

パワーエレクトロニクス

第一回 パワエレ概論と基礎理論

2024年4月10日

授業の予定

- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

授業の目的

- パワエレは省エネを支える基盤技術
 - 「パワエレとは何か？」についての基本を理解
 - 「如何にして電力変換する」かの原理を修得
- 概略
 - パワエレの基礎知識
 - パワー半導体デバイスとその動作
 - 受動素子の役割
 - 電力変換回路の動作

パワエレとは

- 半導体デバイスを用いた電力変換と制御
 - 電圧・電流・周波数を異なる値に替える
 - ACアダプター, モーター制御, 照明輝度
 - エネルギー保存則に従う
 - 理想的には入出力のエネルギーは一致する
 - 実際は各部での損失が生じる
 - パワーデバイス, 受動素子, 配線
 - パワーは一致しない場合がある
 - 一時的に受動素子(L,C)にエネルギーを溜める

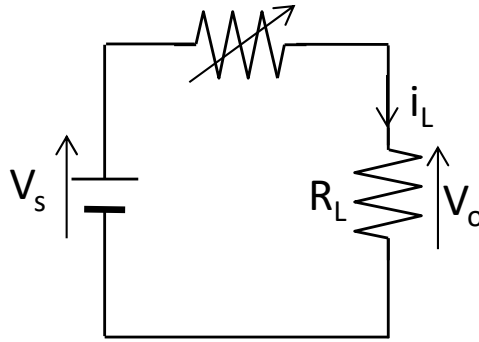
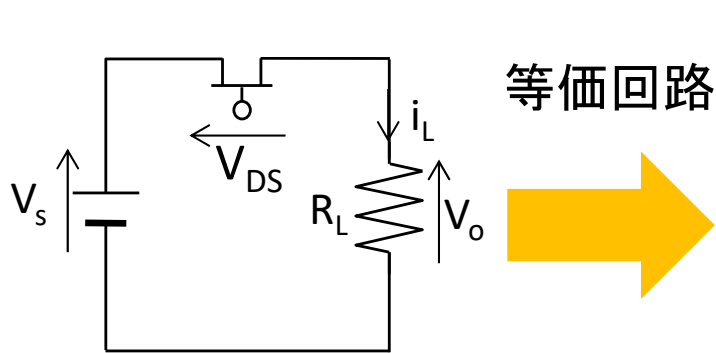
パワエレの対象

- 大電力(GW)
 - 電力機器 直流送電
- 中電力(MW, kW)
 - 産業機器 鉄道, メガソーラー, 鉄鋼圧延ミル
 - 輸送機器 EV, HEV
 - 家電機器 エアコン, 家庭用太陽光発電
- 小電力(W, mW)
 - IT機器 PC, スマホ, IoT

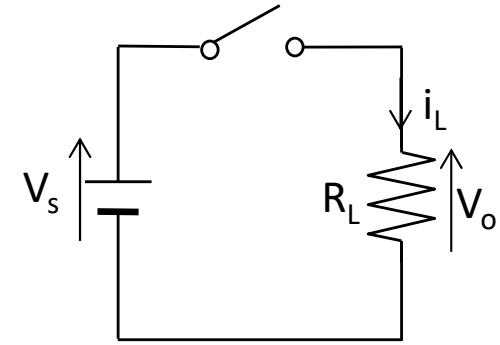
パワエレの学問的位置づけ

- 複合領域
 - 回路理論 アナログ回路兼デジタル回路
 - 制御理論 出力制御
 - 計算機工学 デジタル制御
 - 電子工学 半導体デバイス
 - 電磁気学 トランス, インダクタンス
 - 電力工学 系統連系(太陽光の売電等)
 - 電気機器 モーター
 - 電気化学 バッテリー, キャパシタ
 - 伝熱工学 ヒートシンク

半導体を用いた電力変換

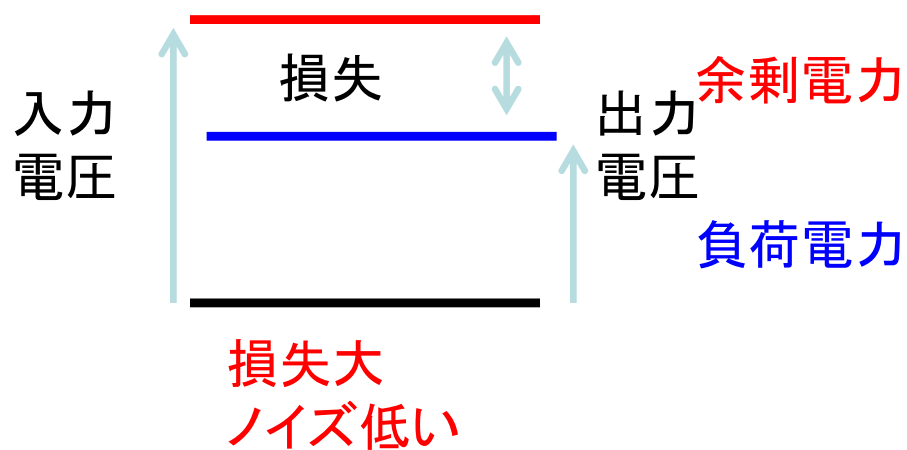


リニアレギュレータ

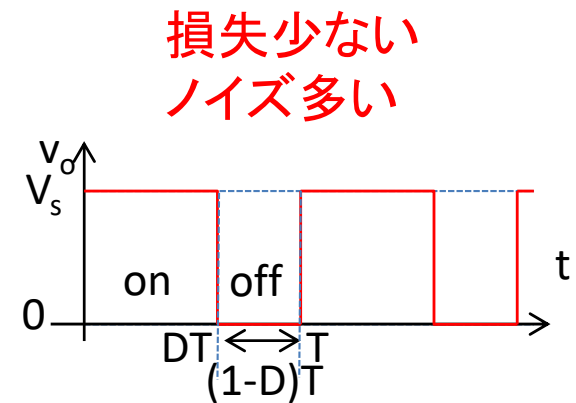


スイッチングレギュレータ

トランジスタは抵抗動作



トランジスタはON/OFF(スイッチ)動作



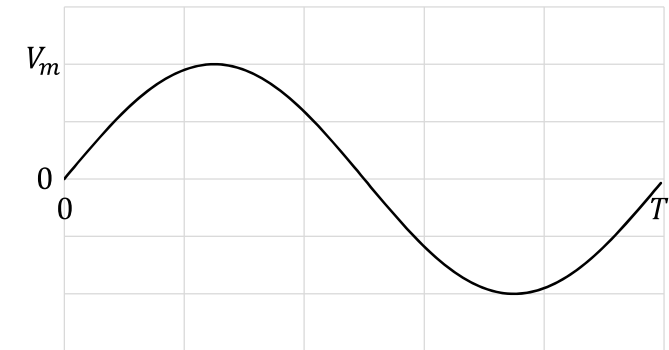
パワーエレ回路の電圧・電流

欲しい出力

直流

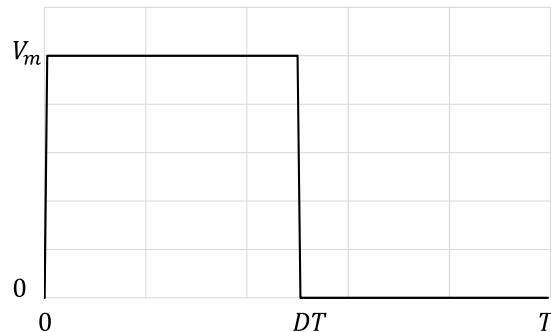


交流



実際に得られる出力

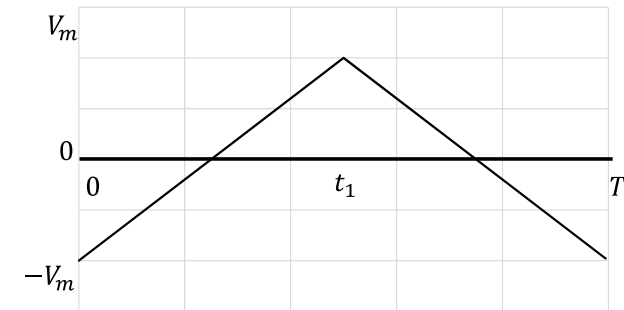
矩形波



フィルターで
不要成分除去



三角波



電力変換回路の状態量

- 電圧・電流・電力・エネルギー

- 瞬時電力: $p(t)$ [W]

- $p(t) = v(t)i(t)$

- 時刻 t における電圧 $v(t)$ [V], 電流 $i(t)$ [A]

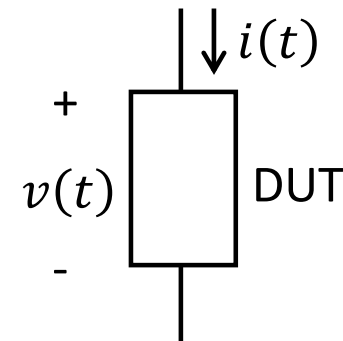
- 電力を消費: $p(t) > 0$

- 電力を発生: $p(t) < 0$

- エネルギー: W [J]

- $W = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$

- 時刻 t_1 から t_2 の間に消費されたエネルギー



電力変換回路の状態量

- 電圧・電流・電力・エネルギー
 - 平均電力: P [W]
 - 周期的に変化する電圧・電流
 - $$P = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} v(t)i(t) dt$$
 - 変化の周期: T [s]
 - 有効電力

電力変換回路の状態量

- 瞬時値

- 直流 $v(t) = V_{dc}$

- 交流 $v(t) = V_{ac} \sin \omega t$

- V_{ac} :振幅, ω :角周波数, t :時間

- 平均値

- 直流 $V_{ave} = V_{dc}$

- 交流 $V_{ave} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{ほしい値を表していない}$

電力変換回路の状態量

- 実効値

- 電圧の2乗平均の平方根(Root Mean Square) V_{rms} と電圧の実効値 V_{eff} の関係

- $V_{eff} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$

- 電流の実効値 I_{rms}

- $I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$

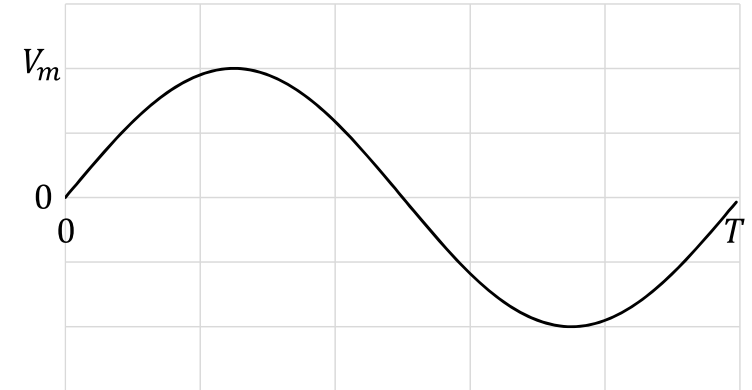
電力変換回路の状態量

- 正弦波交流電圧の実効値

- $$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{V_m \sin \omega t\}^2 dt}$$
$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

- V_m :振幅を, $\omega = \frac{2\pi}{T}$:角周波数

- 電圧の実効値 V_{rms} は振幅 V_m の $\frac{1}{\sqrt{2}}$



電力変換回路の状態量

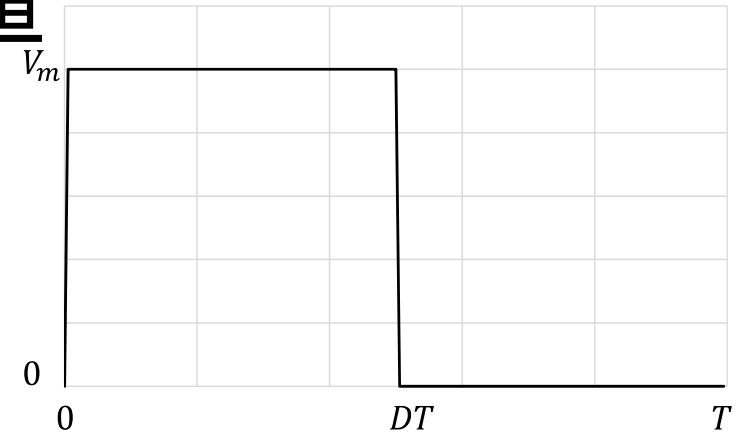
- 高さ V_m の矩形波電圧の実効値

- $$v(t) = \begin{cases} V_m & 0 \leq t < DT \\ 0 & DT \leq t < T \end{cases}$$

- D :通流率, $0 \leq D \leq 1$

- $$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$
$$= V_m \sqrt{D}$$

- D の平方根に比例



電力変換回路の状態量

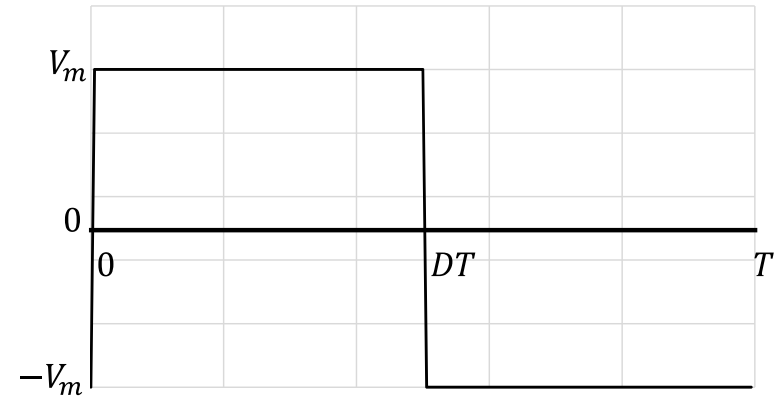
- 振幅 V_m の矩形波交流電圧の実効値

- $$v(t) = \begin{cases} V_m & 0 \leq t < DT \\ -V_m & DT \leq t < T \end{cases}$$

- $$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

$$= V_m$$

- 実効値 V_{rms} は直流電圧と等しい



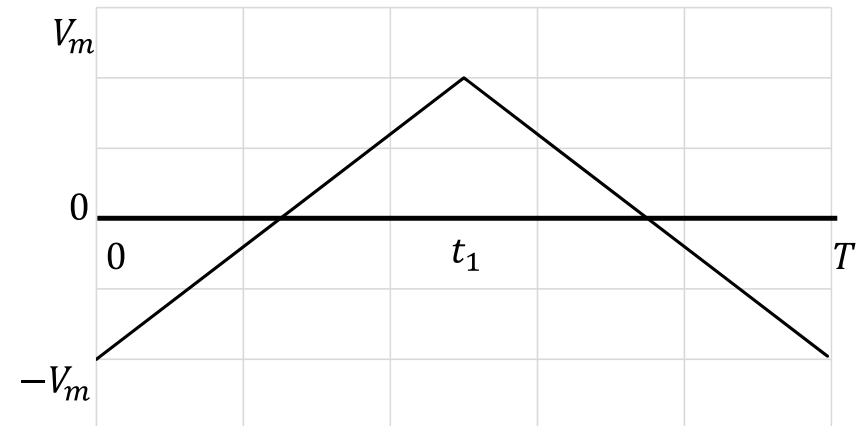
電力変換回路の状態量

- 振幅 V_m の三角波交流電圧の実効値

$$v(t) = \begin{cases} \frac{2V_m}{t_1} t - V_m & 0 \leq t < t_1 \\ \frac{-2V_m}{T-t_1} t + \frac{V_m(T+t_1)}{T-t_1} & t_1 \leq t < T \end{cases}$$

- $V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{3}}$

- 電圧の実効値電圧 V_{rms} は振幅 V_m の $\frac{1}{\sqrt{3}}$



電力変換回路の状態量

- 有効電力と実効値

- 直流電圧 V_{dc} に対する抵抗 R の消費電力

- $P = \frac{V_{dc}^2}{R}$

- 周期的変化する電圧 $v(t)$ に対する抵抗の平均消費電力

- $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v(t)^2}{R} dt = \frac{V_{eff}^2}{R}$

- V_{eff} : 実効値

- $P = \frac{V_{dc}^2}{R} = \frac{V_{eff}^2}{R}$

電力変換回路の状態量

- 皮相電力と実効値
 - 皮相電力: $S[\text{VA}]$ → 単位VAはVolt Ampereに由来
 - $S = V_{rms}I_{rms}$
 - 電圧, 電流実効値 $V_{rms}[\text{V}], I_{rms}[\text{A}]$ の積
- 力率 → pf: power factor
 - 皮相電力 $S[\text{VA}]$ に対する有効電力(平均電力) $P[\text{W}]$ の比
 - $pf = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms}I_{rms}}$

電力変換回路の状態量

- 交流回路における周期定常状態

- $$\begin{cases} v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \\ i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi) \end{cases}$$

- $v(t), i(t), \theta, \phi$: 瞬時電圧, 電流, 位相初期値

- 瞬時電力

- $$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= V_m \cos(\omega t + \theta) I_m \cos(\omega t + \phi) \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \{ \cos(\theta - \phi) - \cos(2\omega t + \theta + \phi) \} \end{aligned}$$

- 2倍の周波数で変化する成分 $\frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \theta + \phi)$

- 時間変化しない成分 $\frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta - \phi) \Rightarrow$ 有効電力

電力変換回路の状態量

- 正弦波交流電圧・電流に対して力率は皮相電力 S と電圧と電流の位相差 $\theta - \phi$ で決まる
 - $P = V_{rms}I_{rms} \cos(\theta - \phi) = S \cos(\theta - \phi)$
- 無効電力 → 単位VarはVolt Ampere reactiveに由来
 - 皮相電力における有効電力に対する直交成分
 - $Q = V_{rms}I_{rms} \sin(\theta - \phi)$
- 有効電力と無効電力および皮相電力の関係
 - $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

電力変換回路の状態量

- 複数の周波数成分が重畳された周期波形
 - 2つの周期の異なる交流電圧 $v_1(t)$, $v_2(t)$ を含む電圧 $v(t) = v_1(t) + v_2(t)$ の実効値
 - $$V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \{v_1(t) + v_2(t)\}^2 dt$$
$$= \frac{1}{T} \int_0^T \{v_1(t)^2 + 2v_1(t)v_2(t) + v_2(t)^2\} dt$$
 - $$\begin{cases} v_1(t) = V_1 \sin(n\omega t + \theta) \\ v_2(t) = V_2 \sin(m\omega t + \phi) \end{cases}$$
 - $n \neq m$ を満たす自然数

電力変換回路の状態量

- $$\begin{aligned} & \int_0^T v_1(t)v_2(t)dt \\ &= \int_0^T V_1 \sin(n\omega t + \theta) V_2 \sin(m\omega t + \phi) dt \\ &= \frac{V_1 V_2}{2} \int_0^T \{ \cos([n - m]\omega t + \theta - \phi) \} - \{ \cos([n + m]\omega t + \theta + \phi) \} dt \\ &= \frac{V_1 V_2}{2} \left[\frac{\sin(\{n - m\}\omega t + \theta - \phi)}{\{n - m\}\omega} - \frac{\sin(\{n + m\}\omega t + \theta + \phi)}{\{n + m\}\omega} \right]_0^T \\ &= 0 \end{aligned}$$
- $$V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1(t)^2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_2(t)^2 dt$$

電力変換回路の状態量

- 付録:正弦波交流電圧の実効値の計算

$$\begin{aligned} \bullet V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{V_m \sin \omega t\}^2 dt} \\ &= V_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{\sin \omega t\}^2 d\omega t} \\ &= V_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right]_0^{2\pi}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

電力変換回路の状態量

- 付録:高さ V_m の矩形波電圧の実効値の計算

- $$v(t) = \begin{cases} V_m & 0 \leq t < DT \\ 0 & DT \leq t < T \end{cases}$$

- D :通流率, $0 \leq D \leq 1$

- $$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ \int_0^{DT} V_m^2 dt + \int_{DT}^T 0^2 dt \right\}} = \sqrt{\frac{1}{T} V_m^2 DT} = V_m \sqrt{D}$$

電力変換回路の状態量

- 付録: 振幅 V_m の矩形波交流電圧の実効値の計算

- $$v(t) = \begin{cases} V_m & 0 \leq t < DT \\ -V_m & DT \leq t < T \end{cases}$$

- $$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ \int_0^{DT} V_m^2 dt + \int_{DT}^T (-V_m)^2 dt \right\}} = \sqrt{\frac{1}{T} V_m^2 \{DT - DT + T\}}$$
$$= V_m$$

電力変換回路の状態量

- 付録: 振幅 V_m の三角波交流電圧の実効値の計算

$$\bullet v(t) = \begin{cases} \frac{2V_m}{t_1} t - V_m & 0 \leq t < t_1 \\ \frac{-2V_m}{T-t_1} t + \frac{V_m(T+t_1)}{T-t_1} & t_1 \leq t < T \end{cases}$$

$$\bullet V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{t_1} \left[\frac{2V_m}{t_1} t - V_m \right]^2 dt + \int_{t_1}^T \left[\frac{-2V_m}{T-t_1} t + \frac{V_m(T+t_1)}{T-t_1} \right]^2 dt \right\}$$
$$= \frac{V_m^2}{T} \left\{ \int_0^{t_1} \left[\frac{2}{t_1} t - 1 \right]^2 dt + \frac{1}{(T-t_1)^2} \int_{t_1}^T [-2t + (T+t_1)]^2 dt \right\}$$

• つづく

電力変換回路の状態量

- 付録: 振幅 V_m の三角波交流電圧の実効値の計算

$$\begin{aligned} & \bullet \int_{t_1}^T [-2t + (T + t_1)]^2 dt = \int_{t_1}^T [4t^2 - 4(T + t_1)t + (T + t_1)^2] dt \\ & = \left[4\frac{t^3}{3} - 4(T + t_1)\frac{t^2}{2} + (T + t_1)^2 t \right]_{t_1}^T \\ & = \frac{4}{3}T^3 - 2(T + t_1)T^2 + (T + t_1)^2 T - \frac{4}{3}t_1^3 + 2(T + t_1)t_1^2 - (T + t_1)^2 t_1 \\ & = \frac{4}{3}(T^3 - t_1^3) - 2(T + t_1)(T^2 - t_1^2) + (T + t_1)^2(T - t_1) \\ & = \frac{4}{3}(T - t_1)(T^2 + Tt_1 + t_1^2) - 2(T + t_1)^2(T - t_1) + (T + t_1)^2(T - t_1) \\ & = \frac{4}{3}(T - t_1)(T^2 + Tt_1 + t_1^2) - (T + t_1)^2(T - t_1) \\ & = \frac{1}{3}(T - t_1)(4T^2 + 4Tt_1 + 4t_1^2 - 3T^2 - 6Tt_1 - 3t_1^2) \\ & = \frac{1}{3}(T - t_1)(T^2 - 2Tt_1 + t_1^2) = \frac{1}{3}(T - t_1)^3 \end{aligned}$$

電力変換回路の状態量

- 付録: 振幅 V_m の三角波交流電圧の実効値の計算

- 振幅 V_m の三角波交流電圧

- $$V_{rms}^2 = \frac{V_m^2}{T} \left\{ \frac{1}{3} t_1 + \frac{1}{(T-t_1)^2} \frac{1}{3} (T-t_1)^3 \right\}$$
$$= \frac{V_m^2}{3T} \{ t_1 + (T-t_1) \} = \frac{V_m^2}{3}$$

- $$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{3}}$$