パワーエレクトロニクス
第六回　整流回路

平成31年5月22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
- 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

ダイオード整流回路
半波整流回路　容量性負荷

- 電源電流実効値I_{rms}
  - 電源電流瞬時値i_d
    - $i_d = i_C \ \ + i_R \ \ = C\frac{dv_d}{dt} \ \ + \frac{v_d}{R} \ \ = V\left\{C\omega\cos\ \ \omega t \ \ + \frac{\sin \ \ \omega t}{R}\right\}$
  - 導通終了時点
    - $\tan\theta_{coff} = -\omega CR$
  - 導通開始時点
    - $\sin\theta_{con} = \sin\theta_{coff}\, e^{-\frac{1}{\omega CR}\left(2\pi+\theta_{con}-\theta_{coff}\right)}$

ダイオード整流回路
半波整流回路　容量性負荷

- 電源電流の歪率・力率
  - $I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T {i_d}^2 dt} =$

$$\frac{V}{R}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left[\begin{array}{c} \{\omega^2 C^2 R^2 + 1\}\{\theta_{coff} - \theta_{con}\} \\ + \frac{\omega^2 C^2 R^2 - 1}{2}\{\sin 2\theta_{coff} - \sin 2\theta_{con}\} \\ -\omega CR\{\cos 2\theta_{coff} - \cos 2\theta_{con}\} \end{array}\right]}$$

ダイオード整流回路
半波整流回路　容量性負荷

- 電源電流の歪率・力率
  - $a_1 = \frac{2}{T}\int_0^T i_d \cos\omega t\, dt$

$$= \frac{2}{T}\int_{t_{con}}^{t_{coff}} \left\{V\left(C\omega\cos\omega t + \frac{\sin\omega t}{R}\right)\right\}\cos\omega t\, dt$$

$$= \frac{V}{2\pi R}\Bigg[\omega CR\left(\theta_{coff} - \theta_{con}\right)$$

$$+ \frac{\omega CR}{2}\left(\sin 2\theta_{coff} - \sin 2\theta_{con}\right)$$

$$- \frac{1}{2}\left(\cos 2\theta_{coff} - \cos 2\theta_{con}\right)\Bigg]$$

ダイオード整流回路
半波整流回路　容量性負荷

- 電源電流の歪率・力率
  - $b_1 = \frac{2}{T}\int_0^T i_d \sin\omega t\, dt$

$$= \frac{2}{T}\int_{t_{con}}^{t_{coff}} \left\{V\left(C\omega\cos\omega t + \frac{\sin\omega t}{R}\right)\right\}\sin\omega t\, dt$$

$$= \frac{V}{2\pi R}\Bigg[\theta_{coff} - \theta_{con}$$

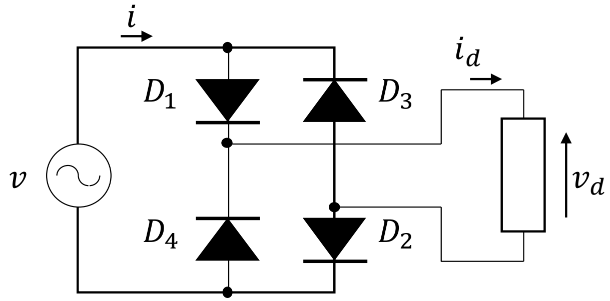
$$- \frac{\omega CR}{2}\left(\cos 2\theta_{coff} - \cos 2\theta_{con}\right)$$

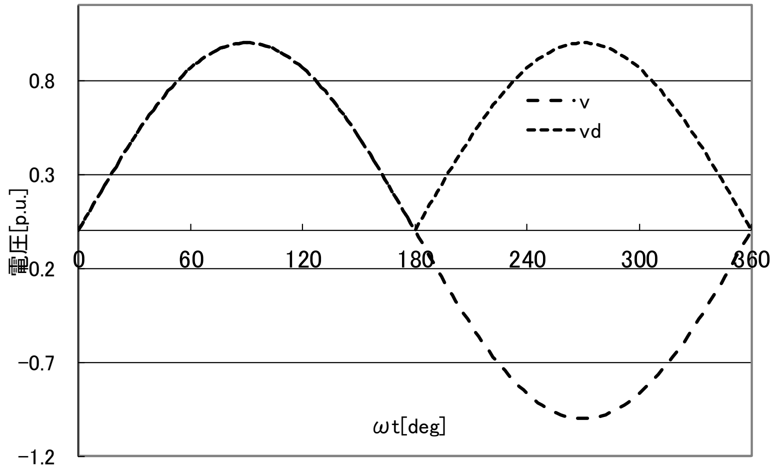
$$- \frac{1}{2}\left(\sin 2\theta_{coff} - \sin 2\theta_{con}\right)\Bigg]$$

ダイオード整流回路
半波整流回路　容量性負荷

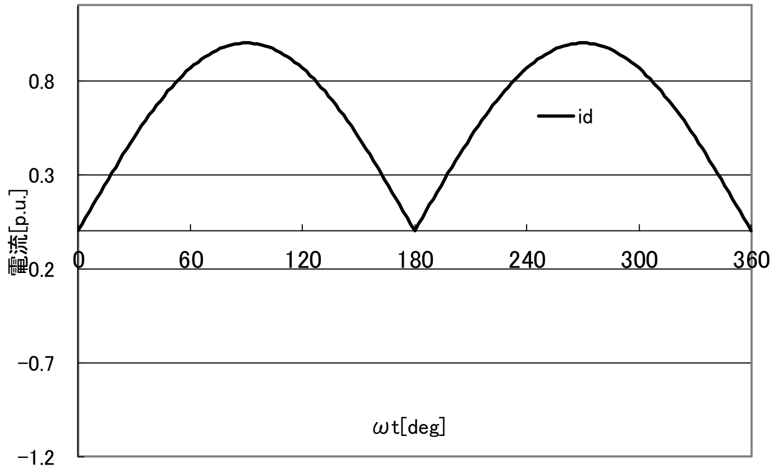
- 電源電流の歪率・力率
  - 力率:$pf = \cos(\theta_1 - \phi_1)$
    - θ_1:電圧基本波位相
    - ϕ_1 :電流基本波位相
    - $\phi_1 = \tan^{-1}\frac{b_1}{a_1}$
  - 歪率: $DF = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$
    - $I_{1,rms} = \sqrt{{a_1}^2 + {b_1}^2}$
  - 歪波力率: $pf_d = DF\cos(\theta_1 - \phi_1)$

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷





電圧



電流

- 電源交流電圧:$v(t) = V \sin \omega t$
- $v(t) > 0 \left(0 < t < \frac{\pi}{\omega}\right)$
  - 導通D1, D2, 遮断:D3,D4
- $v(t) < 0 \left(\frac{\pi}{\omega} < t < \frac{2\pi}{\omega}\right)$
  - 導通D3, D4, 遮断:D1,D2

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷

- 直流電圧平均値
  - $V_d = \frac{1}{T}\int_0^T v_d(t)dt = \frac{1}{T}\left\{\int_0^{\frac{T}{2}} v(t)dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} -v(t)dt\right\}$

$$= \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} V\sin\omega t\,dt = \frac{2V}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}\sin\omega t\,dt$$

$$= \frac{2V}{T}\left[-\frac{1}{\omega}\cos\omega t\right]_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2V}{\omega T}\{-\cos\pi + \cos 0\}$$

$$= \frac{2V}{2\pi}\{1+1\} = \frac{2V}{\pi}$$

- 直流電流の平均値
  - $I_d = \frac{V_d}{R} = \frac{2V}{\pi R}$

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷

- 直流電圧脈動率
  - (最大電圧-最小電圧)/平均電圧
  - $\frac{V-0}{V_d}=\frac{V}{\frac{2V}{\pi}}=\frac{\pi}{2}$

基本波周波数成分$(i=1)$は現れない
高調波に対応する$b_i(i>1)$の成分は無い
高調波成分a_iは 奇数は$a_i=0$,偶数は存在
　　出力波形が上下非対称振幅は高調波の
　　次数iに反比例

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷

- 出力電圧に含まれる高調波
  - $v_d(t) = \sum_{i=0}^{\infty}[a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$
    - $a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T v_d(t)dt = V_d = \frac{2V}{\pi}$
    - $b_0 = 0$
    - $a_1 = \frac{2}{T}\int_0^T v_d(t) \cos \omega t \, dt$

$$= \frac{2}{T}\left\{\int_0^{\frac{T}{2}} V \sin \omega t \cos \omega t \, dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} -V \sin \omega t \cos \omega t \, dt\right\}$$

$$= \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{TT}{22}} \sin \omega t \cos \omega t \, dt = \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{TT}{22}} \frac{\sin 2\omega t}{2} dt$$

$$= \frac{V}{T}\left[\frac{-\cos 2\omega t}{2\omega}\right]_{0T}^{\frac{TT}{22}} = \frac{V}{2\omega T}\{-\cos 2\pi + 1\} = \frac{V}{4\pi}\{-1 + 1\} = 0$$

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷

- $b_1 = \frac{2}{T}\int_0^T v_d(t)\sin\omega t\,dt$

$$= \frac{2}{T}\left\{\int_0^{\frac{T}{2}} V\sin\omega t\sin\omega t\,dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} -V\sin\omega t\sin\omega t\,dt\right\}$$

$$= \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{TT}{22}}\sin\omega t\sin\omega t\,dt = \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{TT}{22}}\frac{\cos 0 - \cos 2\omega t}{2}dt$$

$$= \frac{V}{T}\left[t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega}\right]_{0T}^{\frac{TT}{22}}$$

$$= \frac{V}{T}\left\{\frac{T}{2} - 0 + \frac{T}{2} - T - \frac{\sin 2\pi - 0 + \sin 2\pi - \sin 4\pi}{2\omega}\right\} = 0$$

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷

- $a_i = \frac{2}{T}\int_0^T v_d(t)\cos i\omega t\,dt$

$$= \frac{2}{T}\left\{\int_0^{\frac{T}{2}} V\sin\omega t\cos i\omega t\,dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} -V\sin\omega t\cos i\omega t\,dt\right\}$$

$$= \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{TT}{22}}\sin\omega t\cos i\omega t\,dt = \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{TT}{22}}\frac{\sin(1+i)\omega t + \sin(1-i)\omega t}{2}dt$$

$$= \frac{V}{T}\left[\frac{-\cos(1+i)\omega t}{(1+i)\omega} + \frac{-\cos(1-i)\omega t}{(1-i)\omega}\right]_{0T}^{\frac{TT}{22}}$$

$$= \frac{2V}{\omega T}\left\{\frac{-\cos(1+i)\pi + 1}{1+i} + \frac{-\cos(1-i)\pi + 1}{1-i}\right\}$$

$$= \frac{V}{\pi}\left\{\frac{1-(-1)^{1+i}}{1+i} + \frac{1-(-1)^{1-i}}{1-i}\right\}$$

ダイオード整流回路
全波整流回路　抵抗負荷

- $b_i = \frac{2}{T}\int_0^T v_d(t)\sin i\omega t\, dt$

$$= \frac{2}{T}\left\{\int_0^{\frac{T}{2}} V\sin\omega t \sin i\omega t\, dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} -V\sin\omega t\sin i\omega t\, dt\right\}$$

$$= \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{T}{2}\frac{T}{2}} \sin\omega t\sin i\omega t\, dt$$

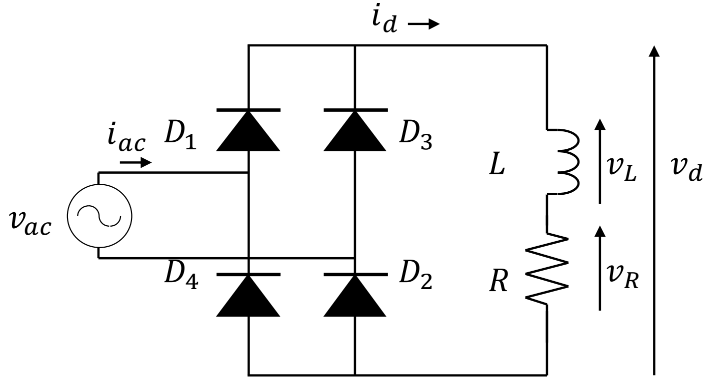
$$= \frac{2V}{T}\int_{0T}^{\frac{T}{2}\frac{T}{2}} \frac{\cos(1-i)\omega t - \cos(1+i)\omega t}{2}\, dt$$

$$= \frac{V}{T}\left[\frac{\sin(1-i)\omega t}{(1-i)\omega} - \frac{\sin(1+i)\omega t}{(1+i)\omega}\right]_{0T}^{\frac{T}{2}\frac{T}{2}}$$

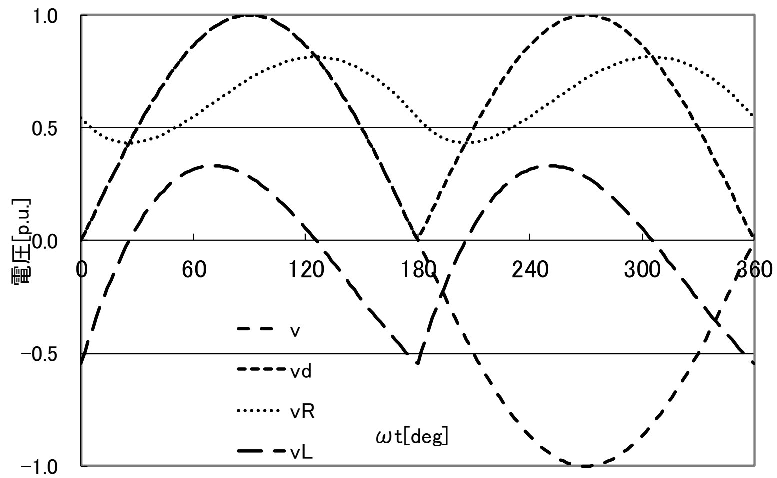
$$= \frac{2V}{\omega T}\left\{\frac{\sin(1-i)\pi - 0}{1-i} - \frac{\sin(1+i)\pi - 0}{1+i}\right\}$$

$$= \frac{2V}{\omega T}\left\{\frac{0-0}{1-i} - \frac{0-0}{1+i}\right\} = 0$$

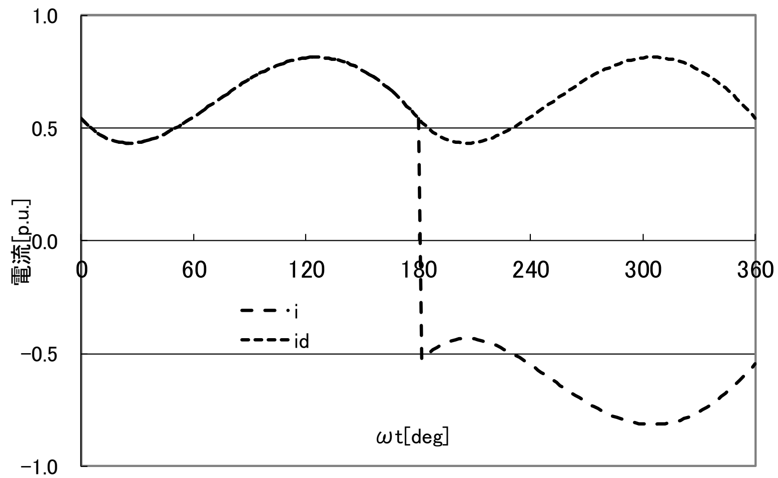
ダイオード整流回路
全波整流回路　誘導性負荷



- 直流電流が0とならない連続導通動作



電圧の応答(Q=1)



電流の応答(Q=1)

ダイオード整流回路
全波整流回路　誘導性負荷

- 電源電圧vはRとLで分担
  - $v_R = Ri_d$
  - $v_L = L\frac{di_d}{dt}$
- 導通状態のKVL
  - $v = v_R + v_L = Ri_d + L\frac{di_d}{dt}$　　$v(t) = V\sin\omega t$
    - $V\frac{\omega}{s^2+\omega^2} = RI_d + L(sI_d - i_{d0})$
      - 電流初期値:i_{d0}
    - $I_d = \frac{1}{Ls+R}\left(V\frac{\omega}{s^2+\omega^2} + Li_{d0}\right) = V\frac{\omega}{s^2+\omega^2}\frac{1}{Ls+R} + \frac{Li_{d0}}{Ls+R}$

ダイオード整流回路
全波整流回路　誘導性負荷

- $I_d = \frac{V}{R^2+\omega^2 L^2}\left(\frac{\omega L}{s+\frac{R}{L}} - \omega L \frac{s}{s^2+\omega^2} + R \frac{\omega}{s^2+\omega^2}\right) + \frac{i_{d0}}{s+\frac{R}{L}}$
- $i_d(t) = \frac{V}{R^2+\omega^2 L^2}\left(\omega L e^{-\frac{R}{L}t} - \omega L \cos\omega t + R \sin\omega t\right) + i_{d0} e^{-\frac{R}{L}t}$
  $= \frac{V}{R^2+\omega^2 L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{R}{L}t} - \cos\omega t\right) + R \sin\omega t\right] + i_{d0} e^{-\frac{R}{L}t}$
  - $t = \frac{T}{2}$の時点で導通ダイオードのペアが交代
  - 周期定常状態では初期値に一致するi_{d0}

ダイオード整流回路
全波整流回路　誘導性負荷

- $i_d\left(\frac{T}{2}\right) = i_d\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = i_{d0}$
  $= \frac{V}{R^2+\omega^2L^2}\left[\omega L\left(e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} - \cos\pi\right) + R\sin\pi\right] + i_{d0}e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}$
  $= \frac{V\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\left(e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} + 1\right) + i_{d0}e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}$
- $i_{d0}\left(1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right) = \frac{V\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\left(1 + e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right)$
- $i_{d0} = \frac{V\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\frac{1+e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}$
  - $i_{d0} > 0$となり連続導通の条件が成り立つ

ダイオード整流回路
全波整流回路　誘導性負荷

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

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

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

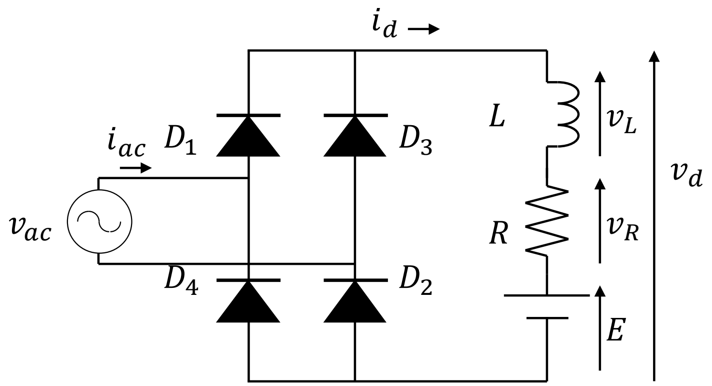
ダイオード整流回路
全波整流回路　誘導性負荷

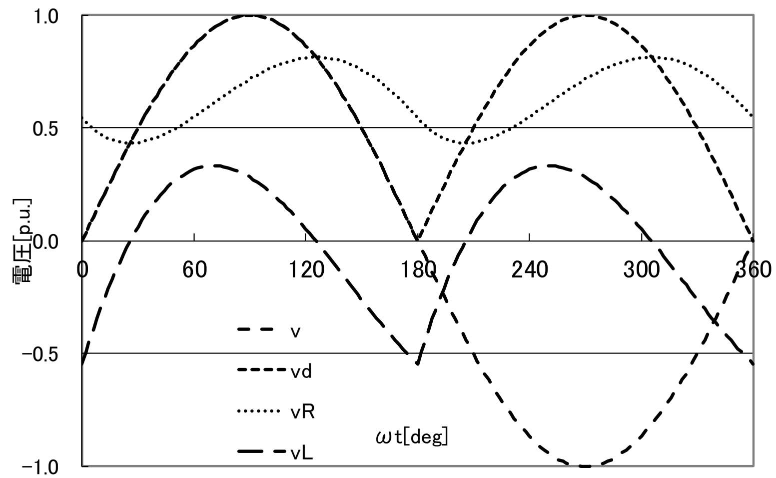
- 抵抗に印加される電圧v_R
  - $v_R = i_d R$

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

- インダクタに印加される電圧v_L
  - $\frac{di_d}{dt} = \frac{V\omega}{R^2+\omega^2 L^2}\left[\frac{-2R}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} e^{-\frac{R}{L}t} + \omega L \sin \omega t + R \cos \omega t\right]$
  - $v_L = L\frac{di_d}{dt} = \frac{V\omega L}{R^2+\omega^2 L^2}\left[\frac{-2R}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} e^{-\frac{R}{L}t} + \omega L \sin \omega t + R \cos \omega t\right]$

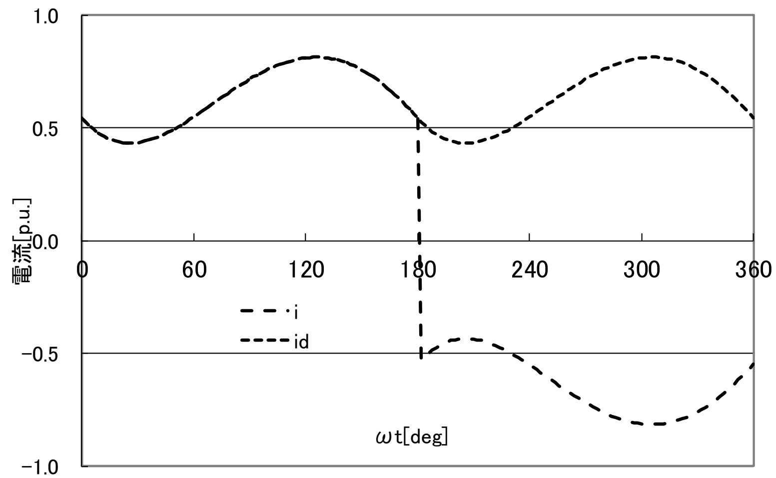
ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷





電圧の応答(Q=1)

- 負荷の直流電圧源
  - 直流モータの起電力
  - 直流電流が不連続となることがある



電流の応答(Q=1)

ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷

- RとLにかかる電圧
  - $v_R = Ri_d$
  - $v_L = L\frac{di_d}{dt}$
- 導通状態のKVL
  - $v = v_R + v_L + E = Ri_d + L\frac{di_d}{dt} + E$
  - $v(t) = V\sin\omega t$

ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷

- ダイオードがターンオンする時点$t_{on} = \frac{\theta_{on}}{\omega}$
  - $V \sin \omega t_{on} = V \sin \theta_{on} = E$
  - $\theta_{on} = \sin^{-1} \frac{E}{V}$
- t_{on}を時間の原点においたτを考える
  - $t = \tau + t_{on}$
  - $dt = d\tau$
  - $V \sin \omega(\tau + t_{on}) = V \sin(\omega\tau + \theta_{on}) = Ri_d + L\frac{di_d}{dt} + E$

ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷

- $V\sin\omega\tau\cos\theta_{on} + V\cos\omega\tau\sin\theta_{on} = Ri_d + L\frac{di_d}{dt} + V\sin\theta_{on}$
- $V\cos\theta_{on}\frac{\omega}{s^2+\omega^2} + V\sin\theta_{on}\frac{s}{s^2+\omega^2} = RI_d + L(sI_d - i_{d0}) + \frac{V\sin\theta_{on}}{s}$
- $(R+sL)I_d = V\cos\theta_{on}\frac{\omega}{s^2+\omega^2} + V\sin\theta_{on}\frac{s}{s^2+\omega^2} - \frac{V\sin\theta_{on}}{s} + Li_{d0}$
- $I_d = V\cos\theta_{on}\frac{1}{R+sL}\frac{\omega}{s^2+\omega^2} + V\sin\theta_{on}\frac{1}{R+sL}\frac{s}{s^2+\omega^2} - \frac{V\sin\theta_{on}}{s}\frac{1}{R+sL} + Li_{d0}\frac{1}{R+sL}$

ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷

- $I_d = \frac{V\cos\theta_{on}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\left(\sin z\frac{1}{s+\frac{R}{L}} - \sin z\frac{s}{s^2+\omega^2} + \cos z\frac{\omega}{s^2+\omega^2}\right) + \frac{V\sin\theta_{on}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\left(-\cos z\frac{1}{s+\frac{R}{L}} + \cos z\frac{s}{s^2+\omega^2} + \sin z\frac{\omega}{s^2+\omega^2}\right) - V\sin\theta_{on}\frac{1}{R}\left(-\frac{1}{s+\frac{R}{L}} + \frac{1}{s}\right) + i_{d0}\frac{1}{s+\frac{R}{L}}$
  - $\cos z = \frac{R}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}$
  - $\sin z = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}$

ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷

- $i_d(\tau) = \frac{V\cos\theta_{on}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\left(\sin z\, e^{-\frac{R}{L}\tau} - \sin z\cos\omega\tau + \cos z\sin\omega\tau\right) + \frac{V\sin\theta_{on}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\left(-\cos z\, e^{-\frac{R}{L}\tau} + \cos z\cos\omega\tau + \sin z\sin\omega\tau\right) + \frac{V\sin\theta_{on}}{R}\left(e^{-\frac{R}{L}\tau} - 1\right) + i_{d0}e^{-\frac{R}{L}\tau} = \frac{V}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\sin(\omega\tau + \theta_{on} - z) + \left\{\frac{V\sin(z-\theta_{on})}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}} + \frac{V\sin\theta_{on}}{R} + i_{d0}\right\}e^{-\frac{R}{L}\tau} - \frac{V\sin\theta_{on}}{R}$
- 連続導通の場合
  - $i_d\left(\frac{T}{2}\right) = i_{d0}$

ダイオード整流回路
全波整流回路　起電力付誘導性負荷

- $i_d\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{V}{\sqrt{R^2+\omega^2 L^2}}\sin(\pi + \theta_{on} - z) + \left\{\frac{V\sin(z-\theta_{on})}{\sqrt{R^2+\omega^2 L^2}} + \frac{V\sin\theta_{on}}{R} + i_{d0}\right\} e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} - \frac{V\sin\theta_{on}}{R} = i_{d0}$
- $i_{d0}\left(1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right) = \frac{V}{\sqrt{R^2+\omega^2 L^2}}\sin(\theta_{on} - z)\left(1 + e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right) + \frac{V\sin\theta_{on}}{R}\left(e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} - 1\right)$
- $i_{d0} = \frac{V}{\sqrt{R^2+\omega^2 L^2}}\sin(\theta_{on} - z)\frac{1+e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} - \frac{V\sin\theta_{on}}{R}$
  - $i_{d0} < 0$の場合不連続導通となる