パワーエレトクロニクス
（舟木担当分）

第二回

続ダイオード整流回路
•全波整流回路
•倍電圧整流回路

平成17年6月6日 月曜日　3限目

単相半波整流回路

- 容量負荷の補足
  - リップル（脈動）成分を求める
    - 直流出力電圧最大値　$e_{d-\max} = \sqrt{2}V$
    - 直流出力電圧最小値　$e_{d-\min} = \sqrt{2}V\sin\theta_{on}$
    - 電圧脈動幅　$\Delta V = e_{d-\max} - e_{d-\min} = \sqrt{2}V - \sqrt{2}V\sin\theta_{on}$
      $= \sqrt{2}V(1-\sin\theta_{on})$
    - 仮定により簡略化し，脈動幅を求める
      - 仮定　平滑コンデンサ容量が十分大きい　$\theta_{off} \cong \frac{\pi}{2}$
        ちょっと苦しいけど　$\theta_{on} \cong \frac{\pi}{2}$

$$\sin\theta_{on} = \sin\theta_{off}\, e^{-\frac{1}{R\omega C}(2\pi+\theta_{on}-\theta_{off})} = \sin\tfrac{\pi}{2}\, e^{-\frac{1}{R\omega C}(2\pi+\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{2})} = e^{-\frac{2\pi}{R\omega C}}$$

– 電圧脈動幅　$\Delta V = \sqrt{2}V(1-\sin\theta_{on}) = \sqrt{2}V\left(1-e^{-\frac{2\pi}{R\omega C}}\right)$

» RC大で脈動が小さくなる

$$e^{-\frac{2\pi}{R\omega C}} \cong 1-\frac{2\pi}{R\omega C} \quad \Rightarrow \quad \Delta V \cong \sqrt{2}V\frac{2\pi}{R\omega C}$$

単相半波整流回路

- 容量負荷の補足
  - ダイオード電流ピーク値を求める
    - 整流回路は容量負荷にパルス状の電流を流す
      - ダイオード電流

$$i_d = i_R + i_c = \frac{e_d}{R} + C\frac{d}{dt}e_d = \tfrac{1}{R}\sqrt{2}V\sin\omega t + C\omega\sqrt{2}V\cos\omega t$$

» 導通期間が小さい場合 T=π/2付近 $i_d \cong \tfrac{1}{R}\sqrt{2}V + C\omega\sqrt{2}V\cos\omega t$

– ダイオードの導通期間Δtを求める

$$\sqrt{2}V\sin\left(\tfrac{\pi}{2}-\omega\Delta t\right) = \sqrt{2}V\cos\omega\Delta t = \sqrt{2}V - \Delta V \cong \sqrt{2}V\left(1-\tfrac{2\pi}{R\omega C}\right)$$

$$\cos\omega\Delta t \cong 1-\tfrac{2\pi}{R\omega C}$$

$$\cos x \cong 1-\tfrac{1}{2}x^2 \quad \Rightarrow \quad 1-\frac{1}{2}(\omega\Delta t)^2 \cong 1-\frac{2\pi}{R\omega C} \quad \Rightarrow \quad \Delta t \cong 2\sqrt{\tfrac{\pi}{R\omega^3 C}}$$

単相半波整流回路

- 容量負荷の補足
  - ダイオード電流を求める
    - ダイオード平均電流 i_{c-ave}
      - 平滑コンデンサへの充電電荷

$$Q_{charge} = C\Delta V = i_{c-ave}\Delta t$$

$$i_{c-ave} = C\tfrac{\Delta V}{\Delta t} = C\frac{\sqrt{2}V\frac{2\pi}{R\omega C}}{2\sqrt{\frac{\pi}{R\omega^3 C}}} = V\sqrt{\frac{2\pi\omega C}{R}}$$

– ダイオードピーク電流

$$\begin{aligned} i_{d-\max} &= i_d\left(\tfrac{\pi}{2}-\Delta t\right) = C\omega\sqrt{2}V\cos\omega\Delta t + \tfrac{\sqrt{2}V}{R} \\ &= C\omega\sqrt{2}V\left(1-\tfrac{2\pi}{R\omega C}\right) + \tfrac{\sqrt{2}V}{R} \\ &= \sqrt{2}V\left(\omega C - \tfrac{2\pi}{R} + \tfrac{1}{R}\right) \end{aligned}$$

- Cが大きいと電流が大きくなる

単相半波整流回路の応用

- 二相半波整流回路
  - 回路図
  - 変圧器のセンタータップを用いて，単相半波整流回路を並列接続
    - 高調波低減
    - 変圧器の利用率低
    - 整流素子の必要耐圧が大
  - 電圧電流波形の図

波形は全波整流回路と同様になるので，後で説明

単相全波整流回路

- 交流の正負両半サイクルを利用
- 回路形状からHブリッジと呼ばれる
  - 抵抗負荷
    - 出力直流電圧を求める
      - 電源電圧 $v=\sqrt{2}V\sin\omega t$
      - 直流出力電圧e_dの平均値E_dは？

•回路図
•電圧・電流波形の図

$$E_d=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}e_d\,d\omega t=\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi}v\,d\omega t+\int_{\pi}^{2\pi}-v\,d\omega t\right]$$

$$=\frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi}\sqrt{2}V\sin\omega t\,d\omega t$$

$$=\frac{\sqrt{2}V}{\pi}\left[-\cos\omega t\right]_0^{\pi}=\frac{\sqrt{2}V}{\pi}\left[1+1\right]$$

$$\therefore E_d=\frac{2\sqrt{2}V}{\pi}$$

半波整流回路の2倍電圧

単相全波整流回路

- 抵抗負荷
  - 出力電圧波形に含まれる高調波
    - 出力電圧e_dのフーリエ級数展開

0ではない
（半波整流との相違）

$$E_{dk}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}e_d e^{-jk\omega t}d\omega t$$

$$=\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi}ve^{-jk\omega t}d\omega t+\int_{\pi}^{2\pi}-ve^{-jk\omega t}d\omega t\right]$$

$$=\frac{\sqrt{2}V}{\pi}\left[\int_0^{\pi}\sin\omega t e^{-jk\omega t}d\omega t-\int_{\pi}^{2\pi}\sin\omega t e^{-jk\omega t}d\omega t\right]$$

$$=\frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\int_{0,2\pi}^{\pi,\pi}\left[e^{j(1-k)\omega t}-e^{-j(1+k)\omega t}\right]d\omega t$$

単相全波整流回路

- 抵抗負荷
  - 出力電圧波形に含まれる高調波
    - 出力電圧e_dのフーリエ級数展開

$k\neq\pm1$

$$E_{dk}=\frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\left[\frac{e^{j(1-k)\omega t}}{j(1-k)}+\frac{e^{-j(1+k)\omega t}}{j(1+k)}e^{-j(1+k)\omega t}\right]_{0,2\pi}^{\pi,\pi}$$

$k=1$

$$E_{dk}=\frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\int_{0,2\pi}^{\pi,\pi}\left[1-e^{-j2\omega t}\right]d\omega t$$

$$=\frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\left[\omega t+\frac{1}{j2}e^{-j2\omega t}\right]_{0,2\pi}^{\pi,\pi}=0$$

$k=-1$

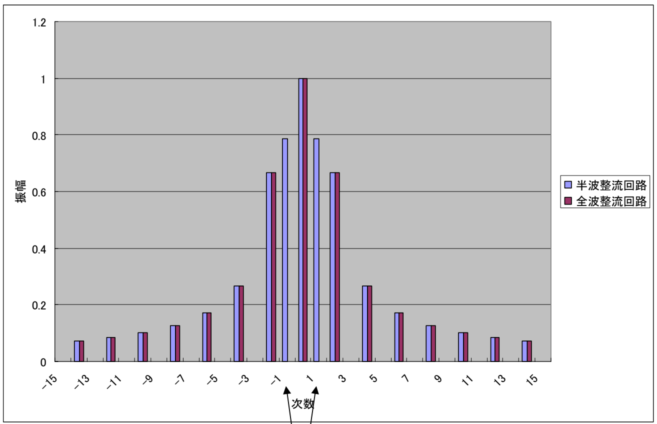
$$E_{dk}=\frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\int_{0,2\pi}^{\pi,\pi}\left[e^{j2\omega t}-1\right]d\omega t$$

0になる
（半波整流との違い）

$$=\frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\left[\frac{1}{j2}e^{j2\omega t}-\omega t\right]_{0,2\pi}^{\pi,\pi}=0$$

単相全波整流回路

- 抵抗負荷
  - 出力電圧波形に含まれる高調波
    - 出力電圧e_dのフーリエ級数展開



但し，平均直流電圧を1として規格化

全波整流回路では±1次の成分が抑制された

単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 電源電圧

$$v = \sqrt{2}V \sin \omega t$$

    - 全波整流時の導通角　360度
      - 半波整流時の導通角　> 180度
    - 周期定常状態を求めてみよう
      - ダイオードは順方向バイアス電圧印加で導通（点弧）（後の講義で行うサイリスタの場合合点弧制御可能）
        - » D1, D1’導通時（0≦ωt ≦π，v≧0）

$$e_d = L\frac{d}{dt}i_d + Ri_d = v$$

        - » D2, D2’導通時（π≦ωt ≦2π，v≦0）

$$e_d = L\frac{d}{dt}i_d + Ri_d = -v$$

•回路図

•電圧波形

単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 周期定常状態を求めてみよう
      - 解析条件
        - » D1,D1’導通時とD2,D2’導通時は極性が異なる半波対称（直流出力は同極性）

$$e_d(\omega t) = e_d(\omega t + \pi) = e_d(\omega t + 2\pi)$$

        - » D1,D1’からD2, D2’への転流時（ωt＝π）に電流は連続

$$i_d(0) = i_d(\pi)$$

      - ラプラス変換を用いて回路方程式を求解する(t=0基準)

単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 周期定常状態を求めてみよう

$$v = \sqrt{2}V \sin \omega t = L \tfrac{d}{dt} i_d + R i_d \qquad v_{t=0} = 0$$

$$\sqrt{2}V \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} = LsI_d - Li_{d0} + RI_d \qquad i_{dt=0} \neq 0$$ 連続導通

$$I_d(Ls + R) = \frac{\sqrt{2}V\omega}{s^2 + \omega^2} + Li_{d0}$$

$$I_d = \sqrt{2}V \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{Ls + R} + \frac{Li_{d0}}{Ls + R}$$

$$I_d = \frac{\sqrt{2}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left(\frac{\omega L}{s + \frac{R}{L}} - \omega L \frac{s}{s^2 + \omega^2} + R \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) + \frac{i_{d0}}{s + \frac{R}{L}}$$

単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 周期定常状態を求めてみよう

$$i_d = \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left(\omega L e^{-\frac{R}{L}t} - \omega L\cos\omega t + R\sin\omega t\right) + i_{d0}e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{R}{L}t} - \cos\omega t\right) + R\sin\omega t\right] + i_{d0}e^{-\frac{R}{L}t}$$

– 半波対称・電流連続条件

$$i_d(0) = i_{d0} = i_d(\pi) = \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{R}{L}\pi} - \cos\pi\right) + R\sin\pi\right] + i_{d0}e^{-\frac{R}{L}\pi}$$

$$i_{d0}\left(1 - e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}\right) = \frac{\sqrt{2}V\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\left(1 + e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}\right)$$

単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 周期定常状態を求めてみよう

– 電流初期値 $i_{d0} = \dfrac{\sqrt{2}V\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\dfrac{1+e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}$

$$i_d = \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{R}{L}t} - \cos\omega t\right) + R\sin\omega t\right] + \frac{\sqrt{2}V\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\frac{1+e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}e^{-\frac{R}{L}t}$$

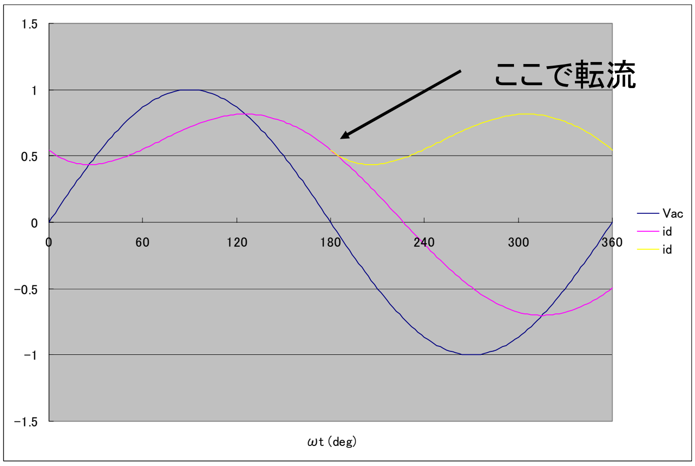
$$= \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{R}{L}t}\left\langle 1 + \frac{1+e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}\right\rangle - \cos\omega t\right) + R\sin\omega t\right]$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(\frac{2}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}e^{-\frac{R}{L}t} - \cos\omega t\right) + R\sin\omega t\right]$$

•電流波形

単相全波整流回路

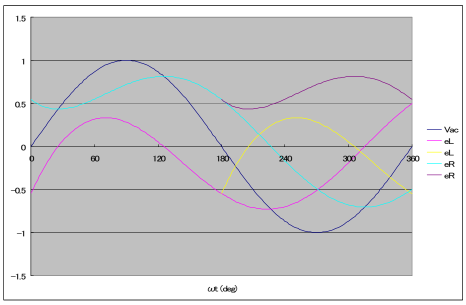
- 誘導負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 出力電流波形



単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 各部の電圧波形を求める
    - 負荷抵抗電圧
      - 電流と相似波形　$e_R = Ri_d$
    - インダクタ電圧

$$e_L = L\frac{d}{dt}i_d = \frac{\sqrt{2}\omega LV}{R^2+\omega^2L^2}\left[-R\left(\frac{2}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}e^{-\frac{R}{L}t} - \cos\omega t\right) + \omega L\sin\omega t\right]$$



単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 直流出力電圧平均値
    - インダクタ電圧
      - 定常状態では，エネルギーの入出力が均衡

$$
\begin{aligned}
E_L &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} e_L d\omega t \\
&= \frac{1}{\pi}\frac{\sqrt{2}\omega LV}{R^2+\omega^2L^2}\left[-R\left(\frac{2}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}\frac{-\omega L}{R}e^{-\frac{R}{L}t}-\sin\omega t\right)-\omega L\cos\omega t\right]_0^{\pi} \\
&= \frac{1}{\pi}\frac{\sqrt{2}\omega LV}{R^2+\omega^2L^2}\left[R\left(\frac{2}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}}}\frac{\omega L}{R}\left\langle e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}-1\right\rangle\right)-\omega L(-1-1)\right] \\
&= \frac{1}{\pi}\frac{\sqrt{2}\omega^2L^2V}{R^2+\omega^2L^2}[-2+2]=0
\end{aligned}
$$

単相全波整流回路

- 誘導負荷
  - 直流出力電圧平均値
    - 負荷抵抗電圧
      - 電流と相似波形

$$
\begin{aligned}
E_d &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} e_d d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} Ri_d d\omega t \\
&= \frac{R}{\pi}\frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(\frac{2}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}\frac{-\omega L}{R}e^{-\frac{R}{\omega L}t}-\sin\omega t\right)-R\cos\omega t\right]_0^{\pi} \\
&= \frac{R}{\pi}\frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(\frac{2}{1-e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}}\frac{-\omega L}{R}\left\langle e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}-1\right\rangle\right)-R(-1-1)\right] \\
&= \frac{R}{\pi}\frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[2\frac{\omega^2L^2}{R}+2R\right]=R\frac{2\sqrt{2}V}{\pi}
\end{aligned}
$$

抵抗負荷時と同じ

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - 回路の動作
    - D1, D1’導通（D2, D2’非導通）
      - 図
    - D2, D2’導通（D1, D1’非導通）
      - 図
    - D1, D1’, D2, D2’非導通
      - 図
  - 半波整流回路容量性負荷同様に求解
    - 導通の条件が一周期に二回

•回路図

•電圧波形

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 電源電圧

$$v = \sqrt{2}V \sin \omega t$$

    - 導通期間中，負荷電圧は電源電圧と等しい
      - オンは，電源電圧と負荷電圧が等しくなった時点
      - オン時，Cを充電するため大電流が流れる（可能性）

$$e_d = v \qquad i_d = i_C + i_R = C\frac{d}{dt}e_d + \frac{e_d}{R}$$

    - 非導通期間中，RCで閉回路を構成
      - Rを介してCが放電

$$i_C = -i_R \qquad i_R = -C\frac{d}{dt}e_d$$

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - 出力波形を求める(半周期分)
    - 導通開始点　θ_{on}
      - コンデンサ電圧初期値をv_{c0}とする

$$v = v_{C0} = \sqrt{2}V \sin\theta_{on}$$

    - 導通終了点　θ_{off}
      - i_dが0となる
      - 導通期間中　　$e_d = v$

$$i_d\left(\omega t = \theta_{off}\right) = C\frac{d}{dt}e_d + \frac{e_d}{R} = 0$$

$$C\sqrt{2}V\omega\cos\theta_{off} + \frac{\sqrt{2}V\sin\theta_{off}}{R} = 0$$

$\frac{\pi}{2} < \theta_{off}$　になるので

$$\therefore \theta_{off} = \pi - \arctan R\omega C$$

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - 出力波形を求める
    - 非導通期間中

$$i_R = -C\frac{d}{dt}e_d \qquad \frac{e_d}{R} = -C\frac{d}{dt}e_d$$

$$\frac{E_d}{R} = -C\left(sE_d - e_{d0}\right)$$

但し　$e_{d0} = \sqrt{2}V\sin\theta_{off}$

$$E_d = \frac{e_{d0}}{s + \frac{1}{RC}}$$

    - 非導通開始点θ_{off}
      - 出力電圧　　$e_d = e_{d0}e^{-\frac{1}{R\omega C}\left(\omega t - \theta_{off}\right)}$

•波形の図

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - 出力波形を求める
    - v_{c0}とe_{d0}の接続条件（非導通→導通時点） 半波整流との相違

$$e_d(\omega t = \pi + \theta_{on}) = e_{d0} e^{-\frac{1}{R\omega C}(\pi+\theta_{on}-\theta_{off})} = v_{c0}$$

$$v_{c0} = e_{d0} e^{-\frac{1}{R\omega C}(\pi+\theta_{on}-\theta_{off})}$$

$$v_{C0} = \sqrt{2}V \sin\theta_{on} \quad e_{d0} = \sqrt{2}V \sin\theta_{off} \quad より$$

$$\sqrt{2}V \sin\theta_{on} = \sqrt{2}V \sin\theta_{off} e^{-\frac{1}{R\omega C}(\pi+\theta_{on}-\theta_{off})}$$

$$\sin\theta_{on} = \sin\theta_{off} e^{-\frac{1}{R\omega C}(\pi+\theta_{on}-\theta_{off})}$$

の解としてθ_{on}が求まる

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - リップル（脈動）成分を求める
    - 直流出力電圧最大値 $e_{d-\max} = \sqrt{2}V$
    - 直流出力電圧最小値 $e_{d-\min} = \sqrt{2}V \sin\theta_{on}$
    - 電圧脈動幅 $\Delta V = e_{d-\max} - e_{d-\min} = \sqrt{2}V - \sqrt{2}V \sin\theta_{on}$
      $= \sqrt{2}V(1-\sin\theta_{on})$
    - 仮定により簡略化し，脈動幅を求める
      - 仮定　平滑コンデンサ容量が十分大きい $\theta_{off} \cong \frac{\pi}{2}$
        ちょっと苦しいけど $\theta_{on} \cong \frac{\pi}{2}$

$$\sin\theta_{on} = \sin\theta_{off} e^{-\frac{1}{R\omega C}(\pi+\theta_{on}-\theta_{off})} = \sin\tfrac{\pi}{2} e^{-\frac{1}{R\omega C}(\pi+\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{2})} = e^{-\frac{\pi}{R\omega C}}$$

      - 電圧脈動幅 $\Delta V = \sqrt{2}V(1-\sin\theta_{on}) = \sqrt{2}V\left(1-e^{-\frac{\pi}{R\omega C}}\right)$
        - » RC大で脈動が小さくなる

$$e^{-\frac{\pi}{R\omega C}} \cong 1 - \frac{\pi}{R\omega C} \quad \Rightarrow \quad \Delta V \cong \sqrt{2}V \frac{\pi}{R\omega C}$$

半波整流の半分

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - ダイオード電流ピーク値を求める
    - 整流回路は容量負荷にパルス状の電流を流す
      - ダイオード電流

$$i_d = i_R + i_c = \frac{e_d}{R} + C\frac{d}{dt}e_d = \tfrac{1}{R}\sqrt{2}V\sin\omega t + C\omega\sqrt{2}V\cos\omega t$$

» 導通期間が小さい場合
T=π /2付近

$$i_d \cong \tfrac{1}{R}\sqrt{2}V + C\omega\sqrt{2}V\cos\omega t$$

– ダイオードの導通期間Δtを求める

$$\sqrt{2}V\sin\left(\tfrac{\pi}{2}-\omega\Delta t\right) = \sqrt{2}V\cos\omega\Delta t = \sqrt{2}V - \Delta V \cong \sqrt{2}V\left(1-\tfrac{\pi}{R\omega C}\right)$$

$$\cos\omega\Delta t \cong 1-\tfrac{\pi}{R\omega C}$$

$$\cos x \cong 1-\tfrac{1}{2}x^2 \;\Rightarrow\; 1-\frac{1}{2}(\omega\Delta t)^2 \cong 1-\frac{\pi}{R\omega C} \;\Rightarrow\; \Delta t \cong \sqrt{\tfrac{2\pi}{R\omega^3 C}}$$

単相全波整流回路

- 容量負荷
  - ダイオード電流を求める
    - ダイオード平均電流 i_{c-ave}
      - 平滑コンデンサへの充電電荷

$$Q_{charge} = C\Delta V = i_{c-ave}\Delta t$$

$$i_{c-ave} = C\tfrac{\Delta V}{\Delta t} = C\frac{\sqrt{2}V\frac{\pi}{R\omega C}}{2\sqrt{\frac{\pi}{R\omega^3 C}}} = V\sqrt{\frac{\pi\omega C}{2R}}$$

– ダイオードピーク電流

$$\begin{aligned} i_{d-\max} &= i_d\left(\tfrac{\pi}{2}-\Delta t\right) = C\omega\sqrt{2}V\cos\omega\Delta t + \tfrac{\sqrt{2}V}{R} \\ &= C\omega\sqrt{2}V\left(1-\tfrac{\pi}{R\omega C}\right) + \tfrac{\sqrt{2}V}{R} \\ &= \sqrt{2}V\left(\omega C - \tfrac{\pi}{R} + \tfrac{1}{R}\right) \end{aligned}$$

- 半波整流の半分ぐらいの電流

負荷に対する単相全波整流回路の比較

- 抵抗負荷
  - 導通角 =360度（全導通）
- 誘導性負荷
  - 導通角 =360度（全導通）
    - 出力電圧平均値は抵抗負荷と同じ
    - 抵抗負荷より脈動成分小
      - 抵抗負荷より出力電圧・電流に含まれる高調波小
- 容量性負荷
  - 導通角 < 360度
    - 平滑コンデンサへの入力電流に含まれる高調波大
    - 平滑コンデンサが，出力電圧の高調波を低減

倍電圧整流回路

- 単相全波2倍電圧整流回路
  - 絵
  - 動作
    - ダイオードの逆耐圧は交流電圧の三倍以上必要
    - 半波整流回路出力の合成
    - 脈動成分は電源周波数の2倍
- 単相半波2倍電圧整流回路
  - コッククロフト・ウォルトン回路とも言う
  - 絵
  - 動作
    - 脈動成分は電源周波数と同じ