

パワーエレクトロニクス 第二回 パワエレ概論

平成30年4月18日

授業の予定

シラバスより

- 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(2回)
- 整流回路(2回)
- 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(2回)
- 演習

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

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

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 θ_n

振幅 c_n

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

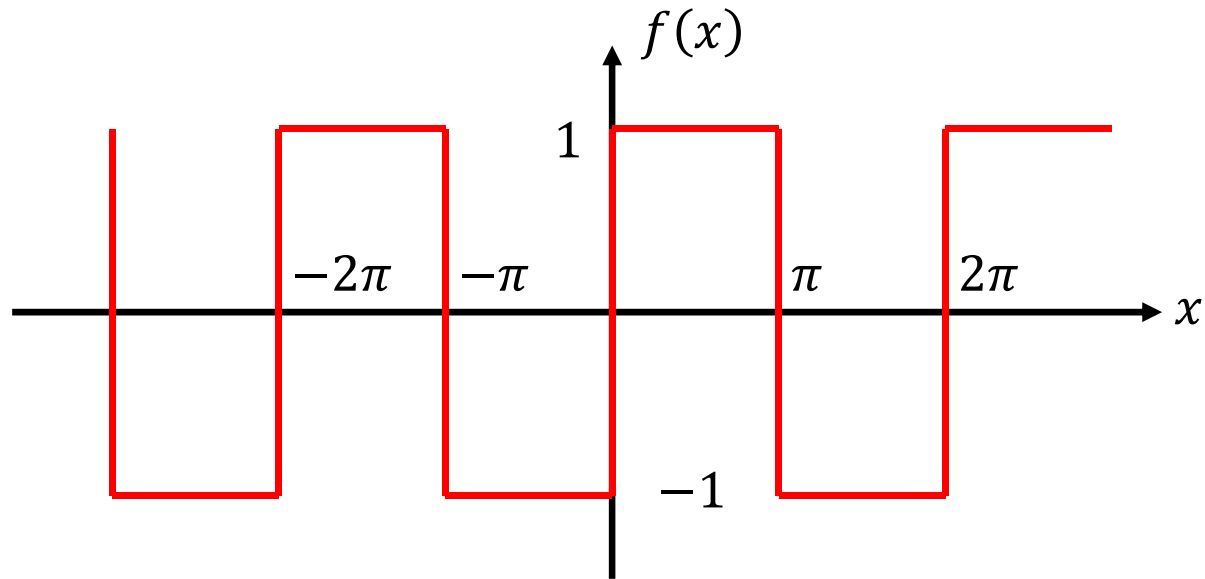
$$c_n = |f_n(t)| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

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

矩形波の周波数成分

- 矩形波

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



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

非線形回路で生じる高調波と電力

- 印加電圧: 振幅 V_1 [V], 角周波数 ω [rad/sec], 位相初期値 θ_1 [rad]
 - $v(t) = V_1 \sin(\omega t + \theta_1)$
- 正弦波電圧を印加した場合に生じる歪電流: I_i : i 次成分電流振幅, ϕ_i : 位相初期値
 - $i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} I_i \sin(i\omega t + \phi_i)$
- 平均電力
 - $$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$
$$= \frac{1}{T} \int_0^T V_1 \sin(\omega t + \theta_1) \left[\sum_{j=0}^{\infty} I_j \sin(j\omega t + \phi_j) \right] dt$$
$$= \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \phi_1)$$
 - 平均電力 P [W] は印加した電圧の周波数成分のみで生じる

歪波に対する諸量

- 電流実効値 I_{rms}

$$\bullet I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} I_{i,rms}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\infty} I_i^2}{2}}$$

- 負荷力率 pf

$$\begin{aligned} \bullet pf &= \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{V_{1,rms} I_{1,rms} \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_{1,rms} I_{rms}} \\ &= \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos(\theta_1 - \phi_1) \end{aligned}$$

- 平均電力 P [W] は変わらない
- 基本波成分のみに比べて力率 pf が $\frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$ 倍される

歪波に対する諸量

- 歪率 DF :電流波形の歪の程度

- $DF = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$

- 実効値に対する基本波の比

- 歪力率 pf_d

- $pf_d = DF \cos(\theta_1 - \phi_1)$

- 総合歪率 THD

- $THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0,\neq 1}^{\infty} I_i^2}{I_{1,rms}^2}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} = \sqrt{\frac{1}{DF^2} - 1}$

歪波に対する諸量

- 歪電流に対する無効電力 Q [VAr]
 - $Q = \frac{1}{2} V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \phi_1)$
 - 基本波成分に対する成分で表される
- 基本波以外の電流成分に対する歪電力 D
 - $D = V_{rms} \sqrt{\sum_{i=0, \neq 1}^{\infty} I_{i,rms}^2}$
- 皮相電力 S [VA], 有効電力 P [W], 無効電力 Q [VAr]の関係
 - $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

歪波に対する諸量

- 歪電流波形の平均値 I_{avg}
- 歪電流波形の尖頭値 I_{peak}
- 波形率 FF (Form Factor)
 - $FF = \frac{I_{rms}}{I_{avg}}$
- 波高率 CF (Crest Factor)
 - $CF = \frac{I_{peak}}{I_{rms}}$