パワーエレトクロニクス

（舟木担当分）

第一回
ダイオード整流回路
-半波整流回路-

平成17年5月30日月曜日　3限目

パワーエレクトロニクス授業構成

- ダイオード整流回路（二回）
  - 回路方式
  - 抵抗負荷・誘導負荷・容量負荷
- サイリスタ逆変換・整流回路（二回）
  - 回路方式
  - 点弧角制御
  - 転流
- 自励式変換器（二回）
  - 回路方式
  - 制御方式
  - 高調波
- 時間に余裕があれば
  - サイクロコンバータ
  - マトリックスコンバータ

ダイオード

- ダイオードの種類
  - 整流用ダイオード
    - 電力用
    - 検波用
  - 定電圧ダイオード
  - 発光ダイオード
  - 可変容量ダイオード
  - トンネルダイオード
- ダイオードの材料
  - Si
  - Se
  - Ge
  - SiC

回路記号の絵

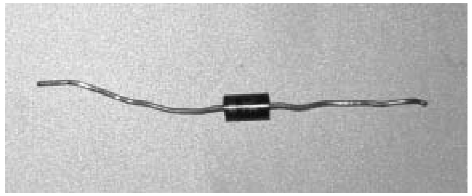
半導体整流器が出現する以前に用いられていた二極管

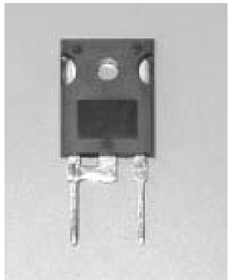
http://homepage.mac.com/ryomasuda/VT/num/02/index.html

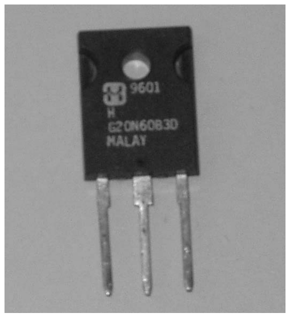
ダイオード

- パワエレでよく用いるダイオード
  - PN接合ダイオード
    - 整流用
      - 10D1　100V1A0.9V（IF=1A）
    - 大容量
  - PiNダイオード
    - 高耐圧
    - ファストリカバリ
  - ショットキダイオード
    - 低順方向電圧降下
    - 短逆回復時間
    - 漏れ電流大

VI特性の絵

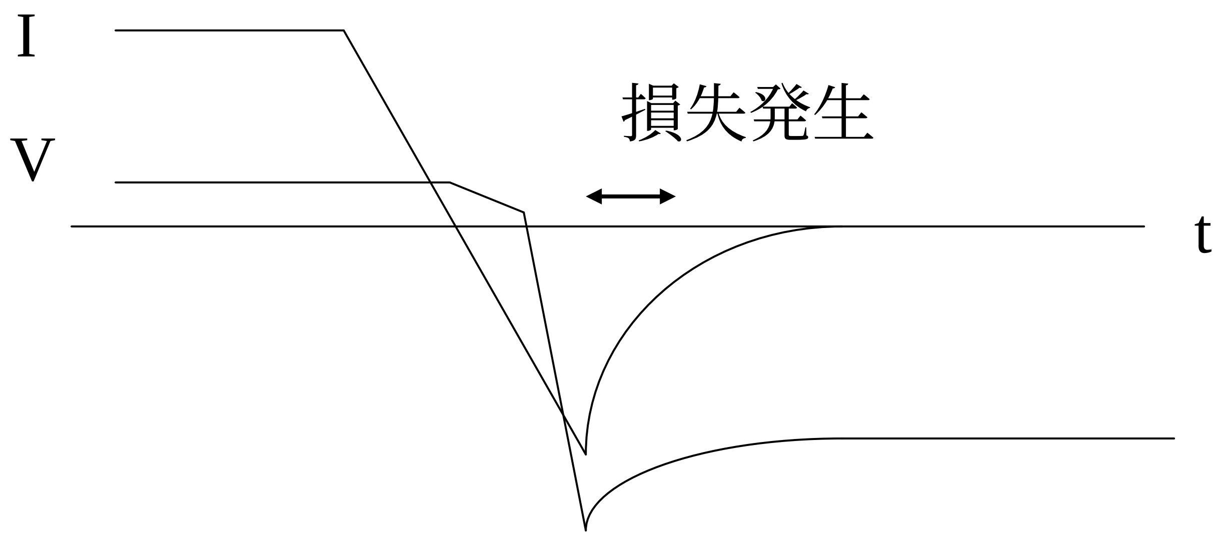






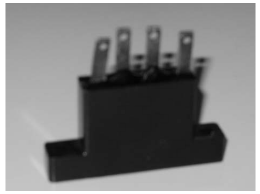
ダイオードのスイッチング時の応答

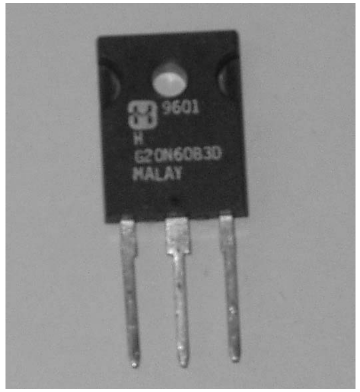
- 導通・非導通状態は瞬時には切り替わらない
  - 逆回復電流
    - スイッチング損失
      - 高周波になるほど深刻な問題



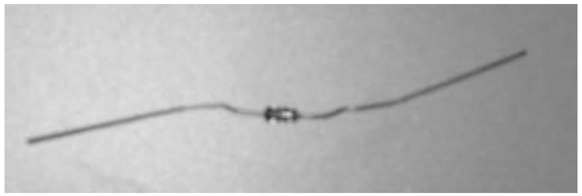
整流回路に用いるダイオード

- ダイオードブリッジ
  - 単相フルブリッジ
  - 三相フルブリッジ
  - ハーフブリッジ





おまけ　ツェナダイオード(定電圧用）



ダイオードを用いた整流回路

- 相数
  - 単相
  - 多相（三相）
- 交流波形の利用形式
  - 全波整流回路
  - 半波整流回路
- その他
  - 倍電圧整流回路
- 負荷
  - 抵抗
  - 誘導性
  - 容量性

整流回路は，電子機器の電源に不可欠な技術

単相半波整流回路

- 抵抗負荷
  - 出力直流電圧を求める
    - 電源電圧

$$v = \sqrt{2}V \sin wt$$

    - 直流出力電圧e_dの平均値E_dは？

$$E_d = \frac{1}{2p}\int_0^{2p} e_d dwt = \frac{1}{2p}\left[\int_0^{p} vdwt + \int_p^{2p} 0dwt\right]$$

$$= \frac{1}{2p}\int_0^{p} \sqrt{2}V \sin wtdwt$$

$$= \frac{V}{\sqrt{2}p}\left[-\cos wt\right]_0^p = \frac{V}{\sqrt{2}p}\left[1+1\right]$$

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

    - 直流電流の平均値は同様に

$$\therefore I_d = \frac{E_d}{R}$$

•回路図
•電圧 •電流波形の図

単相半波整流回路

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

$$E_{dk} = \frac{1}{2p}\int_0^{2p} e_d e^{-jkwt} dwt = \frac{1}{2p}\left[\int_0^{p} v e^{-jkwt} dwt + \int_p^{2p} 0 e^{-jkwt} dwt\right]$$

$$= \frac{V}{\sqrt{2}p}\int_0^{p} \sin wt e^{-jkwt} dwt$$

$$\sin wt = \frac{e^{jwt} - e^{-jwt}}{2j}$$ より

$$E_{dk} = \frac{V}{\sqrt{2}p}\int_0^{p} \frac{e^{jwt} - e^{-jwt}}{2j} e^{-jkwt} dwt$$

$$= \frac{V}{j2\sqrt{2}p}\int_0^{p} \left[e^{j(1-k)wt} - e^{-j(1+k)wt}\right] dwt$$

単相半波整流回路

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

$k \neq \pm 1$

$$E_{dk} = \frac{V}{j2\sqrt{2}p}\left[\frac{e^{j(1-k)wt}}{j(1-k)} + \frac{e^{-j(1+k)wt}}{j(1+k)}\right]_0^p$$

$k = 1$

$$E_{dk} = \frac{V}{j2\sqrt{2}p}\int_0^p \left[1 - e^{-j2wt}\right] dwt$$

$$= \frac{V}{j2\sqrt{2}p}\left[wt + \frac{1}{j2}e^{-j2wt}\right]_0^p = \frac{V}{j2\sqrt{2}}$$

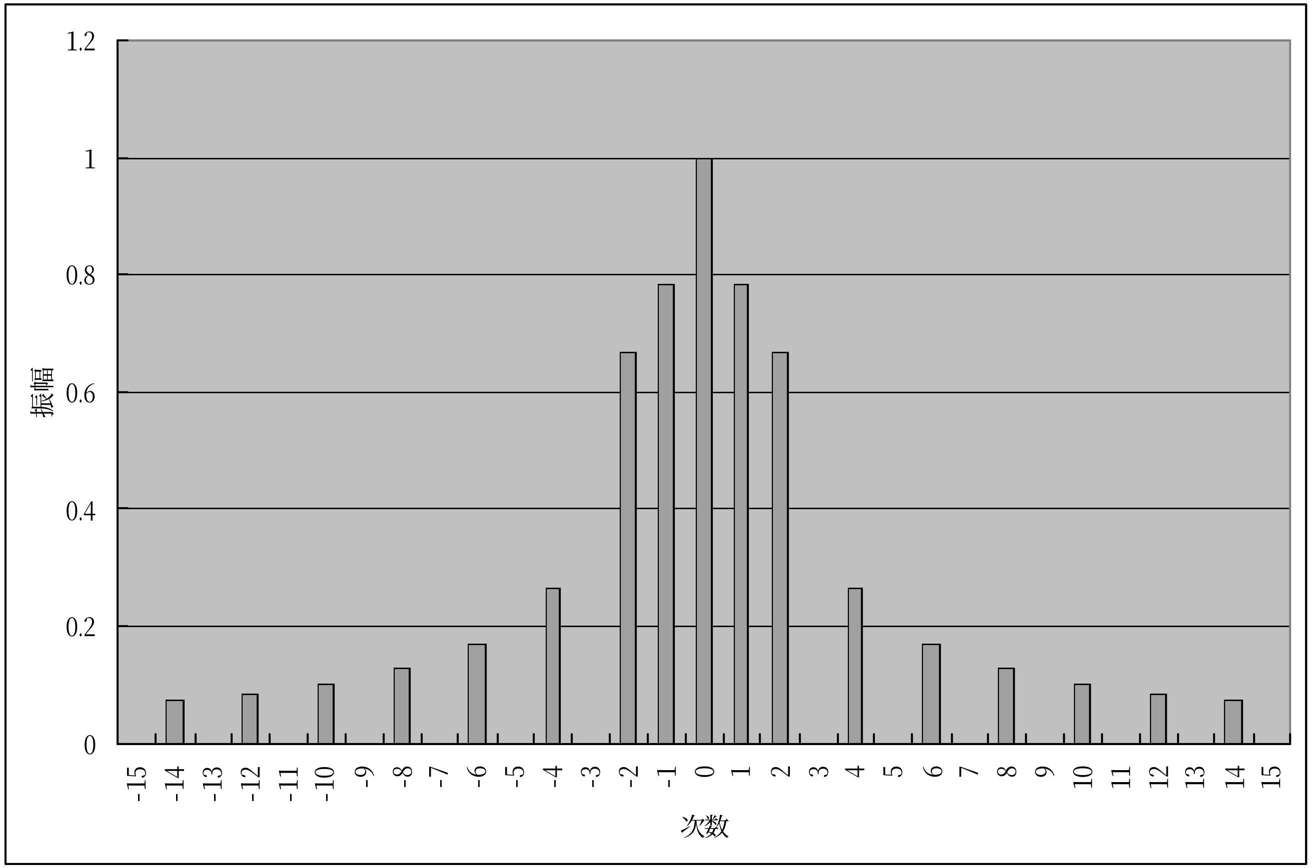
$k = -1$

$$E_{dk} = \frac{V}{j2\sqrt{2}p}\int_0^p \left[e^{j2wt} - 1\right] dwt$$

$$= \frac{V}{j2\sqrt{2}p}\left[\frac{1}{j2}e^{j2wt} - wt\right]_0^p = -\frac{V}{j2\sqrt{2}}$$

単相半波整流回路

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



但し, 平均直流電圧を1として規格化

単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧 ･電流の振る舞い
    - 電源電圧

$$v = \sqrt{2}V \sin wt$$

•回路図

- ダイオードの導通期間中, 電圧はL,Rが分担
  - Lの印加電圧 $e_L = L \dfrac{d}{dt} i_d$
  - Rの印加電圧 $e_R = Ri_d$
  - 印加電圧
    - » 導通期間中 $e_d = e_L + e_R = v$
    - » 非導通期間中 $e_d = e_L + e_R = 0$

単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 出力電流波形を求める
    - ダイオード導通開始点をt=0とする

$$v = e_L + e_R = L\tfrac{d}{dt} i_d + Ri_d$$

$$\sqrt{2}V\frac{w}{s^2 + w^2} = LsI_d + RI_d \qquad v_{t=0} = 0, i_{dt=0} = 0$$

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

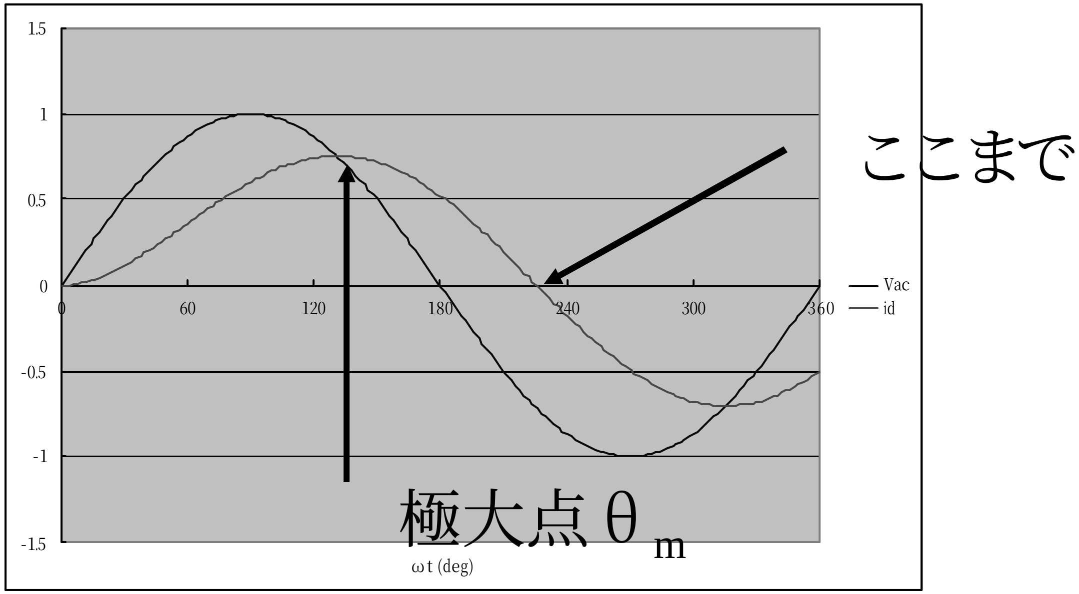
$$I_d = \frac{\sqrt{2}V}{R^2 + w^2L^2}\left(\frac{wL}{s + \frac{R}{L}} - wL\frac{s}{s^2 + w^2} + R\frac{w}{s^2 + w^2}\right)$$

単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 出力電流波形を求める

$$i_d = \frac{\sqrt{2}V}{R^2 + w^2L^2}\left(wLe^{-\frac{R}{L}t} - wL\cos wt + R\sin wt\right)$$

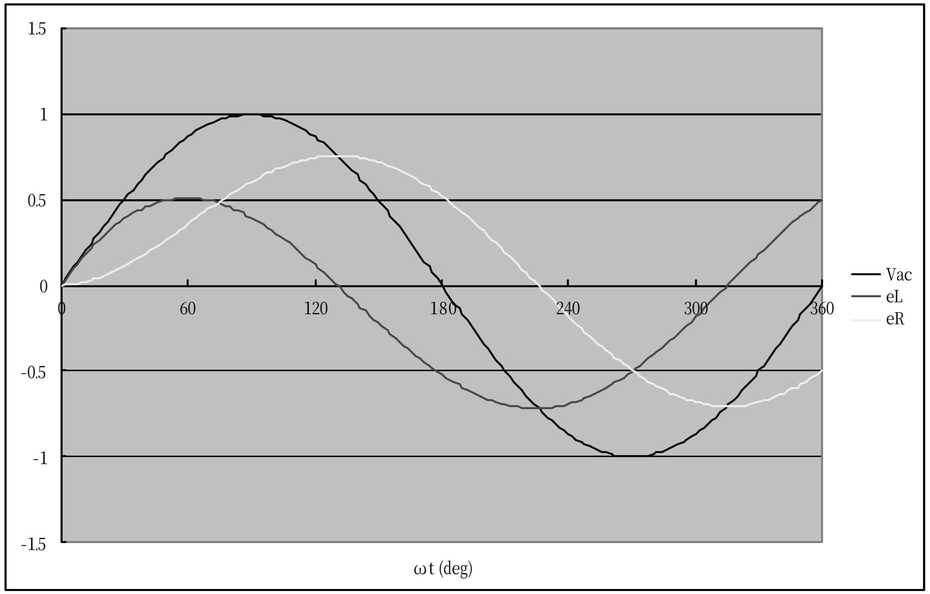
$$= \frac{\sqrt{2}V}{R^2 + w^2L^2}\left[wL\left(e^{-\frac{R}{L}t} - \cos wt\right) + R\sin wt\right]$$



単相半波整流回路

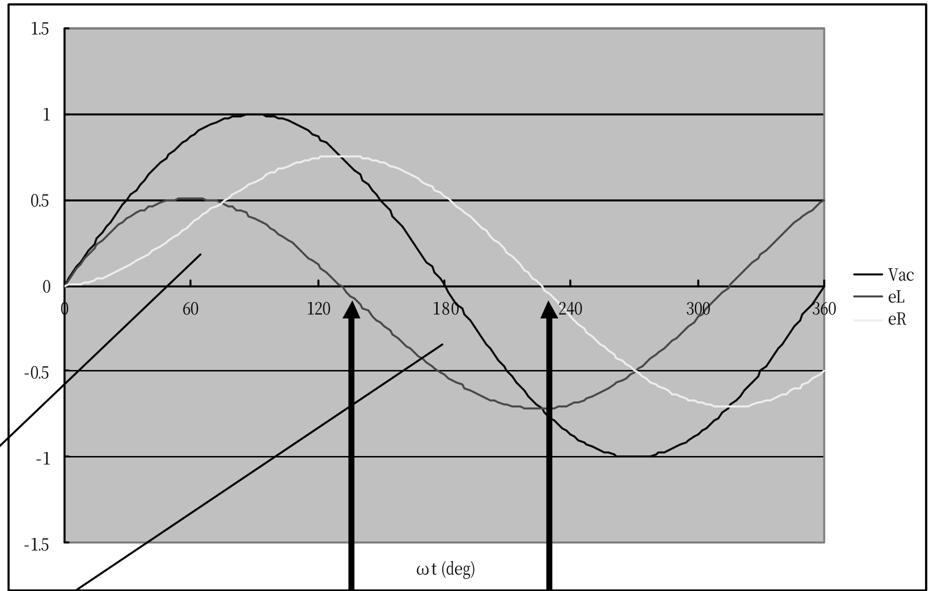
- 誘導負荷
  - 各部の電圧波形を求める
    - 負荷抵抗電圧
      - 電流と相似波形　$e_R = Ri_d$
    - インダクタ電圧

$$e_L = L\frac{d}{dt}i_d = \frac{\sqrt{2}wLV}{R^2 + w^2L^2}\left[-R\left(e^{-\frac{R}{L}t} - \cos wt\right) + wL\sin wt\right]$$



単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 各部の電圧波形を求める
    - e_Rはθ$_m$で電源電圧と同じになる
    - e_Lはθ$_m$で0
      - これ以降, 負の値
        - » Id>0の間はオン
    - ωt=π+βでオフ
      - βを消弧角
      - Lのエネルギー蓄積
        - » 0〜θ$_m$の面積
磁束増加
        - » θ$_m$〜π+βの面積
磁束減少
        - » 両者の面積は等しくなる



θ$_m$

ここまで
π+β

単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 消弧角βを求める
    - 消弧（ダイオードオフ）時の条件　$i_d(wt = p + b) = 0$

$$\frac{V}{R^2 + w^2L^2}\left[wL\left(e^{-\frac{R}{wL}\{p+b\}} - \cos\{p+b\}\right) + R\sin\{p+b\}\right] = 0$$

$$e^{-\frac{R}{wL}(p+b)} + \cos b = \frac{R}{wL}\sin b$$

  - インダクタ電圧が0となる点θ$_{\mathrm{m}}$を求める
    - e_Lが0となる条件　$e_L(wt = q_m) = 0$

$$\frac{wLV}{R^2 + w^2L^2}\left[-R\left(e^{-\frac{R}{wL}q_m} - \cos q_m\right) + wL\sin q_m\right] = 0$$

$$e^{-\frac{R}{wL}q_m} - \cos q_m = \frac{wL}{R}\sin q_m$$

数値的に求解

単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 電圧 ･電流波形を求める
    - 直流出力電圧e_dの平均値E_dは？

$$E_d = \frac{1}{2p}\int_0^{2p} e_d dwt = \frac{1}{2p}\left[\int_0^{p} v dwt + \int_p^{2p} 0 dwt\right]$$

$$= \frac{1}{2p}\int_0^{p} \sqrt{2}V \sin wt dwt$$

$$= \frac{V}{\sqrt{2}p}\left[-\cos wt\right]_0^{p} = \frac{V}{\sqrt{2}p}\left[1+1\right]$$

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

    - 直流電流の平均値は同様に

$$\therefore I_d = \frac{E_d}{R}$$

単相半波整流回路

- 容量負荷
  - 電圧・電流の振る舞い
    - 電源電圧

$$v = \sqrt{2}V \sin wt$$

    - 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

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

•回路図

単相半波整流回路

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

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

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

$$i_d\left(wt = q_{off}\right) = C\frac{d}{dt}e_d + \frac{e_d}{R} = 0$$

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

$$\frac{p}{2} < q_{off}$$ になるので

$$\therefore q_{off} = p - \arctan RwC$$

単相半波整流回路

- 容量負荷
  - 出力波形を求める
    - 非導通期間中

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

$$\frac{E_d}{R} = -C\left(sE_d - e_{d0}\right) \qquad \text{但し} \quad e_{d0} = \sqrt{2}V\sin q_{off}$$

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

- 非導通開始点θ off
  - 出力電圧 $e_d = e_{d0}e^{-\frac{1}{RwC}\left(wt - q_{off}\right)}$

•波形の図

単相半波整流回路

- 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　の時点）

$$e_d\left(\omega t = 2\pi + \theta_{on}\right) = e_{d0} e^{-\frac{1}{R\omega C}\left(2\pi + \theta_{on} - \theta_{off}\right)} = v_{c0}$$

$$v_{c0} = e_{d0} e^{-\frac{1}{R\omega C}\left(2\pi + \theta_{on} - \theta_{off}\right)}$$

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

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

$$\sin\theta_{on} = \sin\theta_{off} e^{-\frac{1}{R\omega C}\left(2\pi + \theta_{on} - \theta_{off}\right)}$$ の解としてθ_{on}が求まる

負荷に対する単相半波整流回路の比較

- 抵抗負荷
  - 導通角 = 180度
- 誘導性負荷
  - 導通角 > 180度
    - 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 < 180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