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

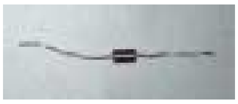
半導体整流器が出現する以前に用いられていた二極管

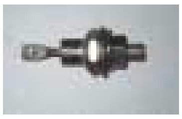
http://homepage.mac.com/ryomasuda/VT/num/02/index.html

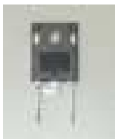
ダイオード

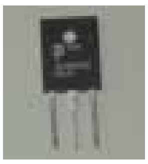
- パワエレでよく用いるダイオード
  - PN接合ダイオード
    - 整流用
      - 10D1　100V1A0．9V（IF＝1A）
    - 大容量
  - PiNダイオード
    - 高耐圧
    - ファストリカバリ
  - ショットキダイオード
    - 低順方向電圧降下
    - 短逆回復時間
    - 漏れ電流大

VI特性の絵



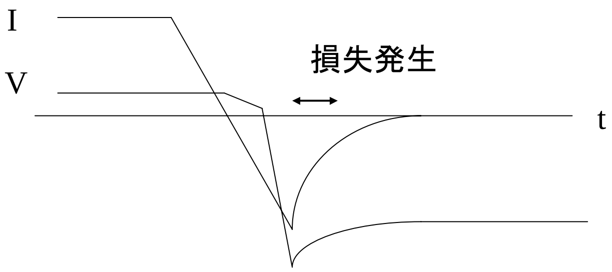






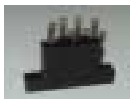
ダイオードのスイッチング時の応答

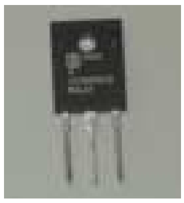
- 導通・非導通状態は瞬時には切り替わらない
  - 逆回復電流
    - スイッチング損失
      - 高周波になるほど深刻な問題



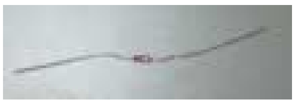
整流回路に用いるダイオード

- 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

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

    - 直流出力電圧e_dの平均値E_dは？

$$E_d = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} e_d \, d\omega t = \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi} v \, d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \, d\omega t\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \sqrt{2}V \sin \omega t \, d\omega t$$

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

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

    - 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のフーリエ級数展開

$$E_{dk} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} e_d e^{-jk\omega t} d\omega t = \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi} v e^{-jk\omega t} d\omega t + \int_\pi^{2\pi} 0 e^{-jk\omega t} d\omega t\right]$$

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

$$\sin\omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$ より

$$E_{dk} = \frac{V}{\sqrt{2}\pi}\int_0^{\pi} \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} e^{-jk\omega t} d\omega t$$

$$= \frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\int_0^{\pi}\left[e^{j(1-k)\omega t} - e^{-j(1+k)\omega t}\right] d\omega t$$

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のフーリエ級数展開

$k \neq \pm 1$

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

$k = 1$

$$E_{dk} = \frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\int_0^{\pi}\left[1 - e^{-j2\omega t}\right] d\omega t$$

$$= \frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\left[\omega t + \frac{1}{j2} e^{-j2\omega t}\right]_0^{\pi} = \frac{V}{j2\sqrt{2}}$$

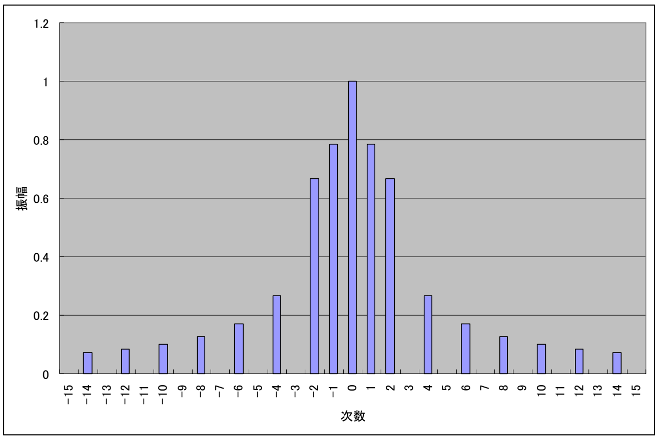
$k = -1$

$$E_{dk} = \frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\int_0^{\pi}\left[e^{j2\omega t} - 1\right] d\omega t$$

$$= \frac{V}{j2\sqrt{2}\pi}\left[\frac{1}{j2} e^{j2\omega t} - \omega t\right]_0^{\pi} = -\frac{V}{j2\sqrt{2}}$$

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

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

- 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 $e_L = L \frac{d}{dt} i_d$
  - 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 $e_d = e_L + e_R = 0$

•回路図

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

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

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

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

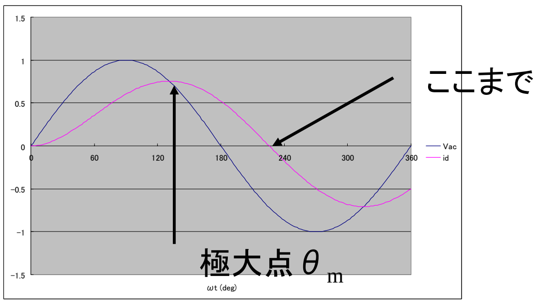
$$I_d = \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left(\frac{\omega L}{s+\frac{R}{L}} - \omega L\frac{s}{s^2+\omega^2} + R\frac{\omega}{s^2+\omega^2}\right)$$

単相半波整流回路

- 誘導負荷
  - 出力電流波形を求める

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

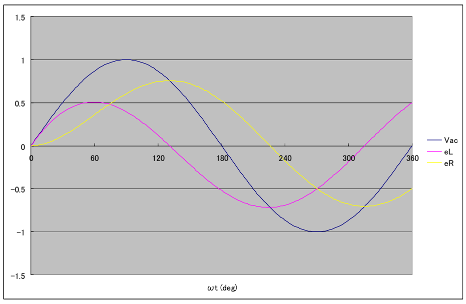
$$= \frac{\sqrt{2}V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{R}{L}t} - \cos\omega t\right) + R\sin\omega t\right]$$



単相半波整流回路

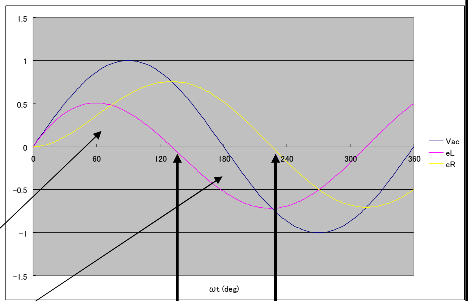
- 誘導負荷
  - 各部の電圧波形を求める
    - 負荷抵抗電圧
      - 電流と相似波形　$e_R = Ri_d$
    - インダクタ電圧

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



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
    - $\omega t=\pi+\beta$ 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〜$\pi+\beta$の面積
磁束減少
        - » 両者の面積は等しくなる



θ_m　　ここまで $\pi+\beta$

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　$i_d(\omega t=\pi+\beta)=0$

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

$$e^{-\frac{R}{\omega L}(\pi+\beta)}+\cos\beta=\frac{R}{\omega L}\sin\beta$$

  - インダクタ電圧が0となる点 θ_mを求める
    - e_Lが0となる条件　$e_L(\omega t=\theta_m)=0$

$$\frac{\omega LV}{R^2+\omega^2L^2}\left[-R\left(e^{-\frac{R}{\omega L}\theta_m}-\cos\theta_m\right)+\omega L\sin\theta_m\right]=0$$

$$e^{-\frac{R}{\omega L}\theta_m}-\cos\theta_m=\frac{\omega L}{R}\sin\theta_m$$

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？

$$E_d=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}e_d\,d\omega t=\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi}v\,d\omega t+\int_{\pi}^{2\pi}0\,d\omega t\right]$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\sqrt{2}V\sin\omega t\,d\omega t$$

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

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

    - 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

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

    - 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

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

•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

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

    - 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

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

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

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

- 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）

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

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

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