

# パワーエレクトロニクス 第一回 パワエレ概論

平成31年4月10日

# 授業の予定

- パワーエレクトロニクスに必要な基礎知識
- 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
  - 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
- 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

# 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]

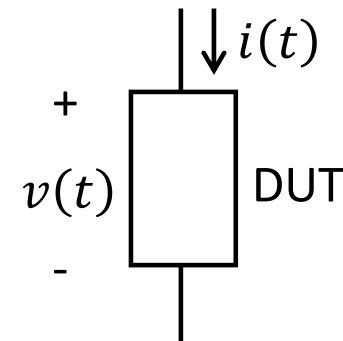
- 電力を消費: $p(t) > 0$

- 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

- 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

- 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

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

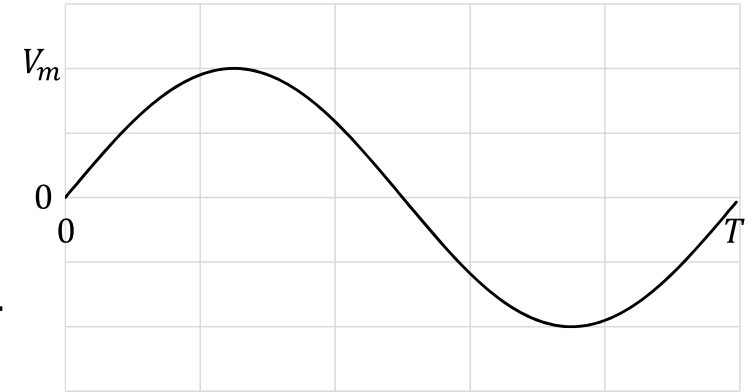
- 電流の実効値 $I_{rms}$

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

# 電力変換回路の状態量

- 正弦波交流電圧の実効値

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



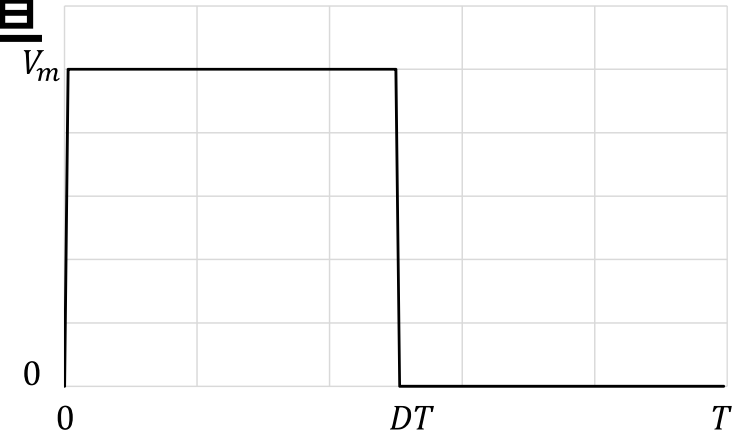
- $V_m$ : 振幅を,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ : 角周波数
- 電圧の実効値  $V_{rms}$  は振幅  $V_m$  の  $\frac{1}{\sqrt{2}}$

# 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,  $0 \leq D \leq 1$



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

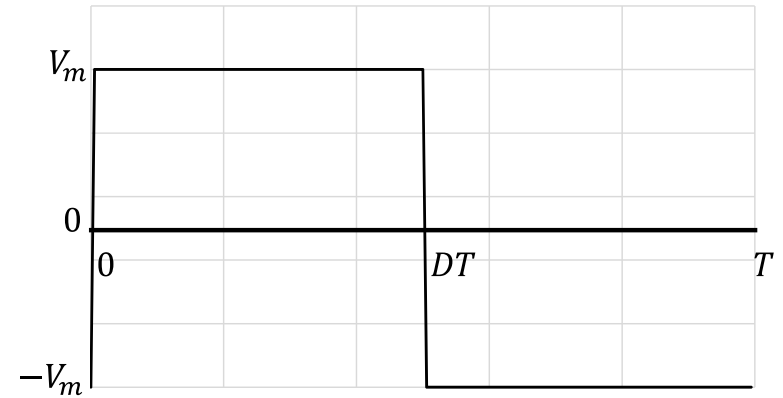
$$= \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ \int_0^{DT} V_m^2 dt + \int_{DT}^T 0^2 dt \right\}} = \sqrt{\frac{1}{T} V_m^2 DT} = V_m \sqrt{D}$$

- $D$ 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

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



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

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

$$= V_m$$

- 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

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

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

- 各項の中身

# 電力変換回路の状態量

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

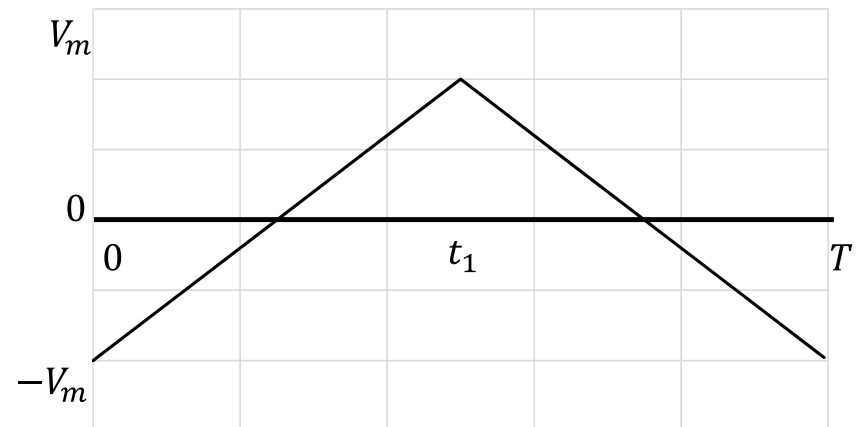
# 電力変換回路の状態量

- 振幅 $V_m$ の三角波交流電圧

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

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

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





# 電力変換回路の状態量

- 皮相電力と実効値

- 皮相電力:  $S[\text{VA}]$

- $S = V_{rms}I_{rms}$

- 電圧, 電流実効値  $V_{rms}[\text{V}], I_{rms}[\text{A}]$  の積

- 力率

- 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
  - 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
    - $$V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \{v_1(t) + v_2(t)\}^2 dt$$
$$= \frac{1}{T} \int_0^T \{v_1(t)^2 + 2v_1(t)v_2(t) + v_2(t)^2\} dt$$
    - $\begin{cases} v_1(t) = \sin(n\omega t + \theta) \\ v_2(t) = \sin(m\omega t + \phi) \end{cases}$ 
      - $n \neq m$ を満たす自然数

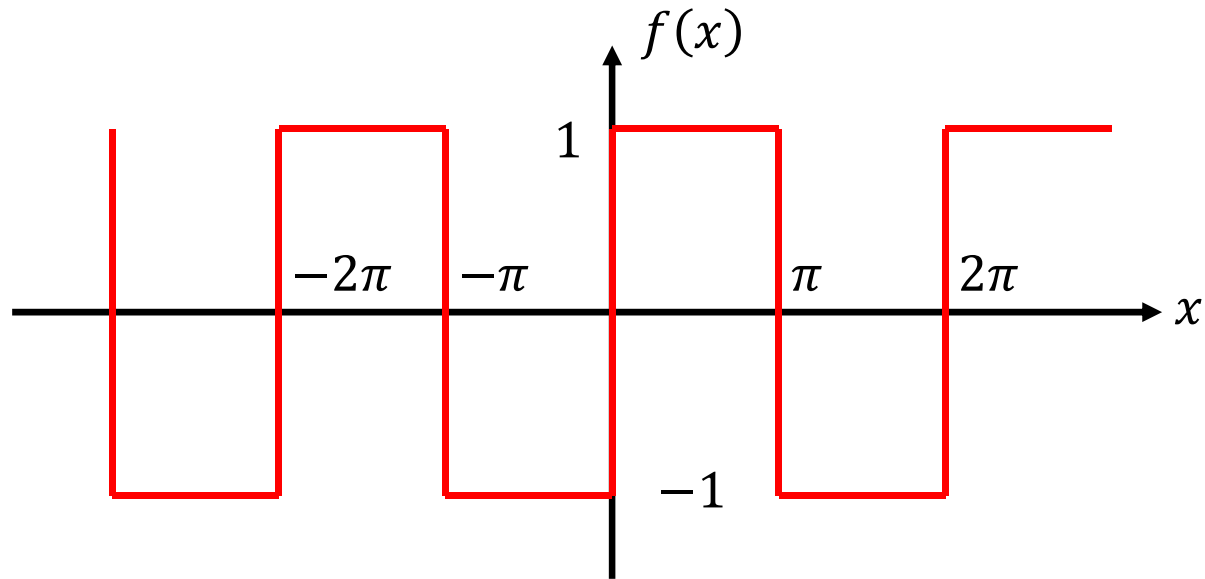
# 電力変換回路の状態量

- $\int_0^T v_1(t)v_2(t)dt$   
 $= \int_0^T \sin(n\omega t + \theta) \sin(m\omega t + \phi) dt$   
 $= \frac{1}{2} \int_0^T \{\cos([n - m]\omega t + \theta - \phi)\} - \{\cos([n + m]\omega t + \theta + \phi)\} dt$   
 $= \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin(\{n - m\}\omega t + \theta - \phi)}{\{n - m\}\omega} - \frac{\sin(\{n + m\}\omega t + \theta + \phi)}{\{n + m\}\omega} \right]_0^T = 0$
- $V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1(t)^2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_2(t)^2 dt$
- $V_{rms} = \sqrt{V_{1,rms}^2 + V_{2,rms}^2 + \dots + V_{n,rms}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n V_{i,rms}^2}$

# 矩形波の周波数成分

- 矩形波

- $f(x) = \begin{cases} -1 & (2n - 1)\pi < x \leq 2n\pi \\ 1 & 2n\pi < x \leq (2n + 1)\pi \end{cases}$



# 歪波交流

- フーリエ級数展開

- 原信号

- $f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$

- 角周波数  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  [rad/sec]

- 実フーリエ級数

- 直流成分

- $$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \\ b_0 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- $n$ 次高調波成分

- $$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega t dt \end{aligned} \right\}$$

# 高調波成分

- 周期 $T$ [sec]に対する周波数 $\frac{1}{T}$ [Hz]の $n$ 倍の周波数成分 $f_n(t)$

- $f_n(t) = a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t$

- $$= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \left\{ \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos n\omega t + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \sin n\omega t \right\}$$

- 位相 $\theta_n$

振幅 $c_n$

- $$\left. \begin{aligned} \cos \theta_n &= \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \\ \sin \theta_n &= \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \end{aligned} \right\}$$

$$c_n = |f_n(t)| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\begin{aligned} f_n(t) &= c_n \{ \sin \theta_n \cos n\omega t + \cos \theta_n \sin n\omega t \} \\ &= c_n \sin(n\omega t + \theta_i) \end{aligned}$$



# 矩形波の周波数成分

- 直流成分

- $$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 -1 dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} 1 dx \\ &= -\frac{1}{\pi} [x]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} [x]_0^{\pi} \\ &= -\frac{1}{\pi} \pi + \frac{1}{\pi} \pi \\ &= 0 \end{aligned}$$

# 矩形波の周波数成分

- $n$ 次の高調波成分(cosの係数)

$$\begin{aligned} \bullet a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 -\cos nx \, dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos nx \, dx \\ &= -\frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} \sin nx \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} \sin nx \right]_0^{\pi} \\ &= -\frac{1}{\pi} 0 + \frac{1}{\pi} 0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

# 矩形波の周波数成分

- $n$ 次の高調波成分(sinの係数)

$$\begin{aligned} \bullet \quad b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 -\sin nx \, dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sin nx \, dx \\ &= -\frac{1}{\pi} \left[ -\frac{1}{n} \cos nx \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} \left[ -\frac{1}{n} \cos nx \right]_0^{\pi} \\ &= \frac{1}{n\pi} [1 - \cos(-n\pi)] - \frac{1}{n\pi} [\cos(n\pi) - 1] \\ &= \frac{2}{n\pi} [1 - \cos(-n\pi)] \end{aligned}$$

# 矩形波の周波数成分

- $n$ 次の高調波成分(sinの係数)

$$\begin{aligned} \bullet \quad b_n &= \frac{2}{n\pi} [1 - \cos(-n\pi)] \\ &= \frac{2}{n\pi} [1 - (-1)^n] \\ &= \begin{cases} \frac{4}{n\pi} & n = 2m - 1 \\ 0 & n = 2m \end{cases} \end{aligned}$$

# 矩形波の周波数成分

- フーリエ級数展開

- $$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx$$
$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1)x$$
$$= \frac{4}{\pi} \left\{ \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right\}$$

# 複数周波数成分を含む実効値

- 実効値

- $F_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt}$

- $f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$

- $F_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sum_{i=0}^{\infty} c_i \sin(i\omega t + \theta_i) \right]^2 dt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\infty} c_i^2}{2}}$

- 実効値  $F_{eff}$  は各周波数成分の振幅  $c_i$  の二乗和の平方根に比例

# 複数の周波数成分が含まれる電圧・電流に対する皮相電力

- 電圧・電流

- $$\left. \begin{aligned} v(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} V_i \sin(i\omega t + \theta_i) \\ i(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} I_i \sin(i\omega t + \phi_i) \end{aligned} \right\}$$

- 平均電力

- $$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sum_{i=0}^{\infty} V_i \sin(i\omega t + \theta_i) \right] \left[ \sum_{j=0}^{\infty} I_j \sin(j\omega t + \phi_j) \right] dt \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} V_i I_i \cos(\theta_i - \phi_i) \end{aligned}$$

- 異なる周波数成分の電圧 $V_i$ ・電流 $I_j$ 積により得られる平均電力は0
- 同じ周波数の電圧 $V_i$ ・電流 $I_i$ 積による成分のみが有効電力