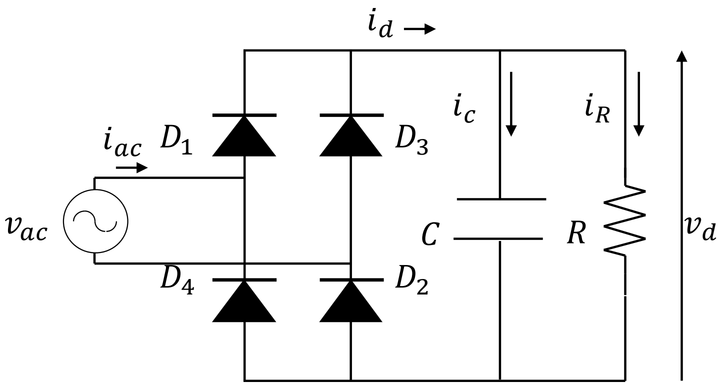
パワーエレクトロニクス
第七回　整流回路

平成31年5月29日

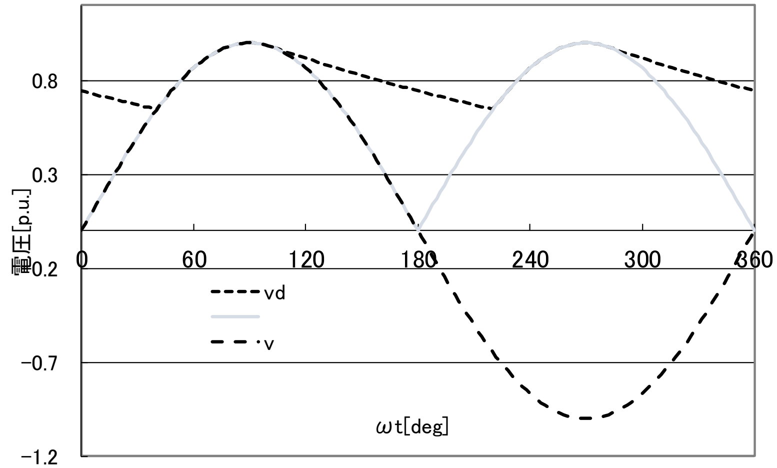
授業の予定

- 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

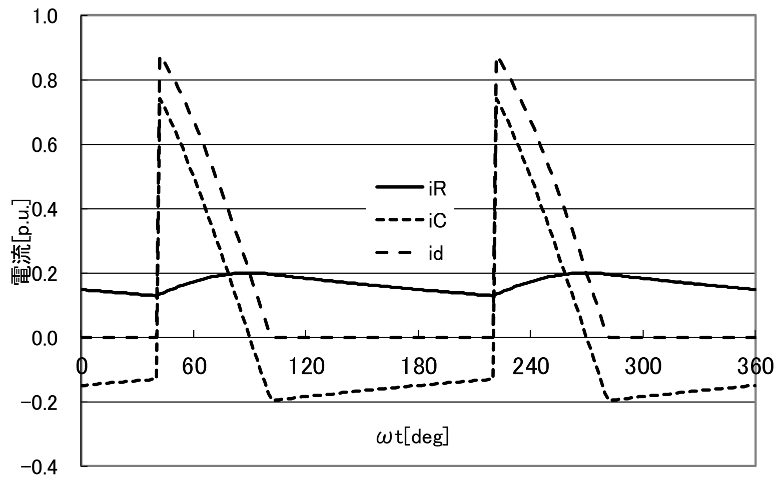
ダイオード整流回路
全波整流回路　容量性負荷



- コンデンサにより直流電圧脈動を低減



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　容量性負荷

- ダイオードの導通状態は電源電圧vとコンデンサの充電電圧v_dによって決まる
  - 半波整流回路と同様
    - $v(t) = V\sin\omega t$
    - 負の半波は逆極性で出力される
- 電源電流i_d
  - $i_d = i_C + i_R = C\frac{dv_d}{dt} + \frac{v_d}{R} = V\left\{C\omega\cos\ \omega t + \frac{\sin\ \omega t}{R}\right\}$
    - コンデンサ充電電流i_C,負荷電流i_R

ダイオード整流回路
全波整流回路　容量性負荷

- ダイオードの導通期間
  - 導通終了時点$t = t_{coff} = \frac{\theta_{coff}}{\omega}$(消弧角$\theta_{coff}$)
    - 半波整流と同じ
    - $i_d(t_{coff}) = V\left\{C\omega\cos\theta_{coff} + \frac{\sin\theta_{coff}}{R}\right\} = 0$
    - $C\omega\cos\theta_{coff} + \frac{\sin\theta_{coff}}{R} = 0$
    - $\tan\theta_{coff} = -\omega CR$
      - 電源電圧vが最大値をとった後$\frac{\pi}{2} \le \theta_{coff} \le \pi$
      - $\theta_{coff} = \pi - \tan^{-1}\omega CR$

ダイオード整流回路
全波整流回路　容量性負荷

- ダイオードの導通期間
  - 導通開始時点t_{con}(点弧角θ_{con})
    - コンデンサ電流i_Cが負荷電流i_Rと等しい大きさ
      - $i_R = \frac{v_d}{R} = -i_C = -C\frac{dv_d}{dt}$
      - $\frac{V_d}{R} = -C\left(sV_d - v_{dcoff}\right)$
        - $v_{dcoff} = V\sin\theta_{coff}$
        - $v_d(t) = v_{dcoff}e^{-\frac{1}{\omega CR}(\omega t-\theta_{coff})}$
    - 次の半サイクルで非導通状態から導通状態に遷移
      - $t = t_{con} = \frac{\theta_{con}+\pi}{\omega}$ ←この項が半波整流と異なる

ダイオード整流回路
全波整流回路　容量性負荷

- ダイオードの導通期間
  - 導通開始時点t_{con}(点弧角θ_{con})
    - $v_{dcon} = V\sin\theta_{con} = v_d\left(\frac{\theta_{con}+\pi}{\omega}\right)$

      $= v_{dcoff}e^{-\frac{1}{\omega CR}\left(\omega\frac{\theta_{con}+\pi}{\omega}-\theta_{coff}\right)}$

      $= V\sin\theta_{coff}\, e^{-\frac{1}{\omega CR}(\pi+\theta_{con}-\theta_{coff})}$
    - $\sin\theta_{con} = \sin\theta_{coff}\, e^{-\frac{1}{\omega CR}(\pi+\theta_{con}-\theta_{coff})}$
      - 数値解

ダイオード整流回路
全波整流回路　容量性負荷

- 出力電圧平均値(半周期分で求める)
  - $V_d = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} v_d(t)dt$
  $$= \frac{2}{T}\left\{\int_{t_{con}}^{t_{coff}} v(t)dt + \int_{t_{coff}}^{\frac{T}{2}+t_{con}} v_d(t)dt\right\}$$
  $$= \frac{2}{T}\left\{\int_{t_{con}}^{t_{coff}} V\sin\omega t\,dt + \int_{t_{coff}}^{\frac{T}{2}+t_{con}} V\sin\theta_{coff}\, e^{-\frac{1}{\omega CR}(\omega t-\theta_{coff})}dt\right\}$$
  $$= \frac{V}{T}\left\{\int_{t_{con}}^{t_{coff}} \sin\omega t\,dt + \sin\theta_{coff}\int_{t_{coff}}^{\frac{T}{2}+t_{con}} e^{-\frac{1}{\omega CR}(\omega t-\theta_{coff})}dt\right\}$$

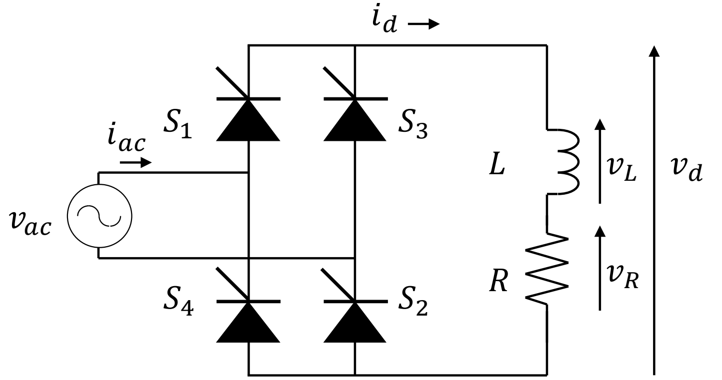
ダイオード整流回路
全波整流回路　容量性負荷

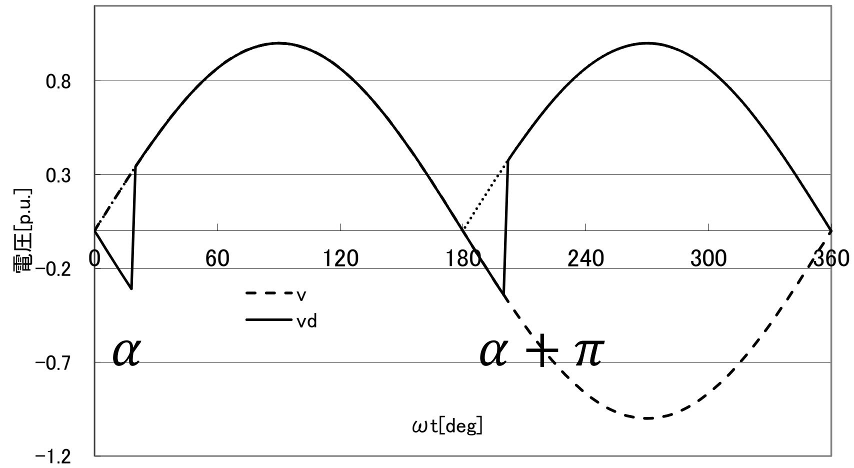
- 出力電圧平均値
  - $V_d = \frac{2V}{T}\left\{\left[-\frac{1}{\omega}\cos\omega t\right]_{t_{con}}^{t_{coff}} + \sin\theta_{coff}\left[-CRe^{-\frac{1}{\omega CR}(\omega t-\theta_{coff})}\right]_{t_{coff}}^{\frac{T}{2}+t_{con}}\right\}$

$$= \frac{2V}{T}\left\{\frac{1}{\omega}\left[-\cos\theta_{coff} + \cos\theta_{con}\right] - CR\sin\theta_{coff}\left[e^{-\frac{\pi+\theta_{con}-\theta_{coff}}{\omega CR}} - 1\right]\right\}$$

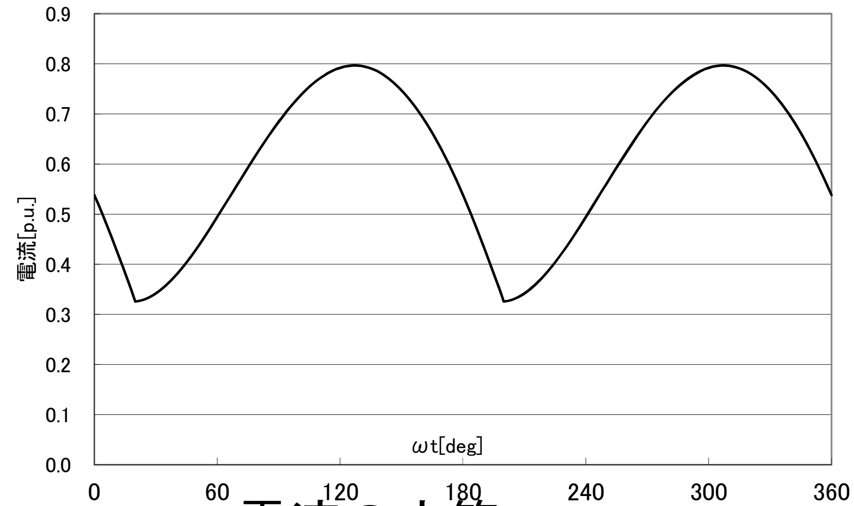
$$= \frac{V}{\pi}\left\{-\cos\theta_{coff} + \cos\theta_{con} - \omega CR\sin\theta_{coff}\left[e^{-\frac{\pi+\theta_{con}-\theta_{coff}}{\omega CR}} - 1\right]\right\}$$

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷





電圧の応答



電流の応答

- 順電圧印加状態でゲートに点弧パルスが与えられるまで遮断状態を維持
  - 直流出力を制御可能
  - (S1,S2)および(S3,S4)の組み合わせで動作

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷

- 交流電圧:$v(t) = V \sin \omega t$
- 点弧遅れ角:α
  - $\omega t = \alpha$の時点でサイリスタをターンオン
- 消弧角:β
  - $\omega t = \beta$の時点でサイリスタをターンオフ
  - 連続導通時: $\alpha + \pi = \beta$
  - 不連続導通時: $\alpha + \pi > \beta$

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷

- 導通状態のKVL
  - $v = v_R + v_L = Ri_d + L\frac{di_d}{dt}$
- 時間の原点を$t = \frac{\alpha}{\omega}$において考える
  - $t = \tau + \frac{\alpha}{\omega}$
  - $dt = d\tau$
  - $V\sin(\omega\tau + \alpha) = Ri_d + L\frac{di_d}{dt}$

サイリスタHブリッジ回路 位相制御　誘導性負荷

- $V\frac{\omega\cos\alpha+s\sin\alpha}{s^2+\omega^2}=RI_d+L(sI_d-i_{d0})$
- $(sL+R)I_d=V\frac{\omega\cos\alpha+s\sin\alpha}{s^2+\omega^2}+Li_{d0}$
- $I_d=V\frac{1}{sL+R}\frac{\omega\cos\alpha+s\sin\alpha}{s^2+\omega^2}+\frac{L}{sL+R}i_{d0}$
- $I_d=\frac{V\cos\alpha}{Z}\left(\sin\gamma\frac{1}{s+\frac{R}{L}}+\frac{\omega\cos\gamma-s\sin\gamma}{s^2+\omega^2}\right)+\frac{V\sin\alpha}{Z}\left(-\cos\gamma\frac{1}{s+\frac{R}{L}}+\frac{\omega\sin\gamma+s\cos\gamma}{s^2+\omega^2}\right)+i_{d0}\frac{1}{s+\frac{R}{L}}$
  - $Z=\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$
  - $\gamma=\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷

- $I_d = \left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma - \alpha) + i_{d0}\right]\frac{1}{s+\frac{R}{L}} + \frac{V}{Z}\frac{\omega\ \cos(\alpha-\gamma)+s\ \sin(\alpha-\gamma)}{s^2+\omega^2}$
- $i_d(\tau) = \left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma - \alpha) + i_{d0}\right]e^{-\frac{R}{L}\tau} + \frac{V}{Z}[\cos(\alpha - \gamma)\sin\omega\tau + \sin(\alpha - \gamma)\cos\omega\tau] = \left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma - \alpha) + i_{d0}\right]e^{-\frac{R}{L}\tau} + \frac{V}{Z}\sin(\omega\tau + \alpha - \gamma)$
- 時間をtに戻す
- $i_d(t) = \left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma - \alpha) + i_{d0}\right]e^{-\frac{R}{L}\left(t-\frac{\alpha}{\omega}\right)} + \frac{V}{Z}\sin(\omega t - \gamma)$

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷

- 連続導通の場合，電流初期値と終端値が等しい
  - $i_d\left(\frac{\alpha+\pi}{\omega}\right)=i_{d0}=\left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)+i_{d0}\right]e^{-\frac{R}{L}\left(\frac{\alpha+\pi}{\omega}-\frac{\alpha}{\omega}\right)}+\frac{V}{Z}\sin\left(\omega\frac{\alpha+\pi}{\omega}-\gamma\right)=\left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)+i_{d0}\right]e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}-\frac{V}{Z}\sin(\alpha-\gamma)$
  - $i_{d0}\left(1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right)=\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)\left(1+e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right)$
  - $i_{d0}=\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)\frac{1+e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}$

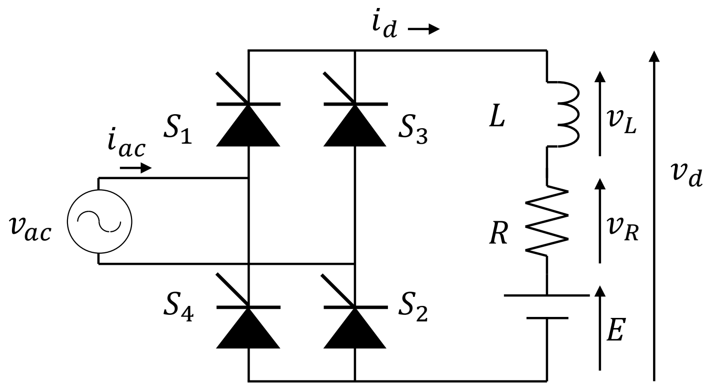
サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷

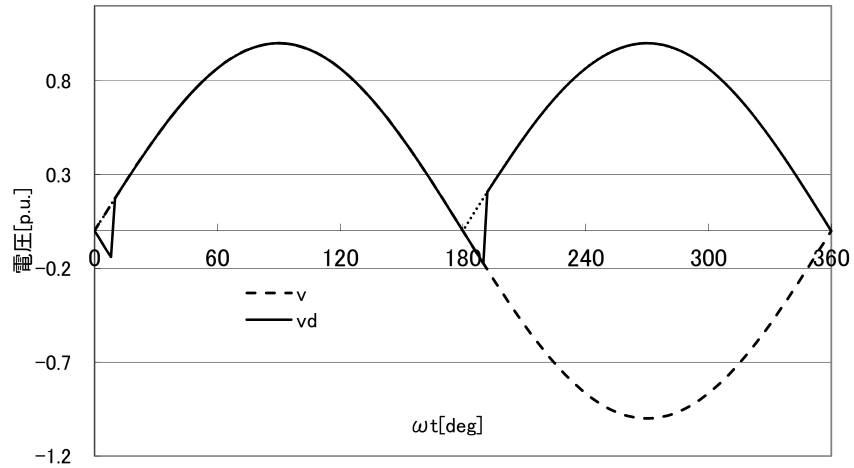
- 不連続導通となる場合
  - $i_{d0} = \frac{V}{Z}\sin(\gamma - \alpha)\frac{1+e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} < 0$
  - $\sin(\gamma - \alpha) < 0$
  - 消弧角βは$i_{d0} = 0$より
    - $i_d\left(\frac{\beta}{\omega}\right) = \frac{V}{Z}\sin(\gamma - \alpha)\, e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta-\alpha)} + \frac{V}{Z}\sin(\beta - \gamma) = 0$
    - $\sin(\gamma - \alpha)\, e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta-\alpha)} + \sin(\beta - \gamma) = 0$を数値解として求める

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　誘導性負荷

- 出力電圧平均値
  - 連続導通時(半周期の平均)
    - $V_d = \frac{2}{T}\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\pi}{\omega}} V \sin \omega t \, dt = \frac{2V}{T}\left[-\frac{\cos \omega t}{\omega}\right]_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}$
    $= \frac{2V}{\omega T}[-\cos(\alpha+\pi)+\cos\alpha] = \frac{2V}{\pi}\cos\alpha$
    - 点弧角αで出力電圧を制御できる
  - 不連続導通時
    - $V_d = \frac{2}{T}\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\beta}{\omega}} V \sin \omega t \, dt = \frac{V}{\pi}[-\cos\beta + \cos\alpha]$
    - 連続導通時より小さくなる

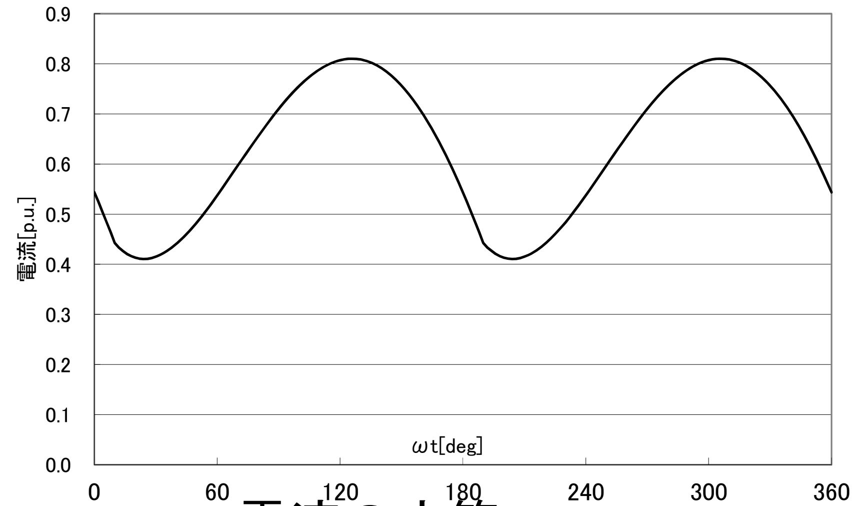
サイリスタHブリッジ回路
位相制御　起電力付誘導性負荷





電圧の応答

- 起電力があるため，直流から交流に電力を逆変換可能



電流の応答

サイリスタHブリッジ回路 位相制御　起電力付誘導性負荷

- サイリスタがターンオン可能な点弧角の条件
  - $V \sin \alpha > E$
- 導通状態のKVL
  - $v = v_R + v_L + E = Ri_d + L\frac{di_d}{dt} + E$
- 連続導通時の出力電圧平均値
  - $V_d = \frac{2V}{\pi}\cos \alpha$
    - $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \quad \rightarrow \qquad V_d > 0$
    - $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \quad \rightarrow \qquad V_d < 0$

サイリスタHブリッジ回路
位相制御　起電力付誘導性負荷

- $V\frac{\omega\cos\alpha+s\sin\alpha}{s^2+\omega^2}=RI_d+L(sI_d-i_{d0})+\frac{E}{S}$
- $I_d=\left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)+i_{d0}\right]\frac{1}{s+\frac{R}{L}}+$
$\frac{V}{Z}\frac{\omega\cos(\alpha-\gamma)+s\sin(\alpha-\gamma)}{s^2+\omega^2}-\frac{E}{R}\left[\frac{1}{s}-\frac{1}{s+\frac{R}{L}}\right]$
- $i_d(t)=\left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)+i_{d0}\right]e^{-\frac{R}{L}\left(t-\frac{\alpha}{\omega}\right)}+$
$\frac{V}{Z}\sin(\omega t-\gamma)+\frac{E}{R}\left[1-e^{-\frac{R}{L}\left(t-\frac{\alpha}{\omega}\right)}\right]$

サイリスタHブリッジ回路 位相制御　起電力付誘導性負荷

- $i_d\left(\frac{\alpha+\pi}{\omega}\right) = i_{d0} = \left[\frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha) + i_{d0}\right]e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} - \frac{V}{Z}\sin(\alpha-\gamma) + \frac{E}{R}\left[1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}\right]$

- $i_{d0} = \frac{V}{Z}\sin(\gamma-\alpha)\frac{1+e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1-e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} + \frac{E}{R}$

サイリスタHブリッジ回路 位相制御　起電力付誘導性負荷

- 起電力がある場合の連続導通条件
  - $i_{d0} = \frac{V}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\sin(\alpha-\gamma)\frac{e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}+1}{e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}-1}+\frac{E}{R} > 0$
  - $\sin(\alpha-\gamma) > \frac{E}{V}\frac{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}{R}\frac{e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}-1}{e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}+1}$
- Lが十分大きい場合$I_d = I_{rms}$(極性は不変)
  - $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \quad \rightarrow \quad P_d = V_d I_d > 0$　順変換
  - $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \quad \rightarrow \quad P_d = V_d I_d < 0$　逆変換