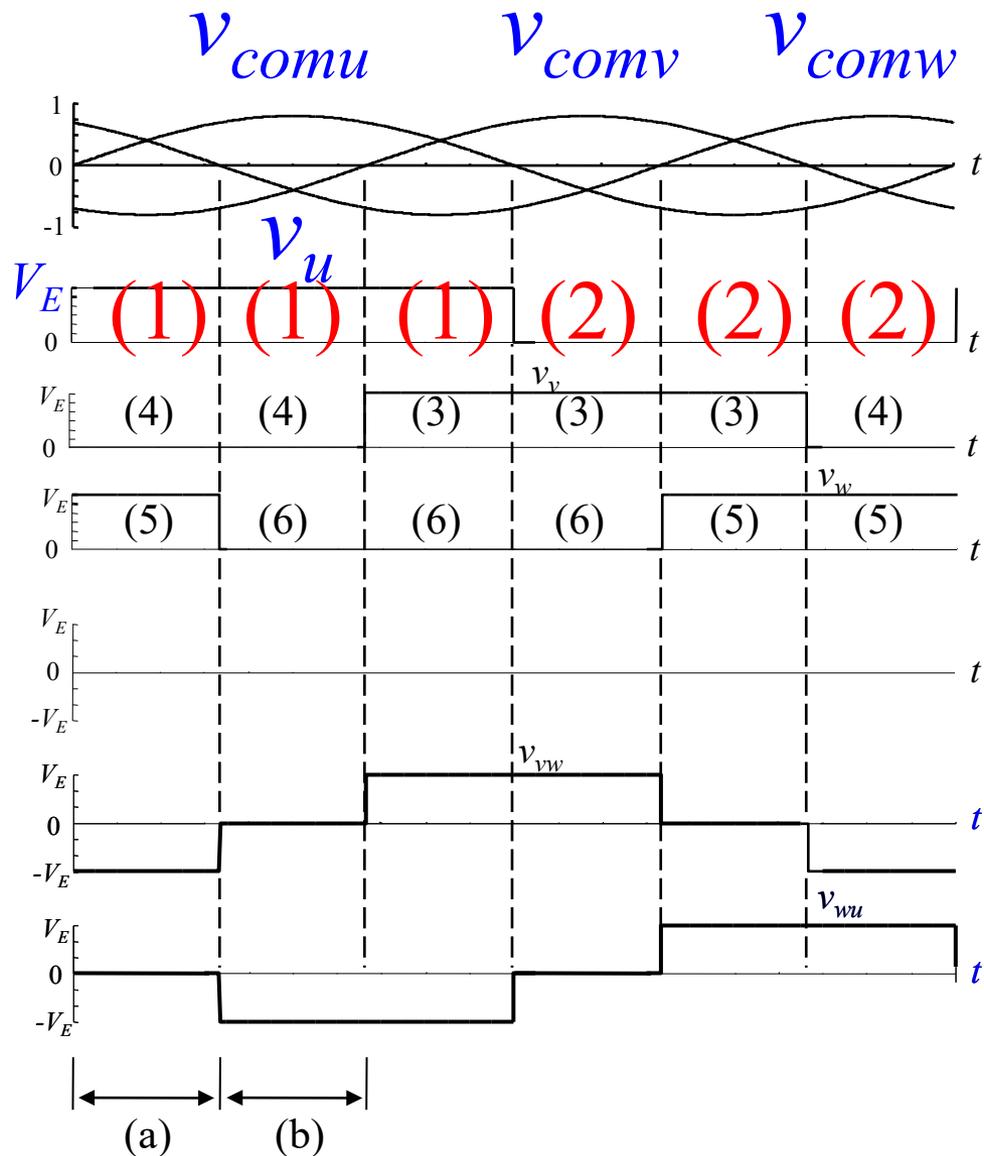
$v_{comw} \geq 0$ のとき

Tr5 **オン**, Tr6 **オフ**

$v_{comw} < 0$ のとき

Tr5 **オフ**, Tr6 **オン**

図11.3 120°通電型の出力電圧波形



$v_{comu} > 0$ のとき

Tr1 **オン**, Tr2 **オフ**

$v_{comu} < 0$ のとき

Tr1 **オフ**, Tr2 **オン**

$v_{comv} \geq 0$ のとき

Tr3 **オン**, Tr4 **オフ**

$v_{comv} < 0$ のとき

Tr3 **オフ**, Tr4 **オン**

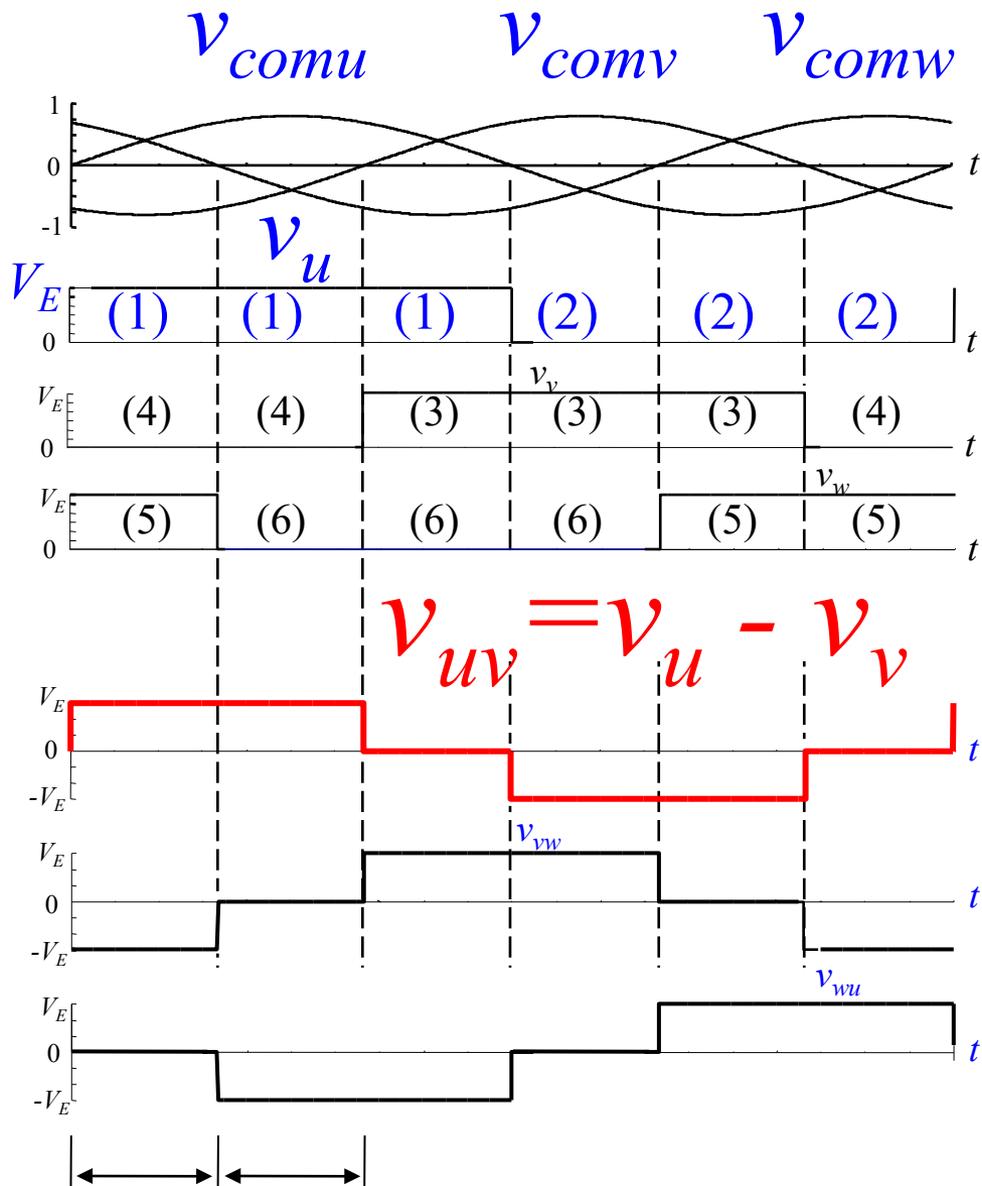
$v_{comw} \geq 0$ のとき

Tr5 **オン**, Tr6 **オフ**

$v_{comw} < 0$ のとき

Tr5 **オフ**, Tr6 **オン**

図11.3 120°通電型の出力電圧波形



$v_{comu} > 0$ のとき

Tr1 **オン**, Tr2 **オフ**

$v_{comu} < 0$ のとき

Tr1 **オフ**, Tr2 **オン**

$v_{comv} \geq 0$ のとき

Tr3 **オン**, Tr4 **オフ**

$v_{comv} < 0$ のとき

Tr3 **オフ**, Tr4 **オン**

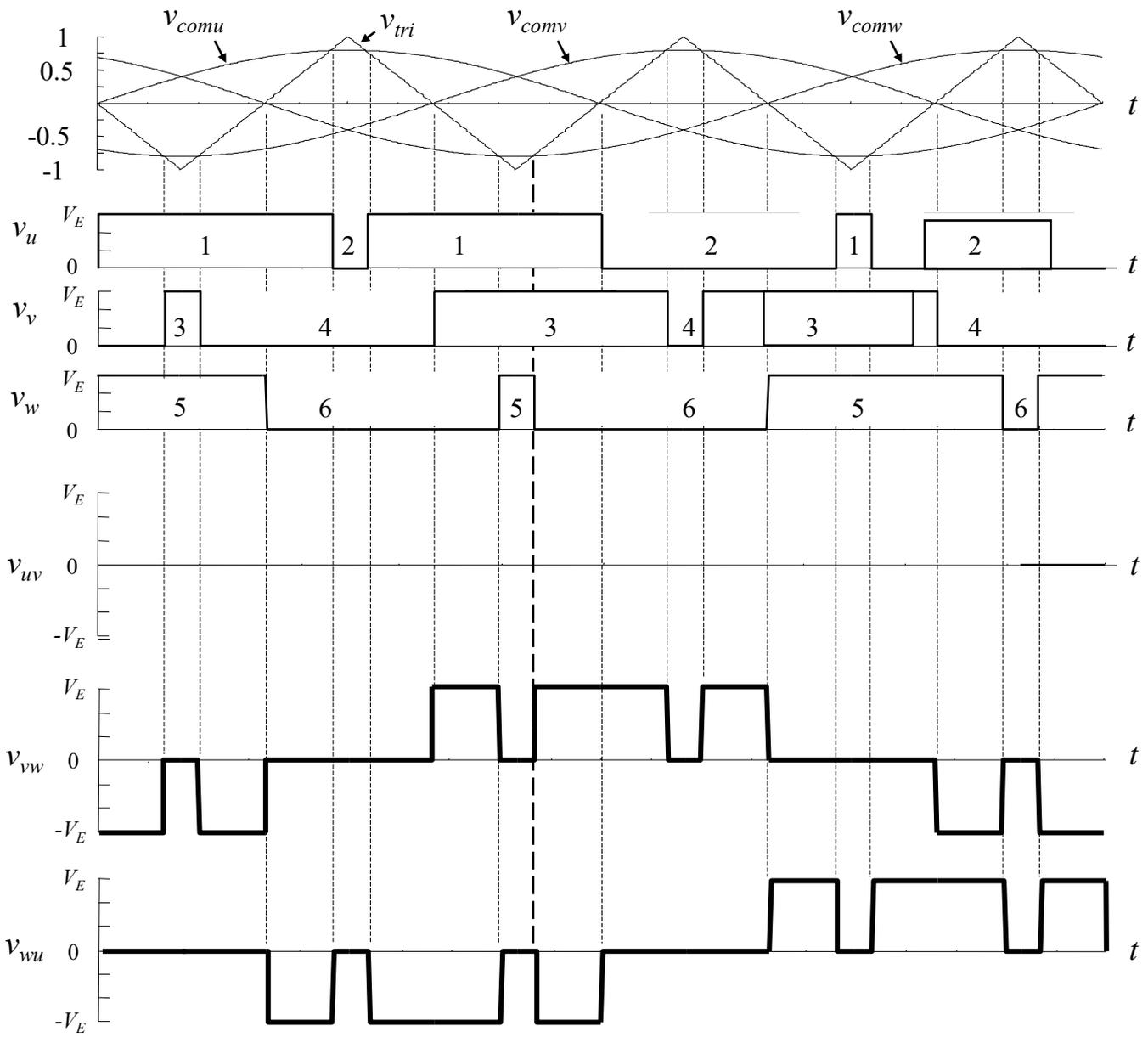
$v_{comw} \geq 0$ のとき

Tr5 **オン**, Tr6 **オフ**

$v_{comw} < 0$ のとき

Tr5 **オフ**, Tr6 **オン**

図11.3 (b) 120°通電型の出力電圧波形



$v_{comu} \geq v_{tri}$ のとき
Tr1 , Tr2

$v_{comu} < v_{tri}$ のとき
Tr1 , Tr2

$v_{comv} \geq v_{tri}$ のとき
Tr3 オン, Tr4 オフ

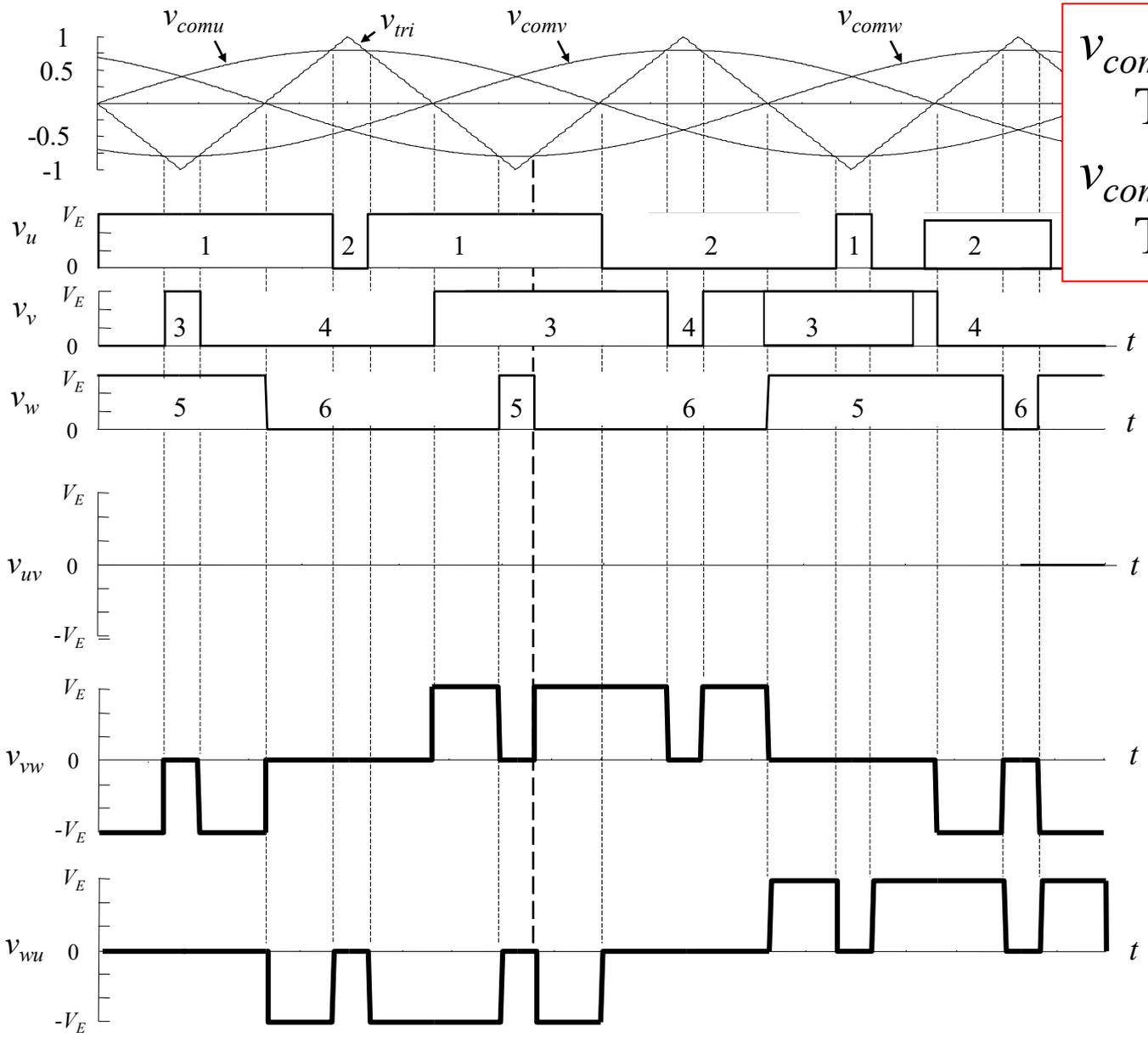
$v_{comv} < v_{tri}$ のとき
Tr3 オフ, Tr4 オン

$v_{comw} \geq v_{tri}$ のとき
Tr5 オン, Tr6 オフ

$v_{comw} < v_{tri}$ のとき
Tr5 オフ, Tr6 オン

図11.6 3パルスPWM制御法の実出力電圧波形

11.3 PWM制御 (3パルスPWM) $f_{com}/f_{tri} = 1/3$



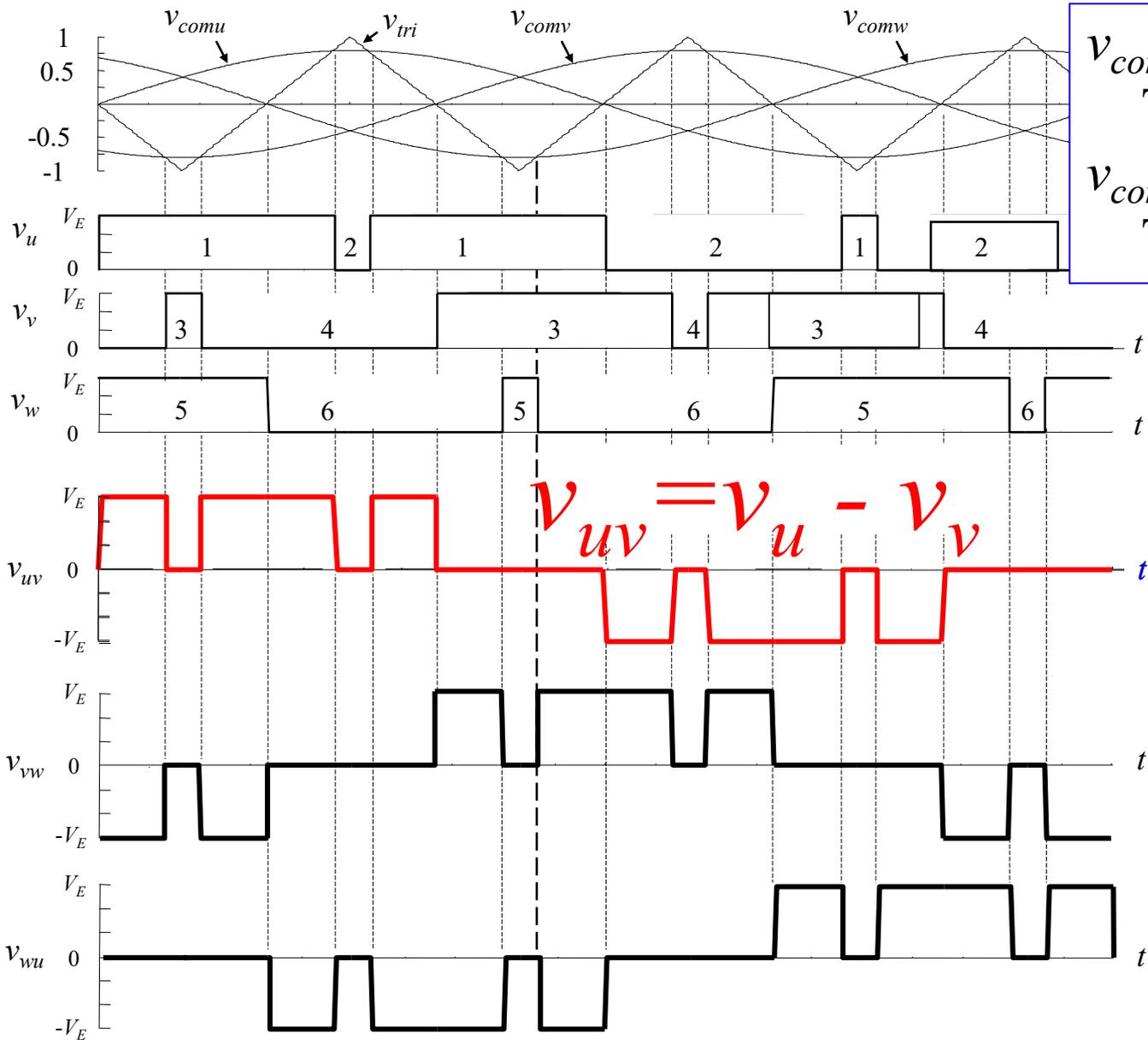
$v_{comu} > v_{tri}$ のとき
 Tr1 オン, Tr2 オフ
 $v_{comu} < v_{tri}$ のとき
 Tr1 オフ, Tr2 オン

$v_{comv} > v_{tri}$ のとき
 Tr3 オン, Tr4 オフ
 $v_{comv} < v_{tri}$ のとき
 Tr3 オフ, Tr4 オン

$v_{comw} > v_{tri}$ のとき
 Tr5 オン, Tr6 オフ
 $v_{comw} < v_{tri}$ のとき
 Tr5 オフ, Tr6 オン

図11.6 3パルスPWM制御法の実出力電圧波形

11.3 PWM制御 (3パルスPWM) $f_{com}/f_{tri} = 1/3$

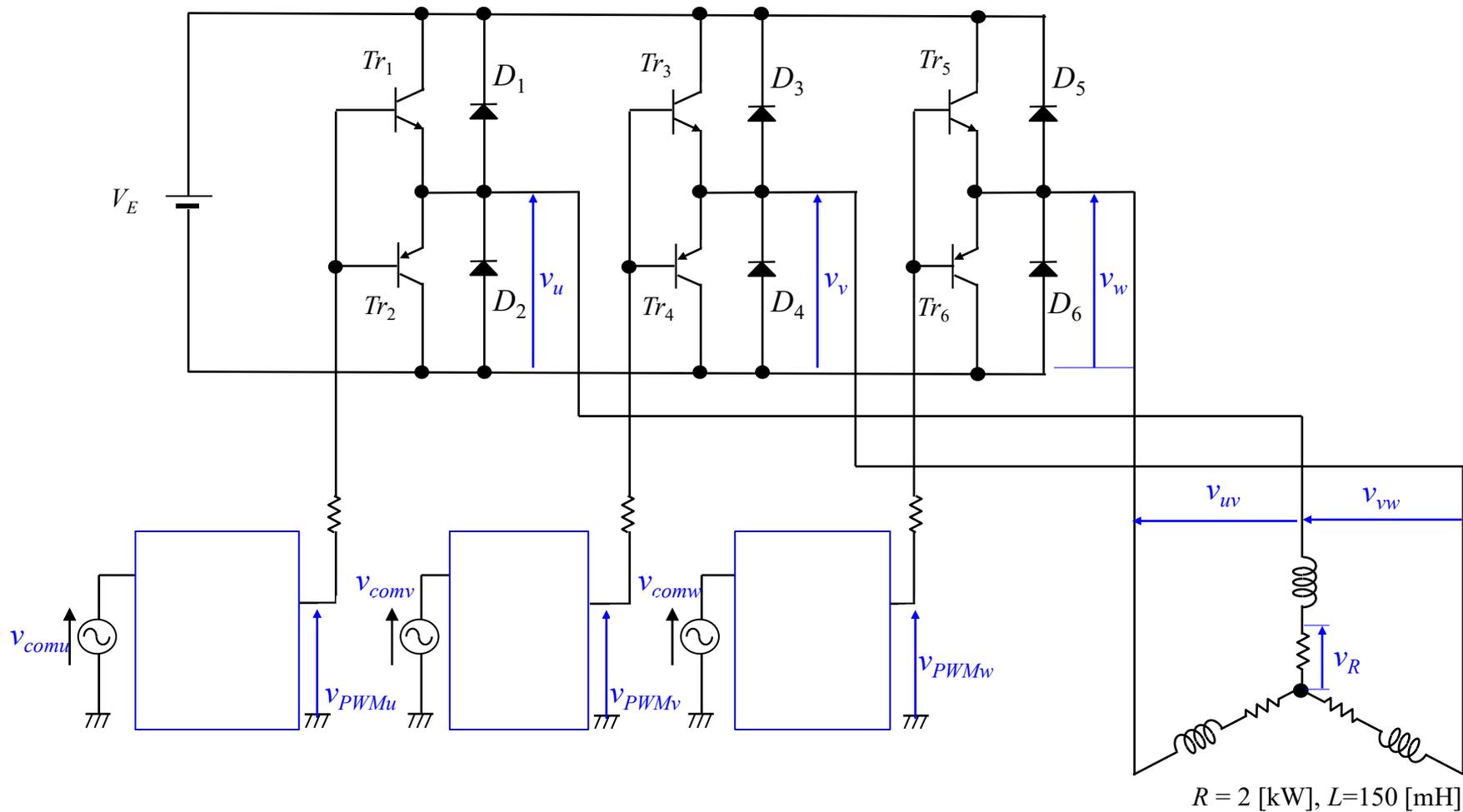


$v_{comu} > v_{tri}$ のとき
 Tr1 オン, Tr2 オフ
 $v_{comu} < v_{tri}$ のとき
 Tr1 オフ, Tr2 オン

$v_{comv} > v_{tri}$ のとき
 Tr3 オン, Tr4 オフ
 $v_{comv} < v_{tri}$ のとき
 Tr3 オフ, Tr4 オン

$v_{comw} > v_{tri}$ のとき
 Tr5 オン, Tr6 オフ
 $v_{comw} < v_{tri}$ のとき
 Tr5 オフ, Tr6 オン

図11.6 3パルスPWM制御法の実出力電圧波形



三相PWMインバータの回路

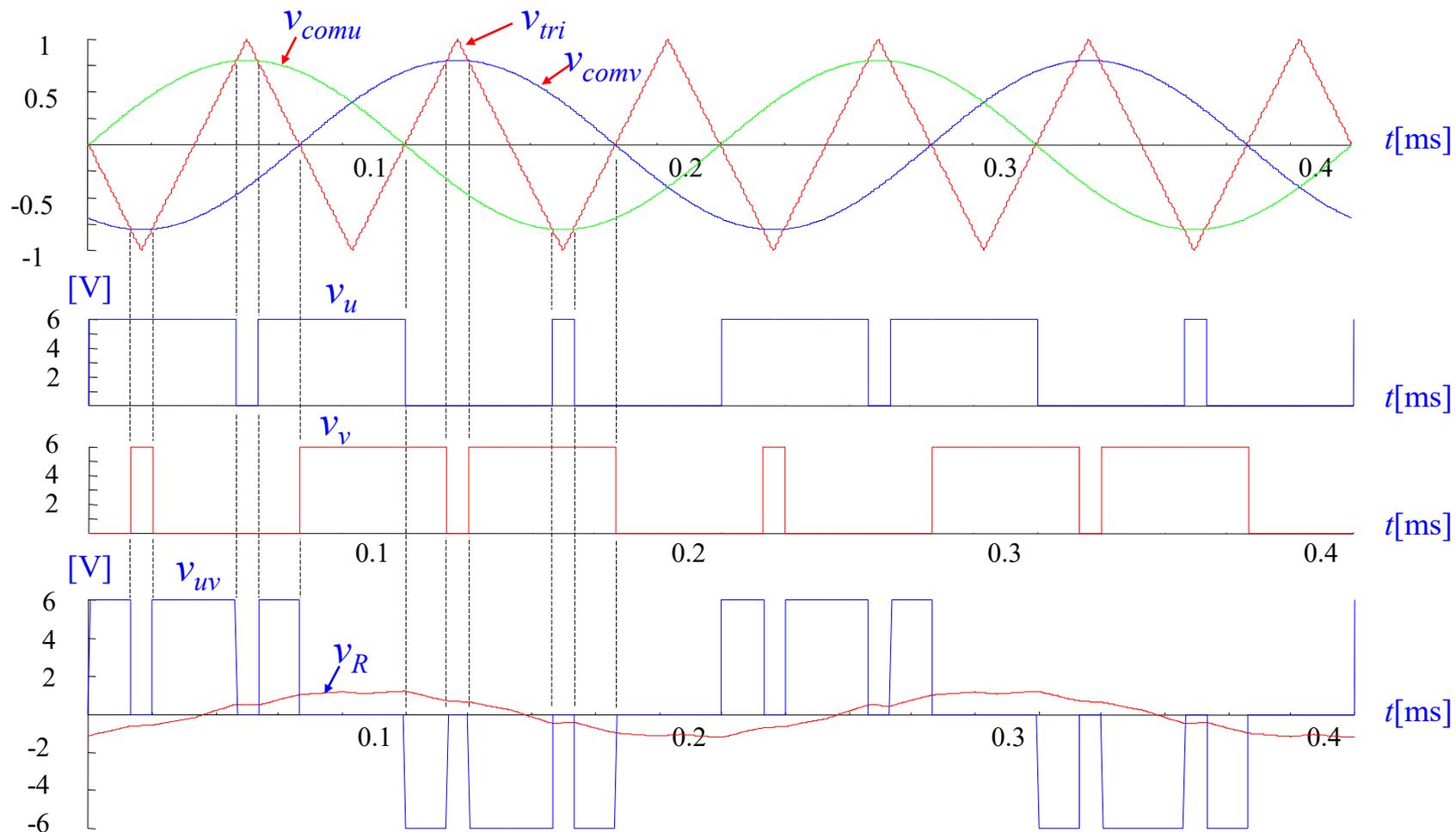


図11.6 3パルスPWM制御法の実出力電圧・電流波形
 スイッチング周波数 $f_{sw} = 15$ [kHz], $R=2$ [kW], $L150$ [mH], $V_E = 6$ [V]

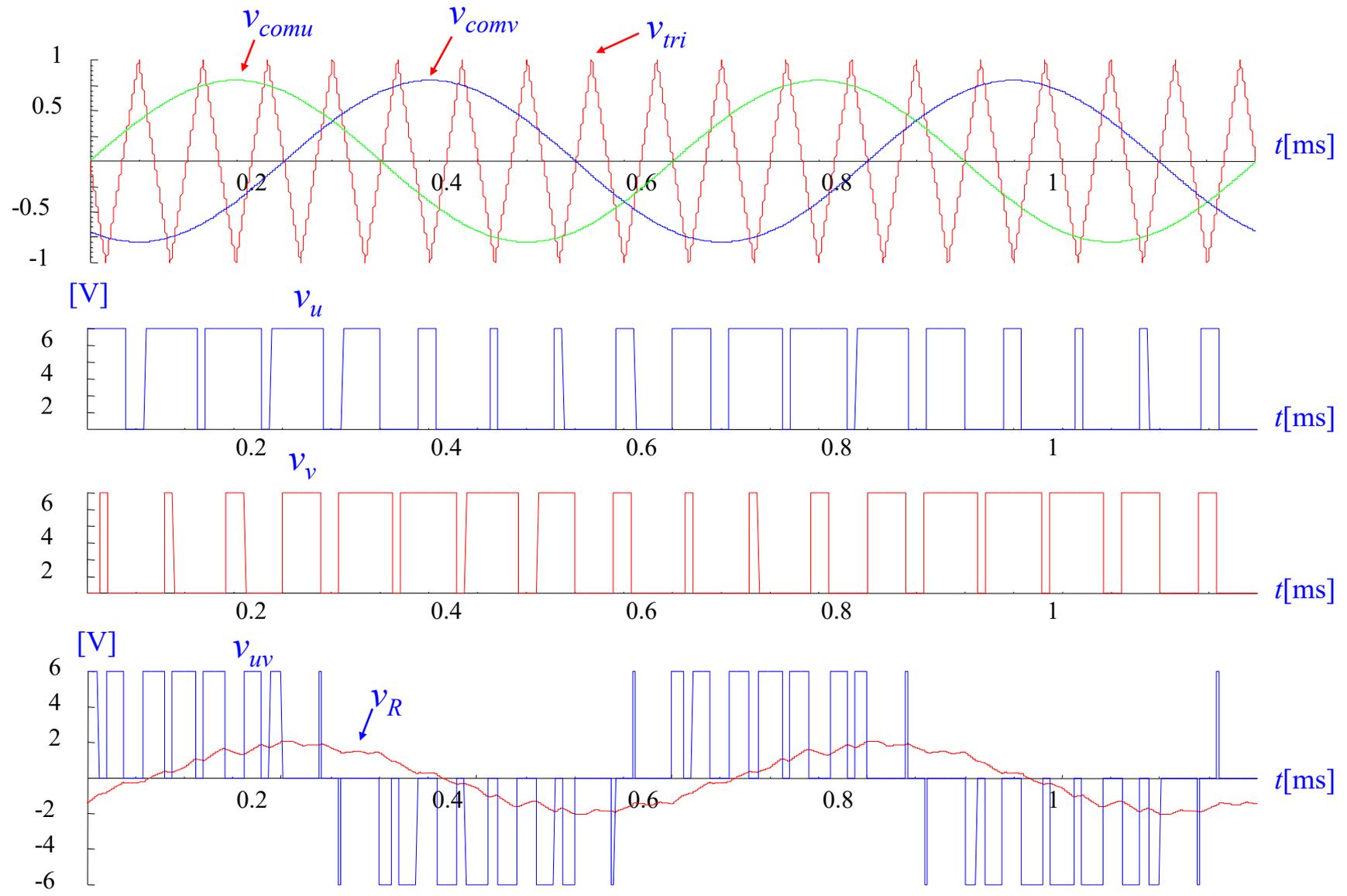
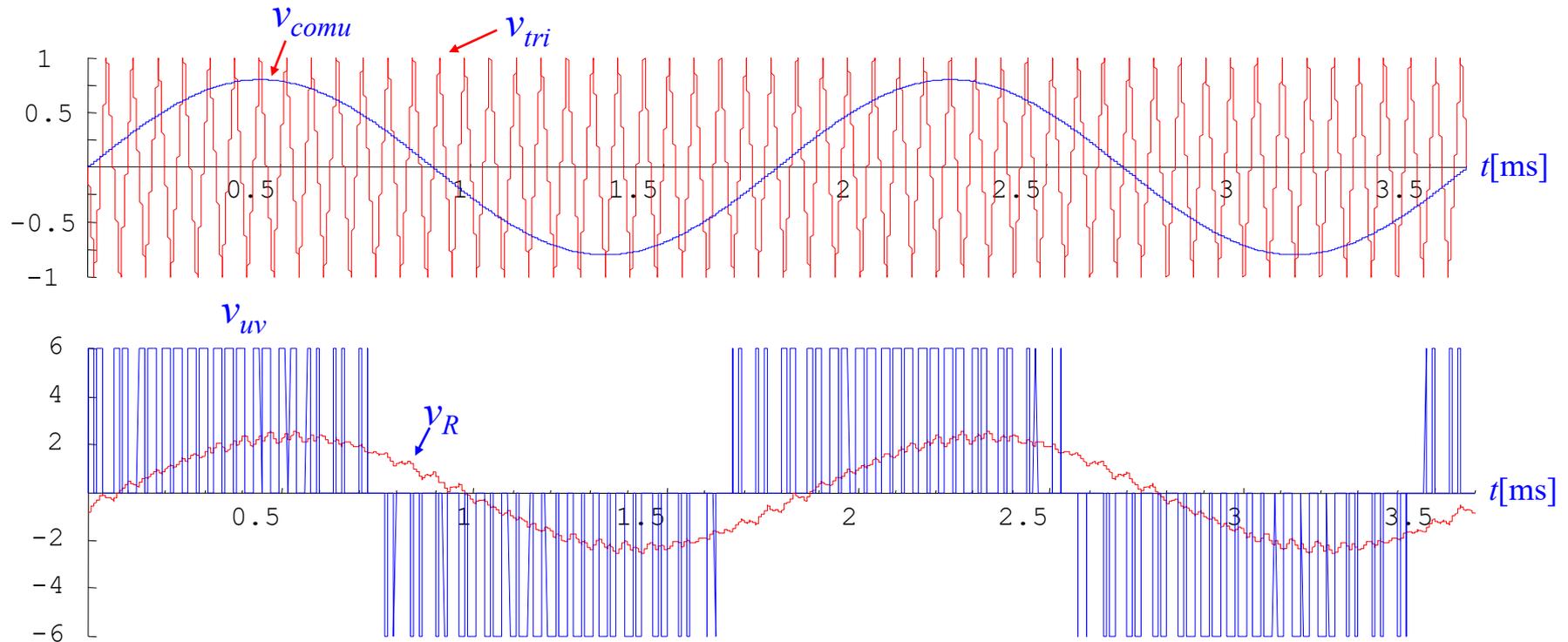


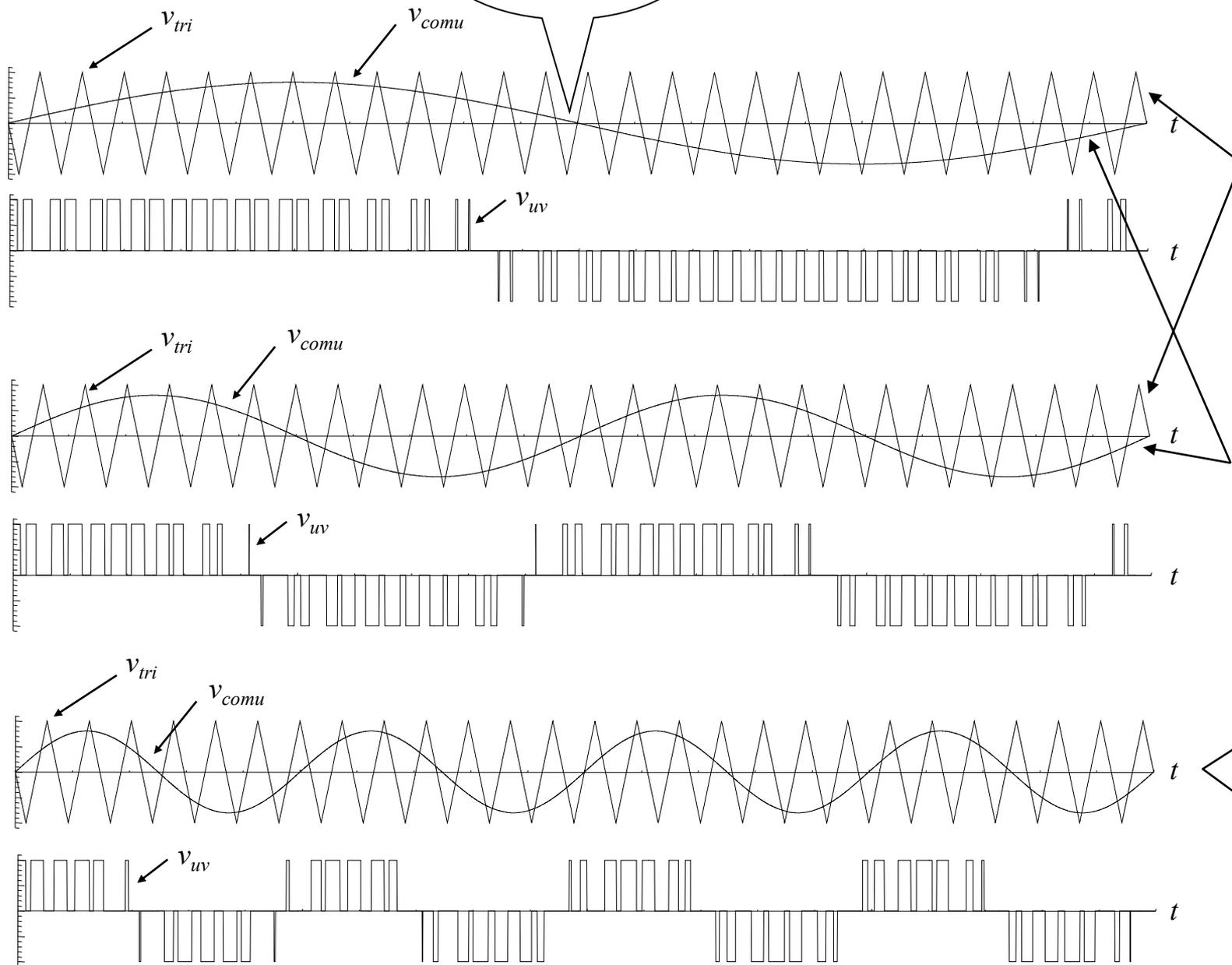
図11.12 9パルスPWM制御法の実出力電圧波形

27パルスPWM制御



非同期モード

三角波のゼロクロス点と指令電圧のゼロクロス点が



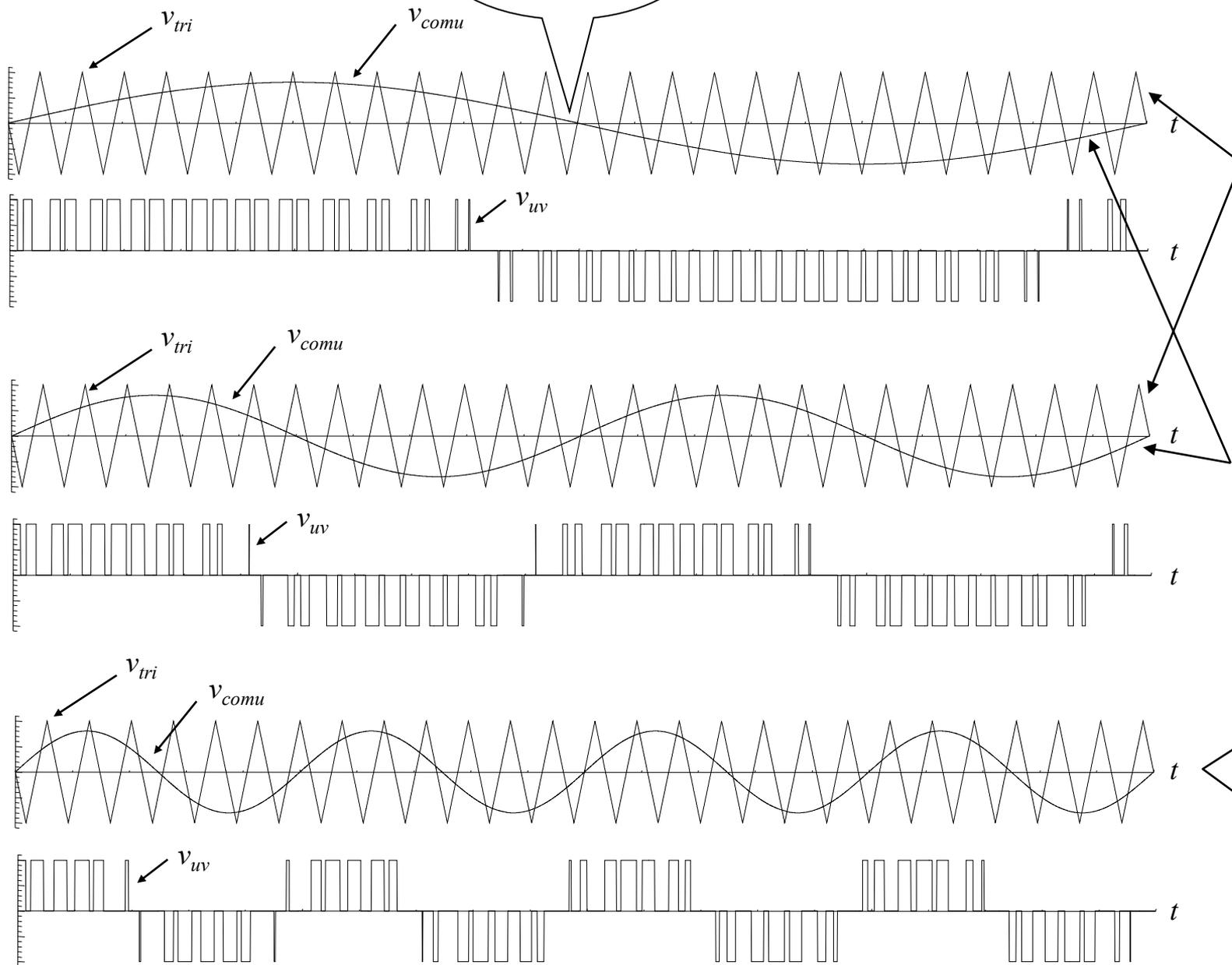
三角波
 v_{tri} の周
波数は

指令電
圧 v_{com}
の周波
数

出力周波数
スイッチング周
波数

非同期モード

三角波のゼロクロス点と指令電圧のゼロクロス点が

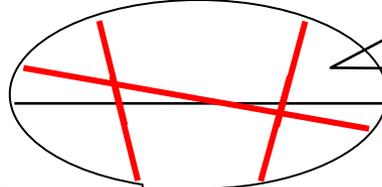


三角波
 v_{tri} の周
波数は
一定

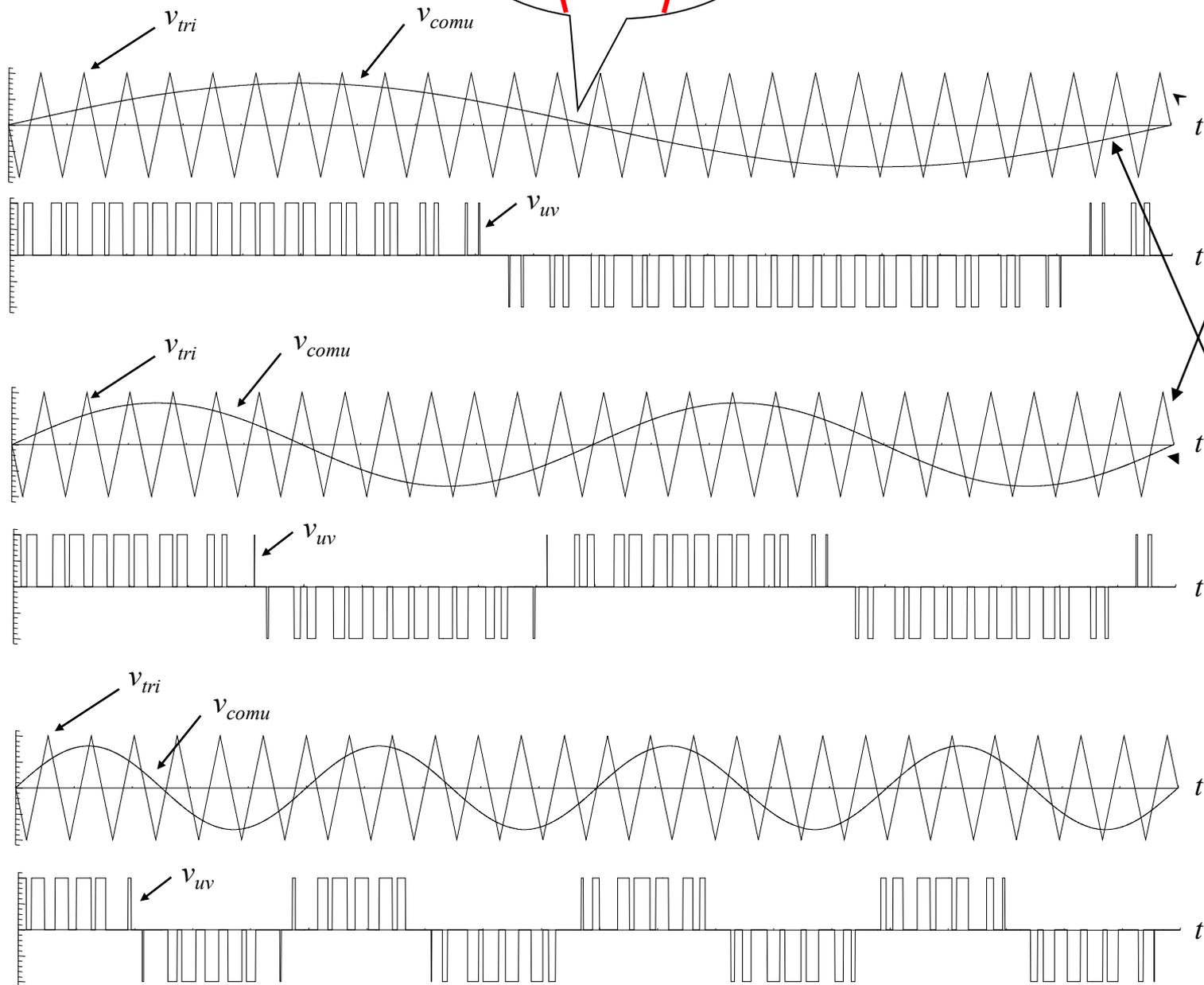
指令電
圧 v_{com}
の周波
数のみ
可変

出力周波数
スイッチング周
波数

非同期モード



三角波のゼロクロス点と指令電圧のゼロクロス点が一致していない。

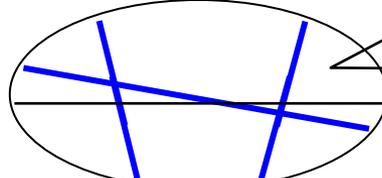


三角波
 v_{tri} の周
波数は
一定

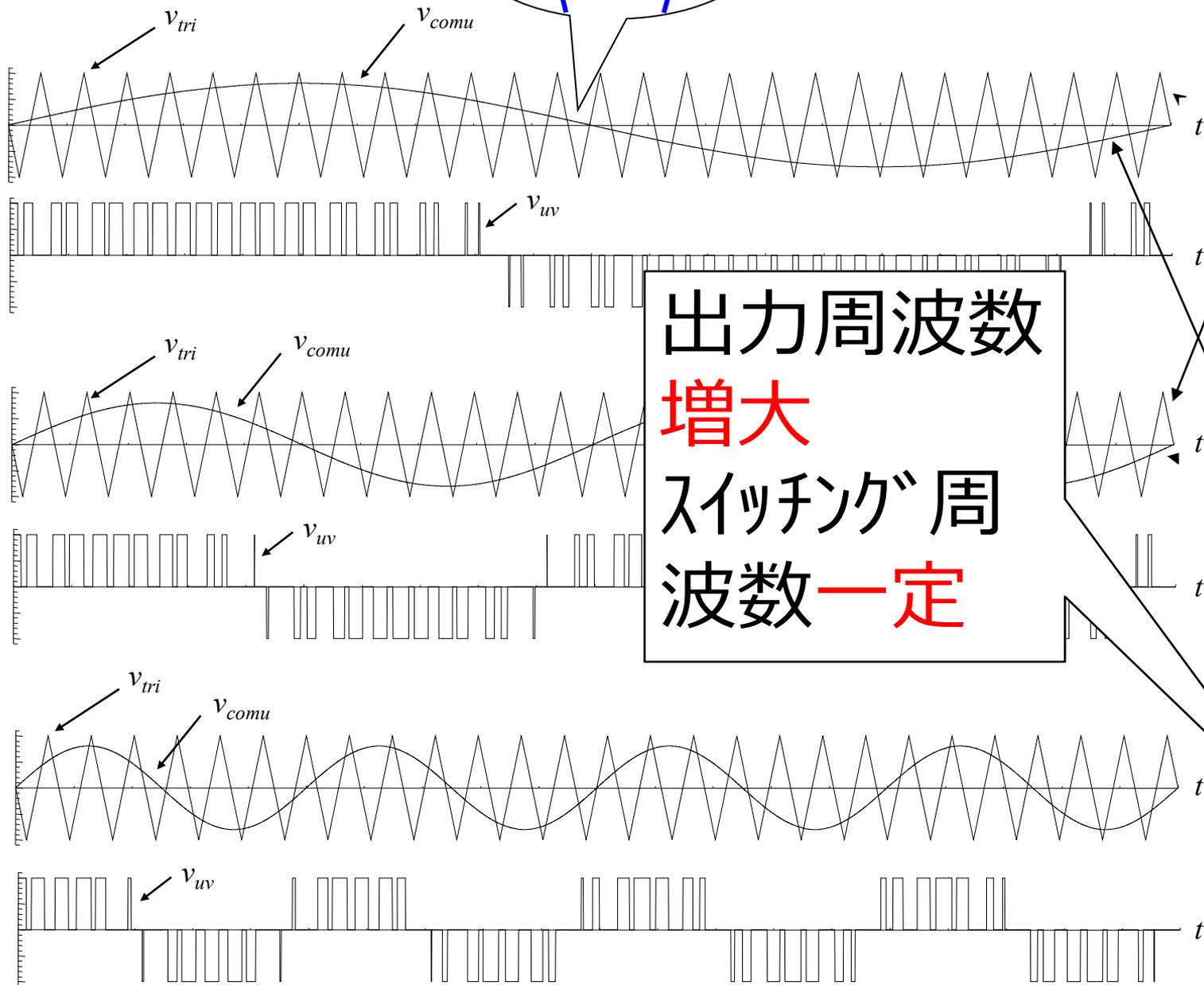
指令電
圧 v_{com}
の周波
数のみ
可変

出力周波数
スイッチング周
波数

非同期モード



三角波のゼロクロス点と指令電圧のゼロクロス点が一致していない。

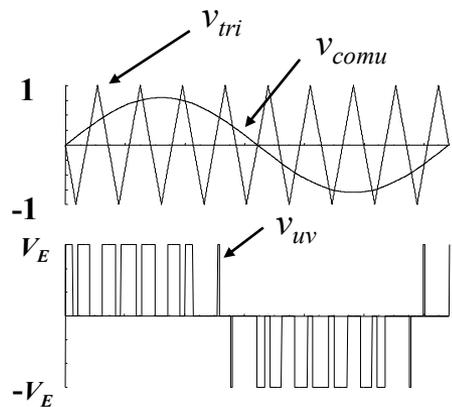
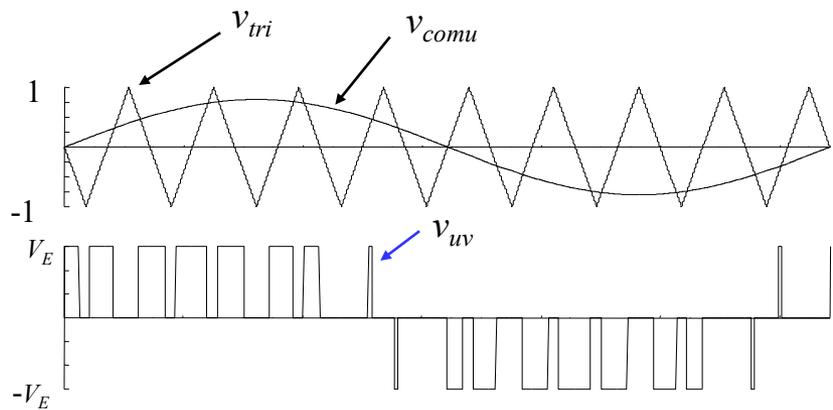
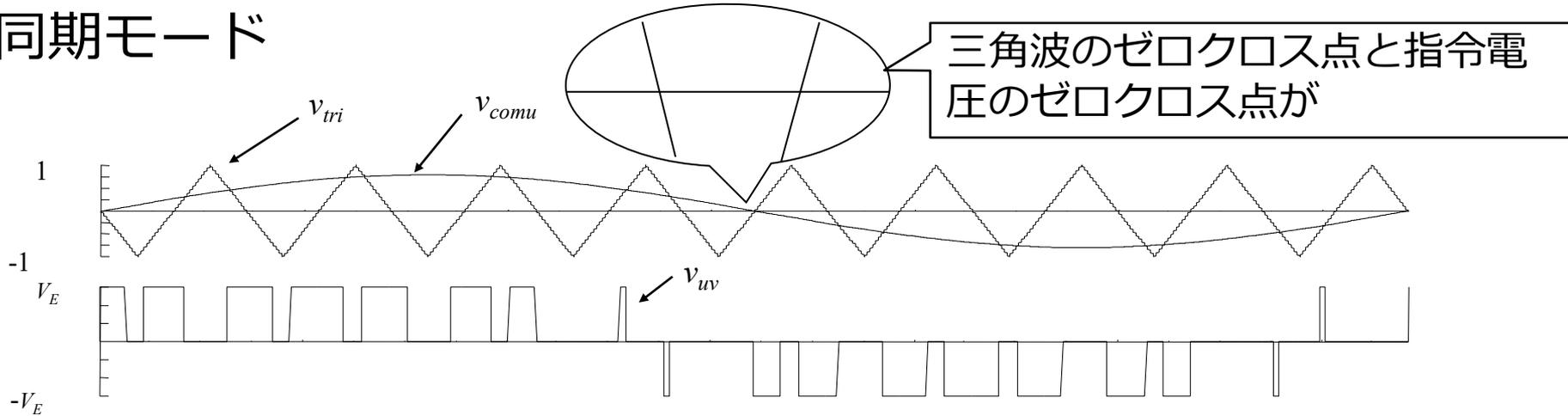


三角波 v_{tri} の周波数は一定

指令電圧 v_{com} の周波数のみ可変

出力周波数
増大
スイッチング周波数一定

同期モード

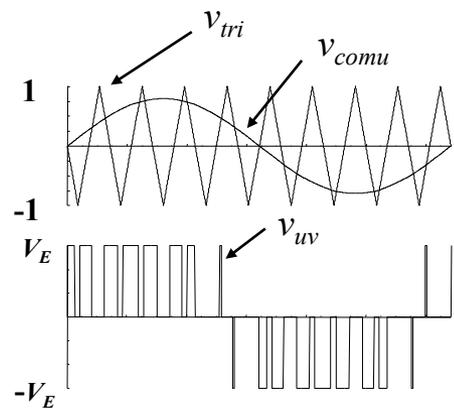
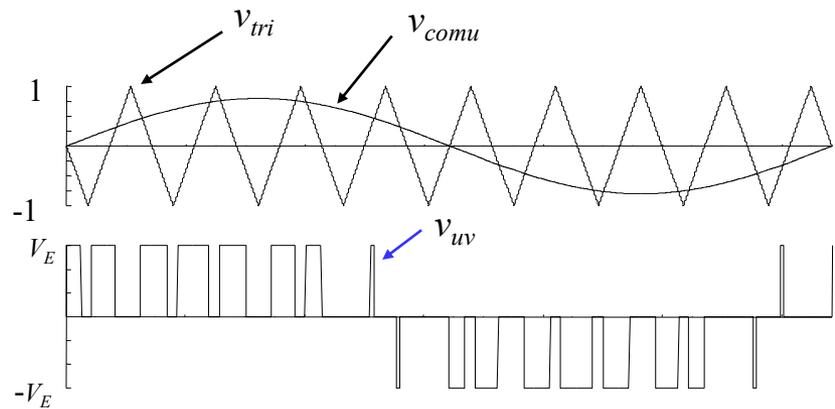
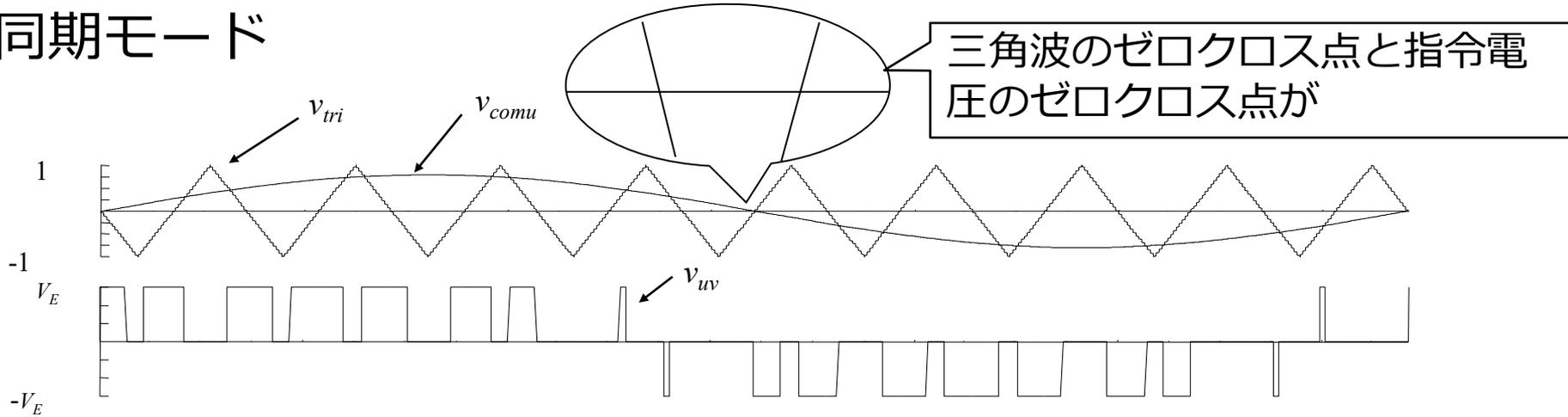


出力周波数
スイッチング周波数

指令電圧 v_{com} の
周波数 f_{com} と三
角波 v_{tri} の繰返
し周波数 f_{tri} の

(この例で
は 1/9) に保つ
ている。

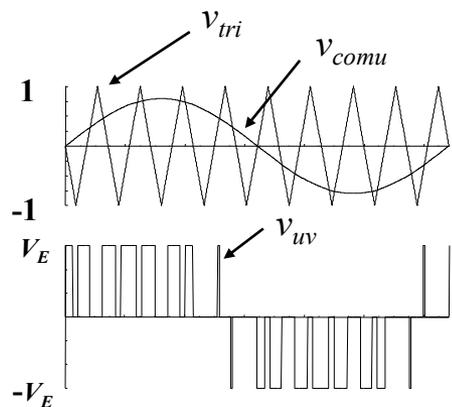
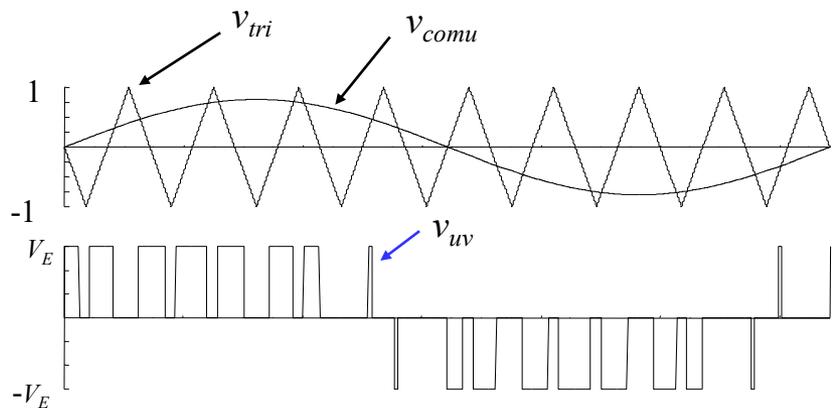
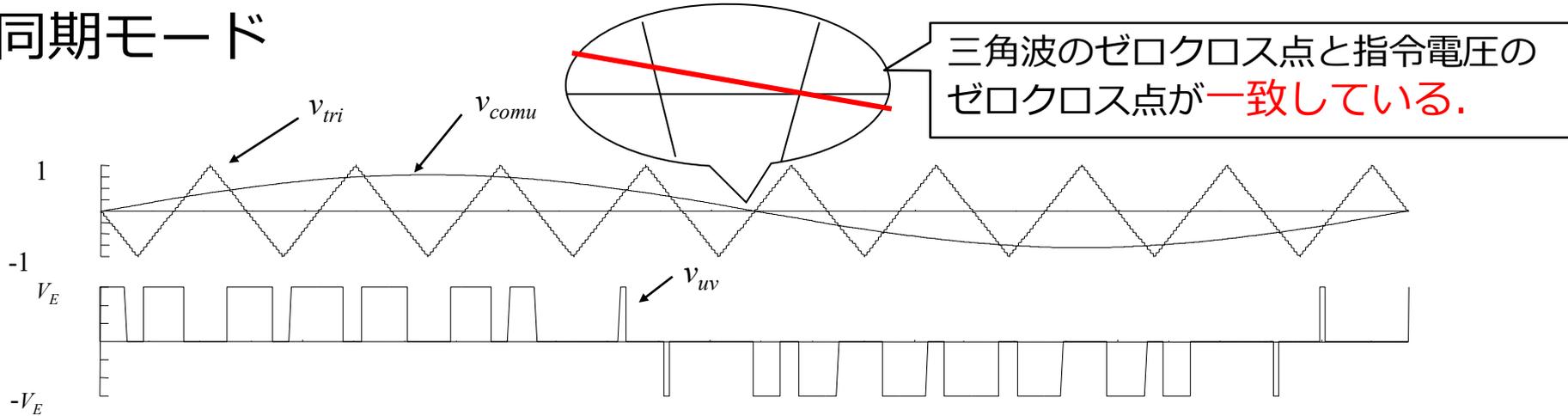
同期モード



指令電圧 v_{com} の周波数 f_{com} と三角波 v_{tri} の繰返し周波数 f_{tri} の比 (f_{com} / f_{tri}) を常に一定 (この例では 1/9) に保っている。

出力周波数
スイッチング

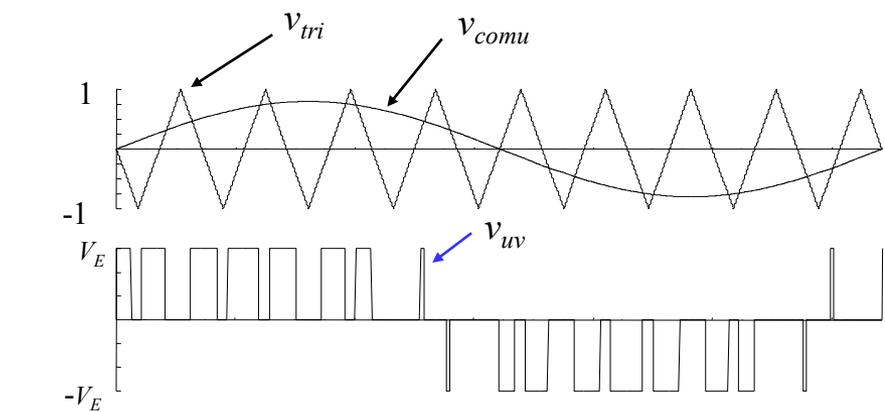
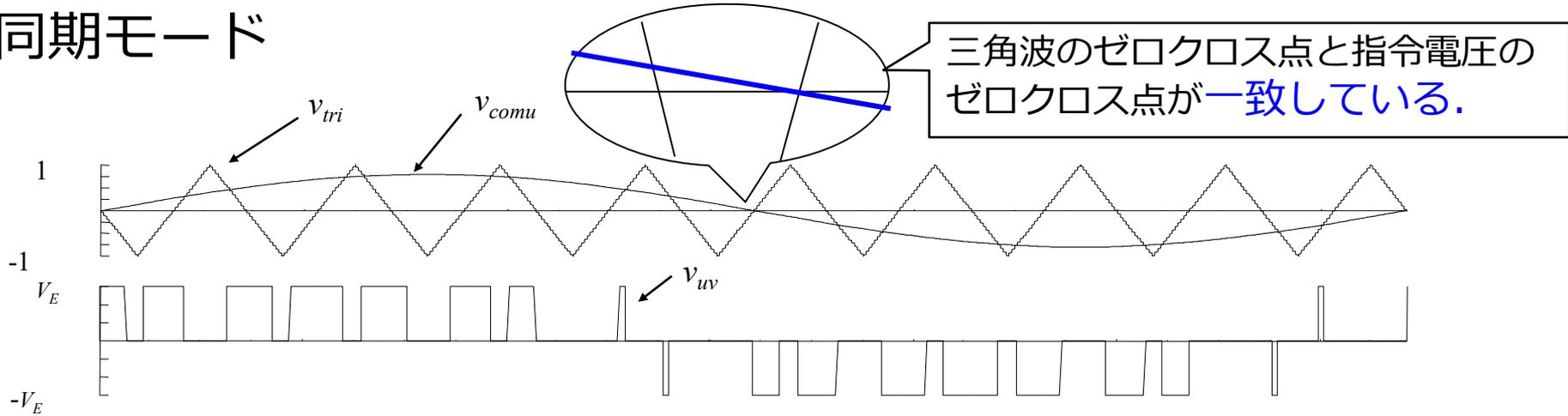
同期モード



指令電圧 v_{com} の周波数 f_{com} と三角波 v_{tri} の繰返し周波数 f_{tri} の比 (f_{com} / f_{tri}) を常に一定 (この例では 1/9) に保っている。

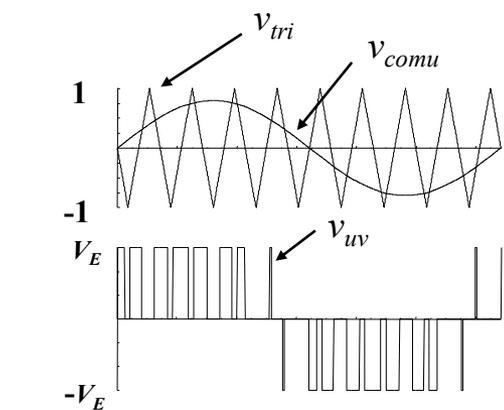
出力周波数
スイッチング周波数

同期モード



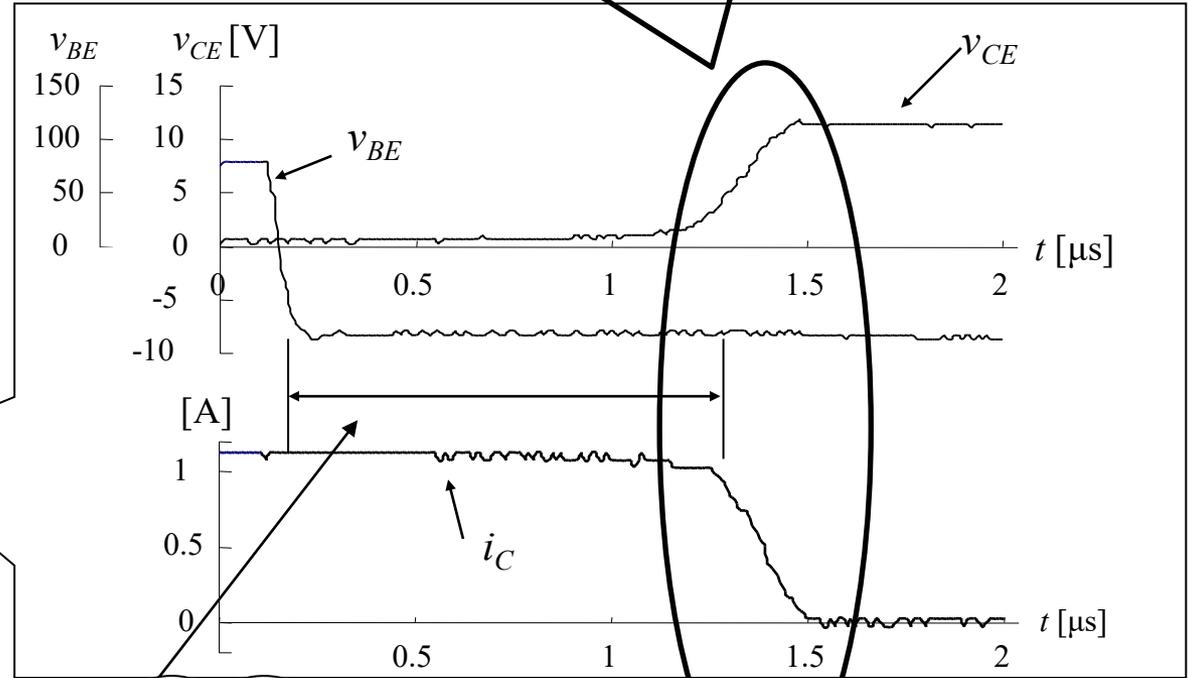
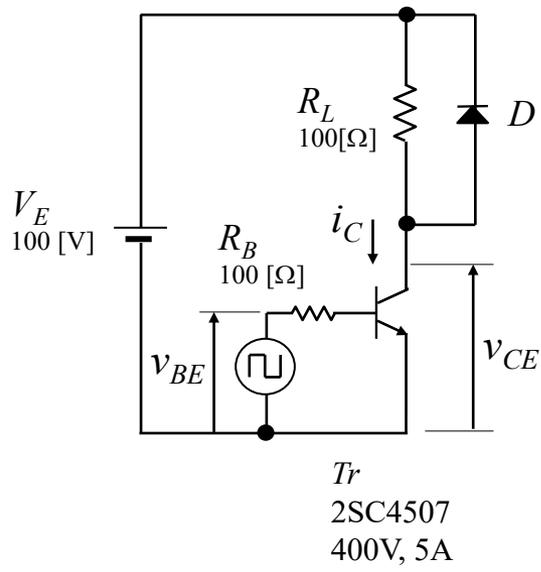
出力周波数**増大**
 スwitchング周波数
増大

指令電圧 v_{com} の
 周波数 f_{com} と三
 角波 v_{tri} の繰返
 し周波数 f_{tri} の
 比 (f_{com} / f_{tri})
 を常に一定
 (この例では
 1/9) に保って
 いる。



Trにおけるスイッチング損失 (実験波形例)

$v_{CE} > 0, i_C > 0$ の期間がある。トランジスタ内の損失となる。
→スイッチング損失 E_{loss} という。

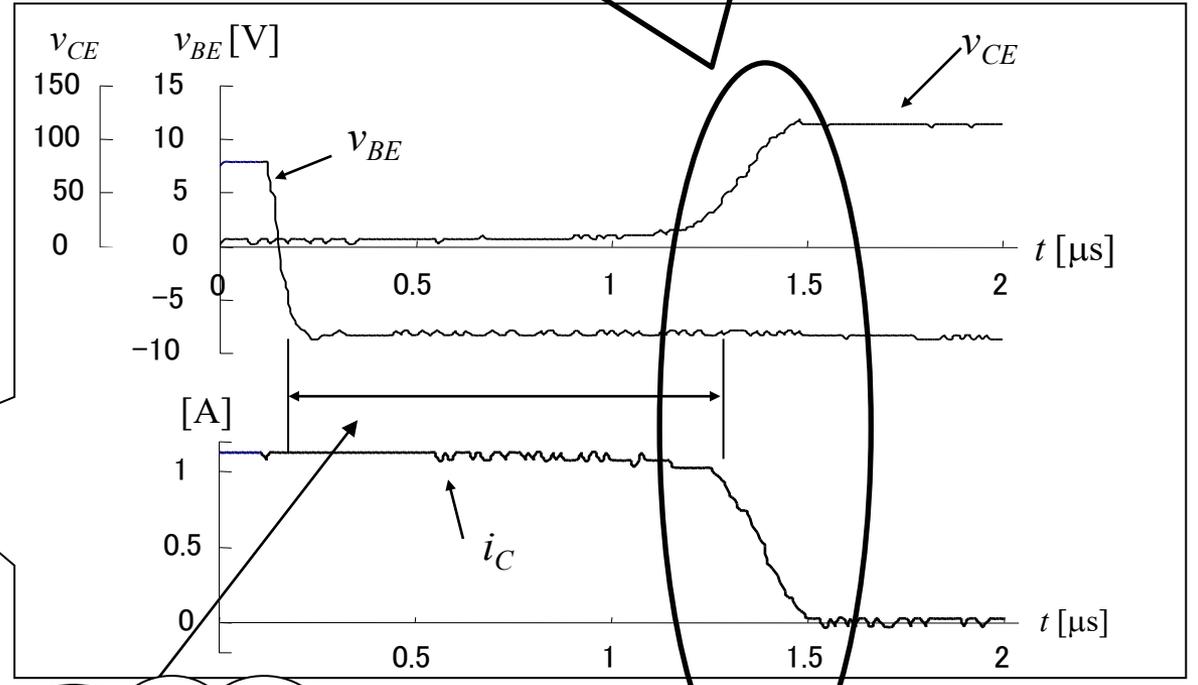
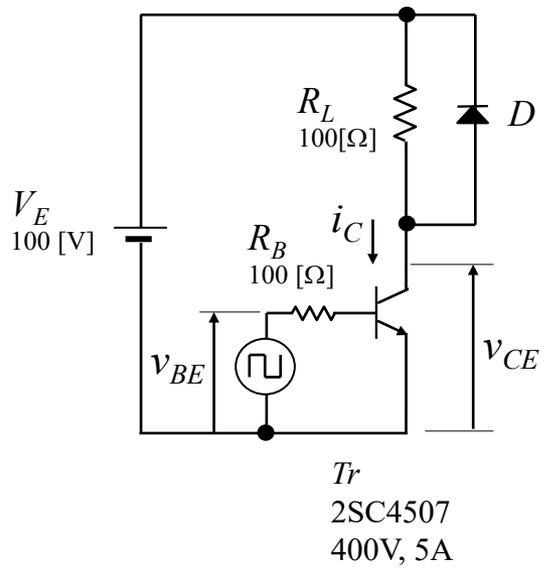


ベースエミッタ間電圧 v_{BE} が負となってもしばらくの間コレクタ電流 i_C が流れ続けている。

Trにおけるスイッチング損失 (実験波形例)

$v_{CE} > 0, i_C > 0$ の期間がある。トランジスタ内の損失となる。
→スイッチング損失 E_{loss} という。

$$E_{loss} = \int v_{CE} i_C dt \quad [J]$$



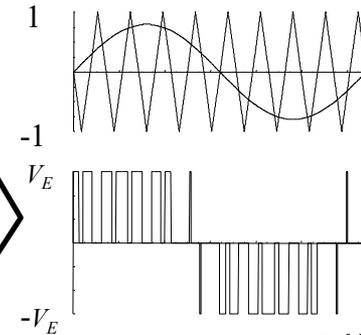
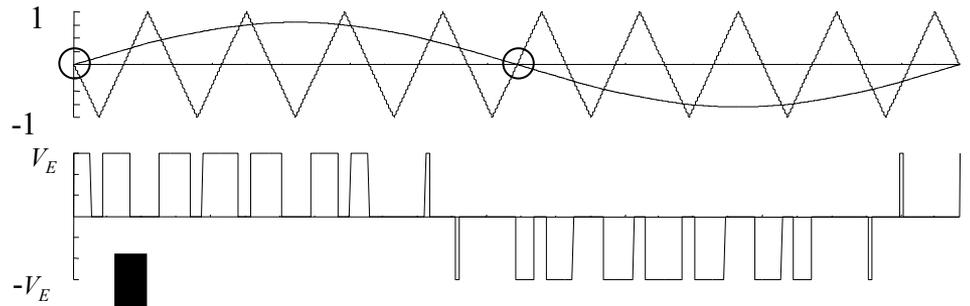
ベースエミッタ間電圧 v_{BE} が負となってもしばらくの間コレクタ電流 i_C が流れ続けている。

高速時における同期モード

スイッチング周波数 f_{sw} が高くなる。
 → スwitching損失が増大する。

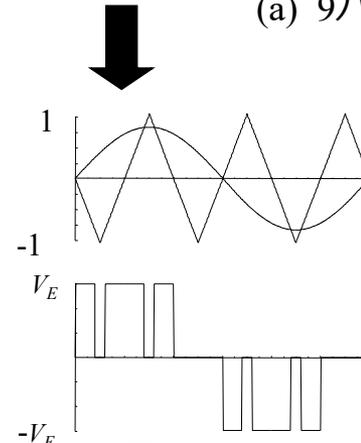
$$P_{loss} = E_{loss} \times f_{sw} \text{ [W]}$$

→ 700系新幹線()

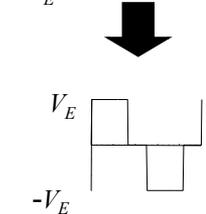


指令電圧の周波数 f_{com} と三角波の繰返し周波数 f_{tri} の比 (f_{com}/f_{tri}) を常に一定に保つ (この例では 1/9)

(a) 9パルス



(b) 3パルス



(c) 1パルス

三角波の繰返し周波数 f_{tri} を 1/3 に低減して,

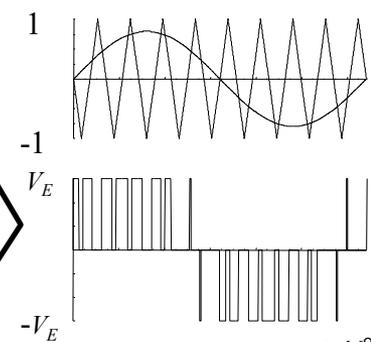
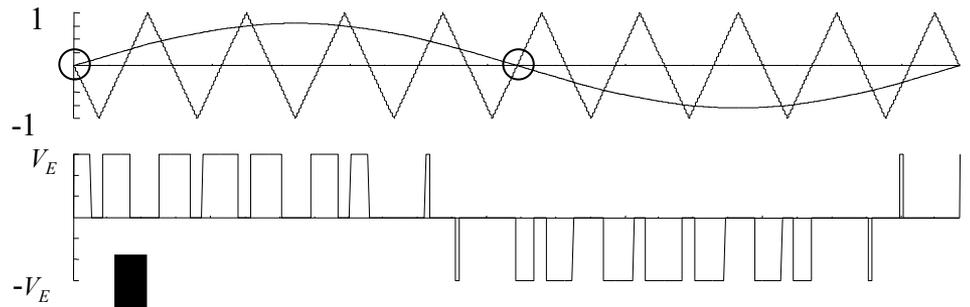
高速時における同期モード

スイッチング周波数 f_{sw} が高くなる。
 → スwitching損失が増大する。

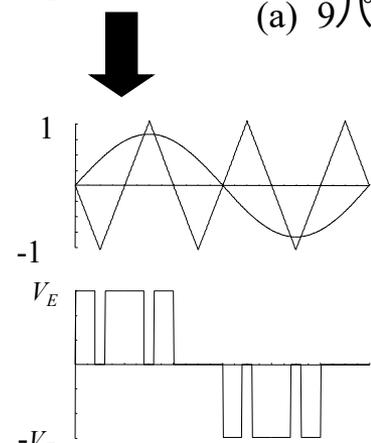
$$P_{loss} = E_{loss} \times f_{sw} \text{ [W]}$$

→ f_{sw} には上限がある。

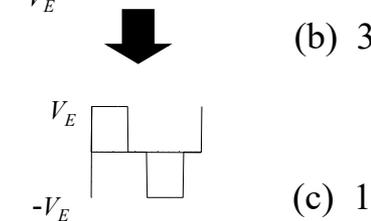
700系新幹線(1.5kHz)



指令電圧の周波数 f_{com} と三角波の繰返し周波数 f_{tri} の比 (f_{com}/f_{tri}) を常に一定に保つ (この例では 1/9)



三角波の繰返し周波数 f_{tri} を 1/3 に低減して、



(a) 9パルス

(b) 3パルス

(c) 1パルス

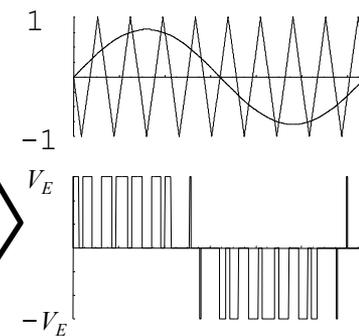
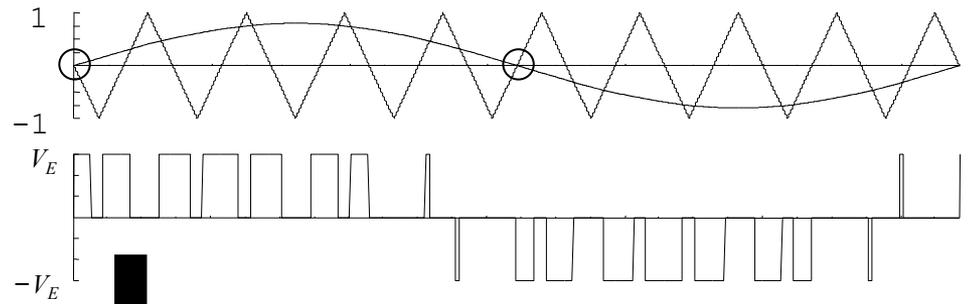
高速時における同期モード

スイッチング周波数 f_{sw} が高くなる。
 → スwitching損失が増大する。

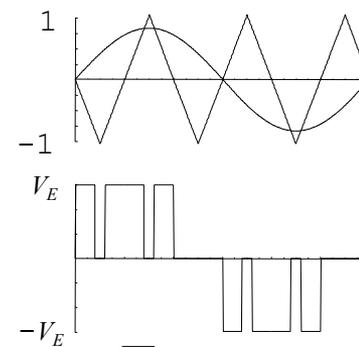
$$P_{loss} = E_{loss} \times f_{sw} \text{ [W]}$$

→ f_{sw} には上限がある。

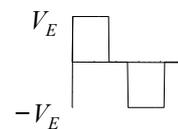
700系新幹線(1.5kHz)



(a) 9パルス



(b) 3パルス

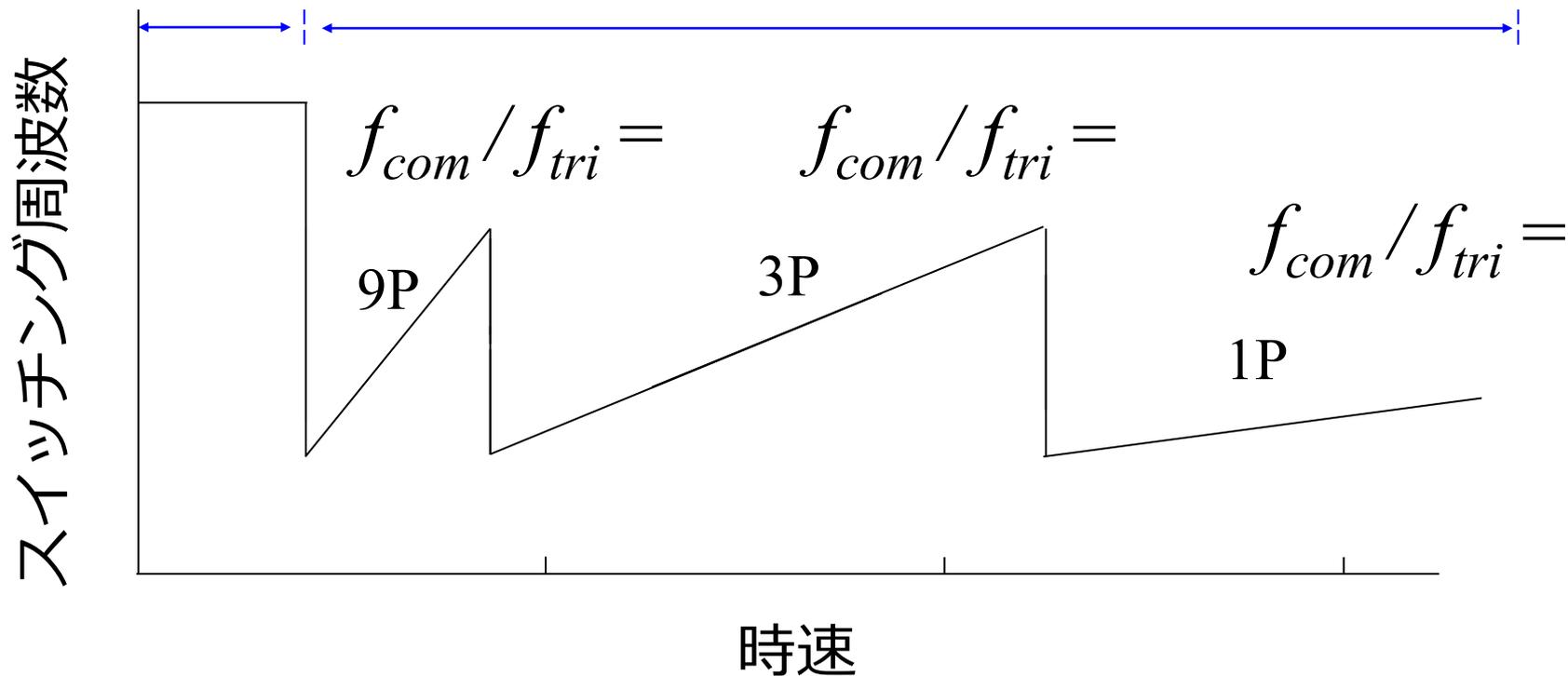


(c) 1パルス

指令電圧の周波数 f_{com} と三角波の繰返し周波数 f_{tri} の比 (f_{com}/f_{tri}) を常に一定に保つ (この例では 1/9)

三角波の繰返し周波数 f_{tri} を 1/3 に低減して、 f_{sw} を下げる。

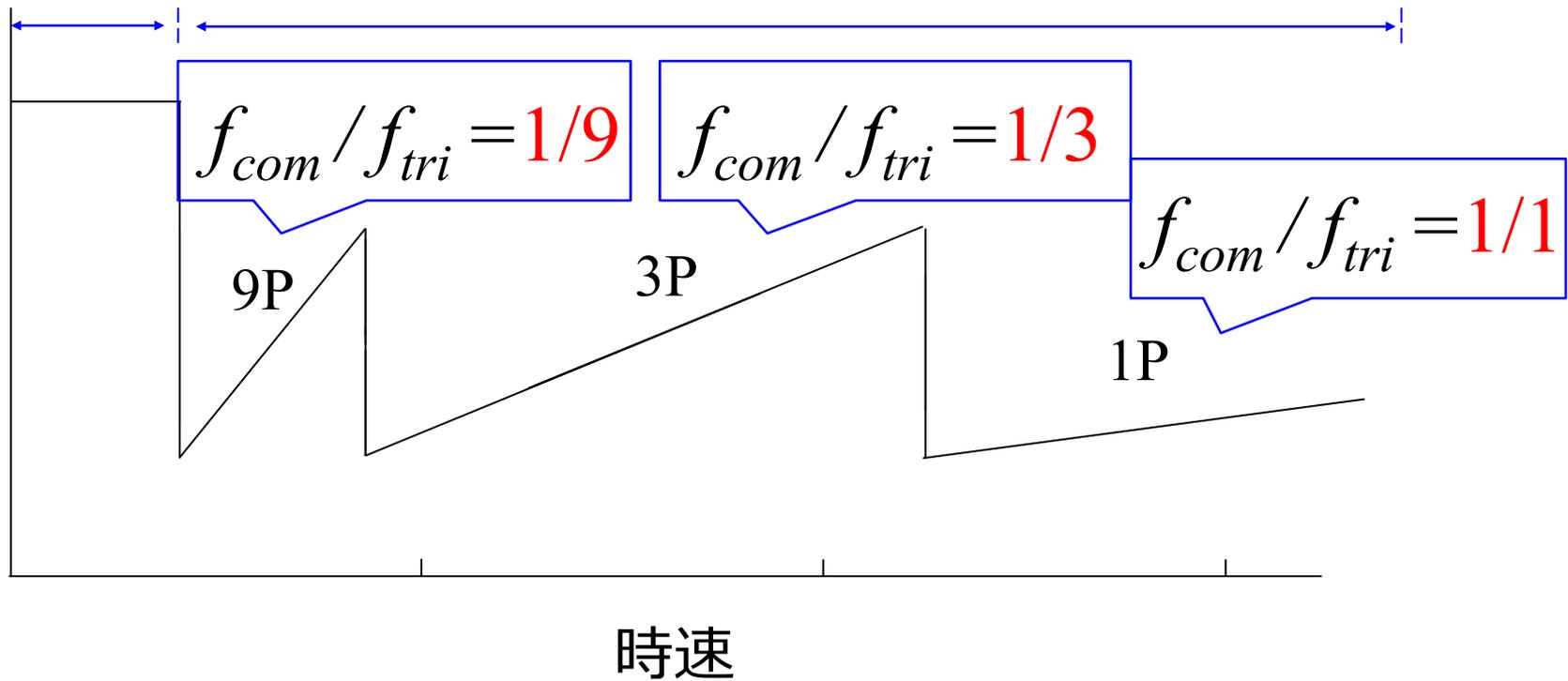
電車におけるパルスモード切替の例



PWMパルスモード切り替えの例

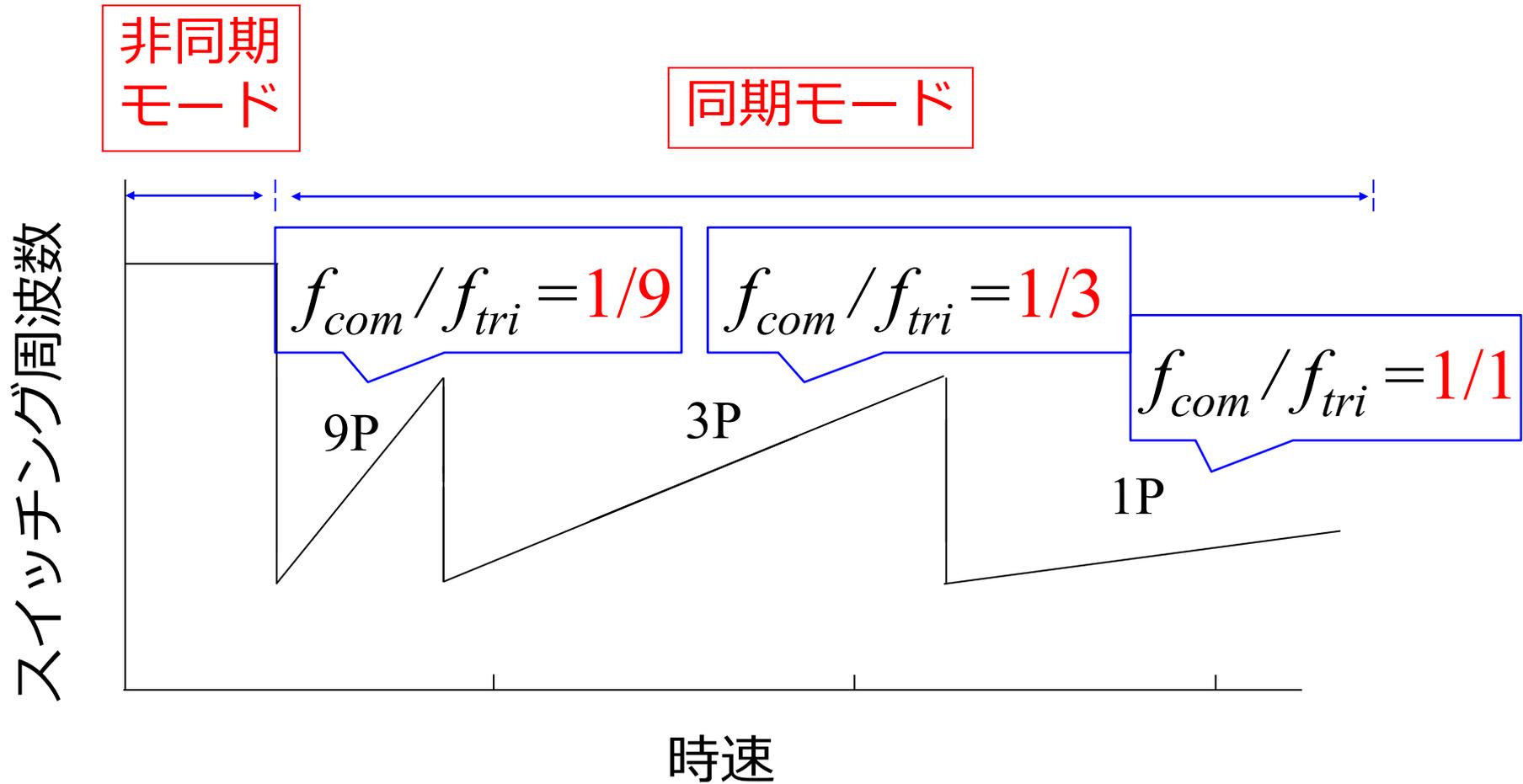
電車におけるパルスモード切替の例

スイッチング周波数



PWMパルスモード切り替えの例

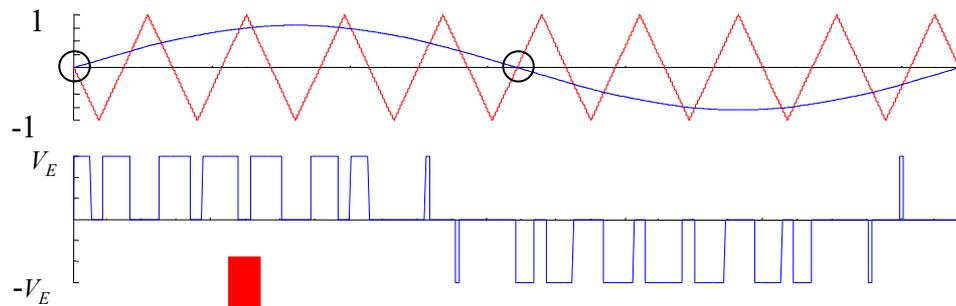
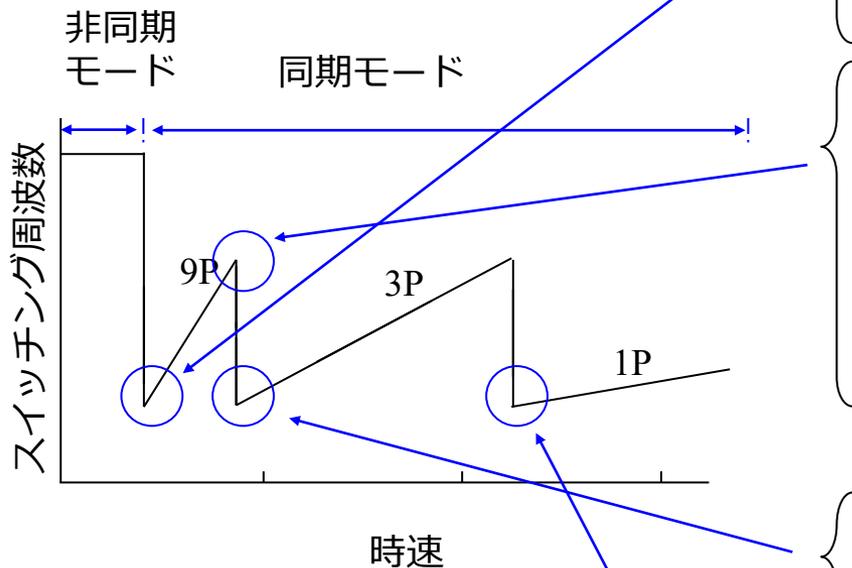
電車におけるパルスモード切替の例



PWMパルスモード切り替えの例

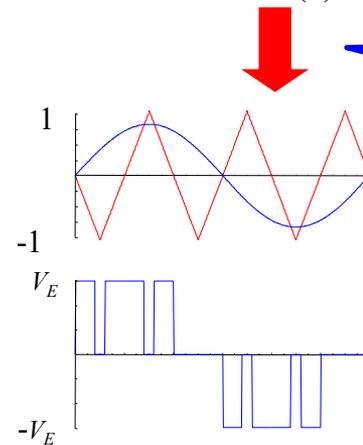
高速時における同期モード

三角波と指令電圧のゼロクロス点が常に一致するようにする。



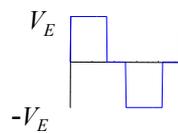
指令電圧の周波数 f_{com} と三角波の繰返し周波数 f_{tri} の比 (f_{com}/f_{tri}) を常に一定に保つ (この例では 1/9)

(a) 9パルス



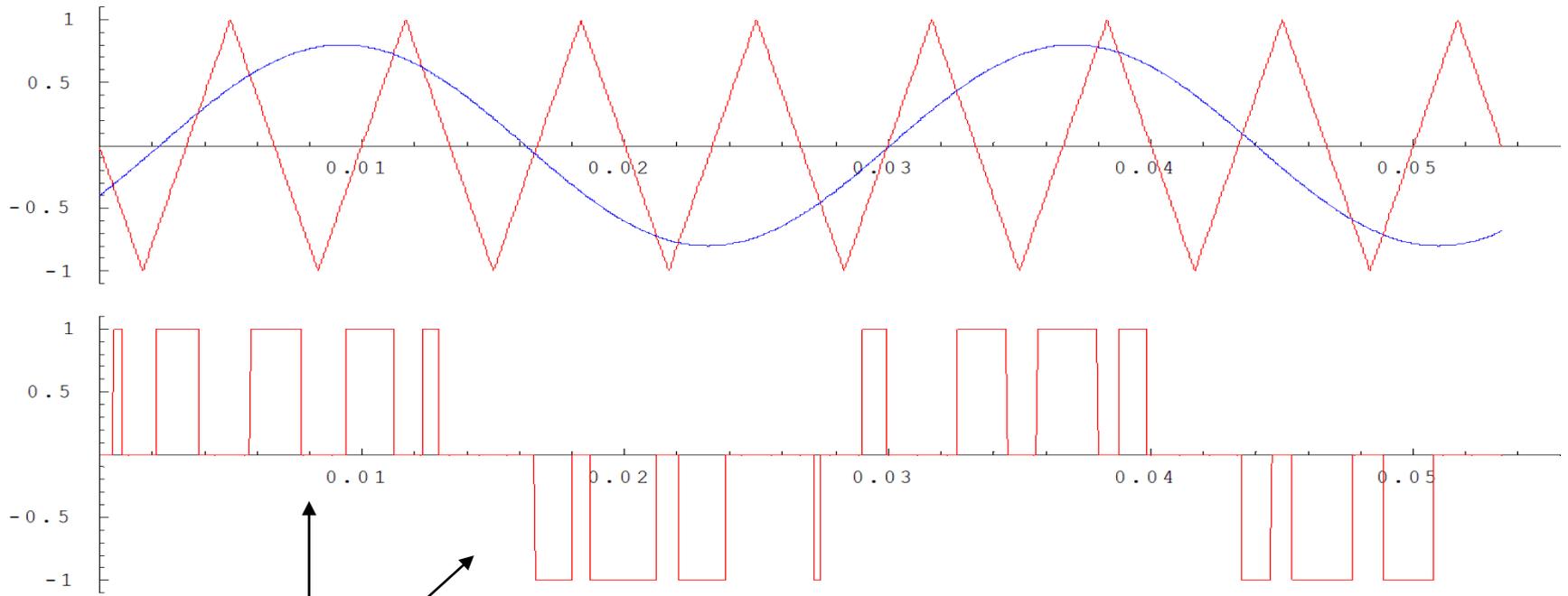
三角波の繰返し周波数 f_{tri} を 1/3 に低減

(b) 3パルス

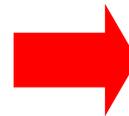


(c) 1パルス

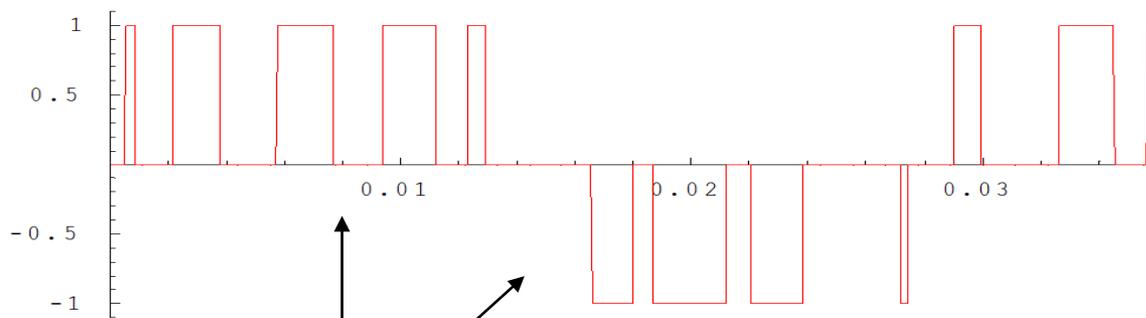
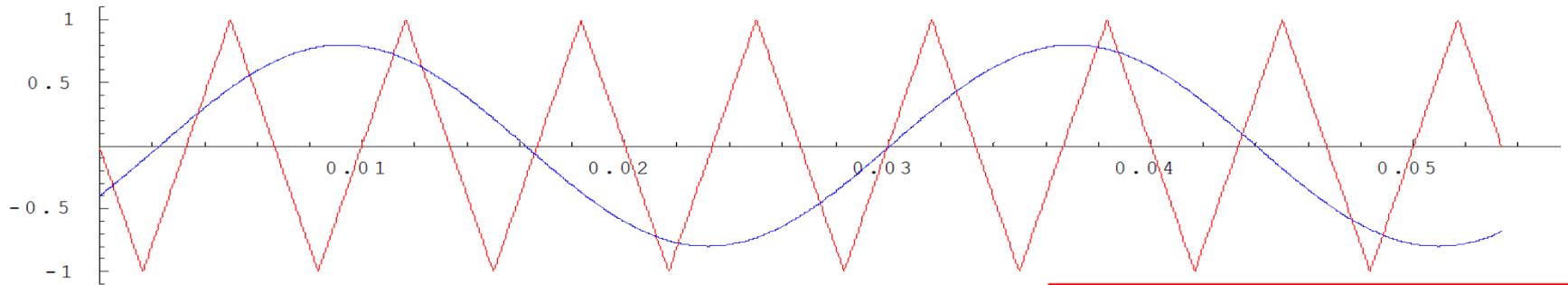
同期がとれないとどうなるか？



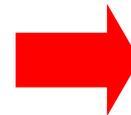
正負非対称
毎周期で波形が異なる。



同期がとれないとどうなるか？



正負非対称
毎周期で波形が異なる。



モータの過熱・振動・騒音

新幹線



出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

100系 (1985～)

設計最高速度：275 km/h

主電動機：直流直巻電動機

制御装置：サイリスタ位相制御

ブレーキ方式：発電ブレーキ併用



出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

300系((1990～)

設計最高速度 285 km/h

主電動機：かご形三相誘導電動機

制御装置：VVVFインバータ制御 (GTOサイリスタ素子) スwitching周波数 420 [Hz]

ブレーキ方式：回生併用

新幹線で初のVVVFインバータ制御を採用。交流モーターの採用により100系の直流モーターと比較して出力は約30%アップしながら質量は約半分になっており、車両全体の軽量化に寄与している。また、VVVFインバータ制御を利用した回生ブレーキも新幹線車両として初めて装備。



出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

500系 (1992～)

設計最高速度 365km/h

主電動機：かご形三相誘導電動機

制御装置：VVVFインバータ制御
(GTOサイリスタ素子)

ブレーキ方式：回生併用



出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

N700系(2005～)

主電動機 かご形三相誘導電動機

制御装置 VVVFインバータ制御 (IGBT)

スイッチング周波数 1.5 [kHz]

ブレーキ方式 回生併用

- ・ 非同期期間

列車発車直後から

300系 約 5秒間

500系 約22秒間

N700系 約25秒間

- ・ 騒音レベル

N700系ではモータの騒音が小さい



<http://tabiris.com/archives/n700s/>

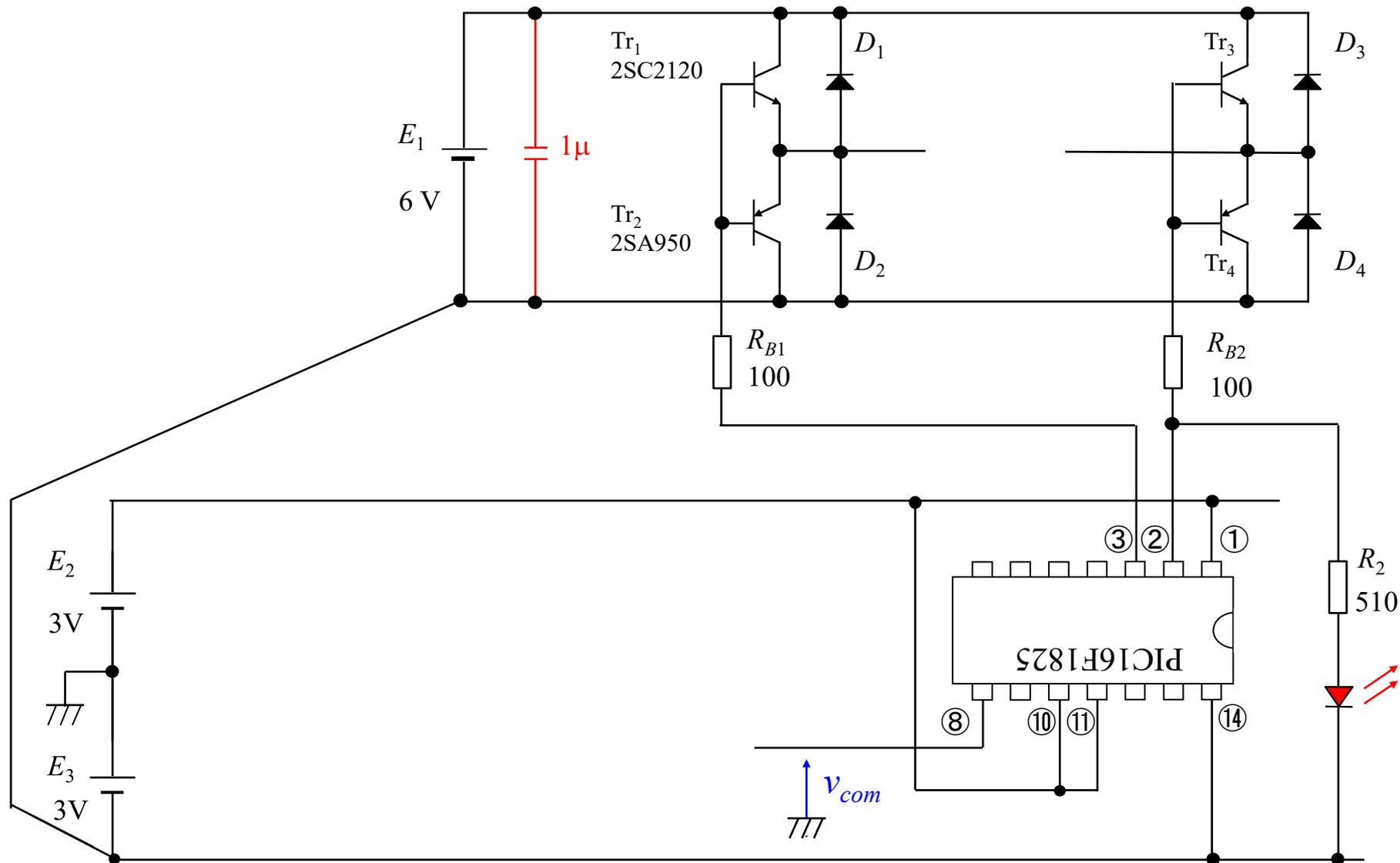
N700S Series(2020~)

Traction Sys. : Inverter (SiC)

STEP11 製作課題 フルブリッジインバータによるモータ駆動

フルブリッジインバータによるDCモータ駆動回路を設計・製作せよ。正転／逆転のどちらでも速度制御ができる回路とせよ。フィードバック制御はPI制御とせよ。また、(10.1)式のPWM制御法はマイコンを以下のように用いればよい。

設計した回路図も一緒に提出してTAのチェックを受けること。



ビデオ

http://mybook-pub-site.sakura.ne.jp/Power_Electronics_Note/Exercise10/Exercise10.mp4

STEP9 製作課題 解答

増幅度 $A_v \leq 100$ の反転増幅回路を設計し，下図のD級アンプ回路を製作せよ。

