パワーエレクトロニクス
第六回　多相整流回路

2020年5月27日

授業の予定

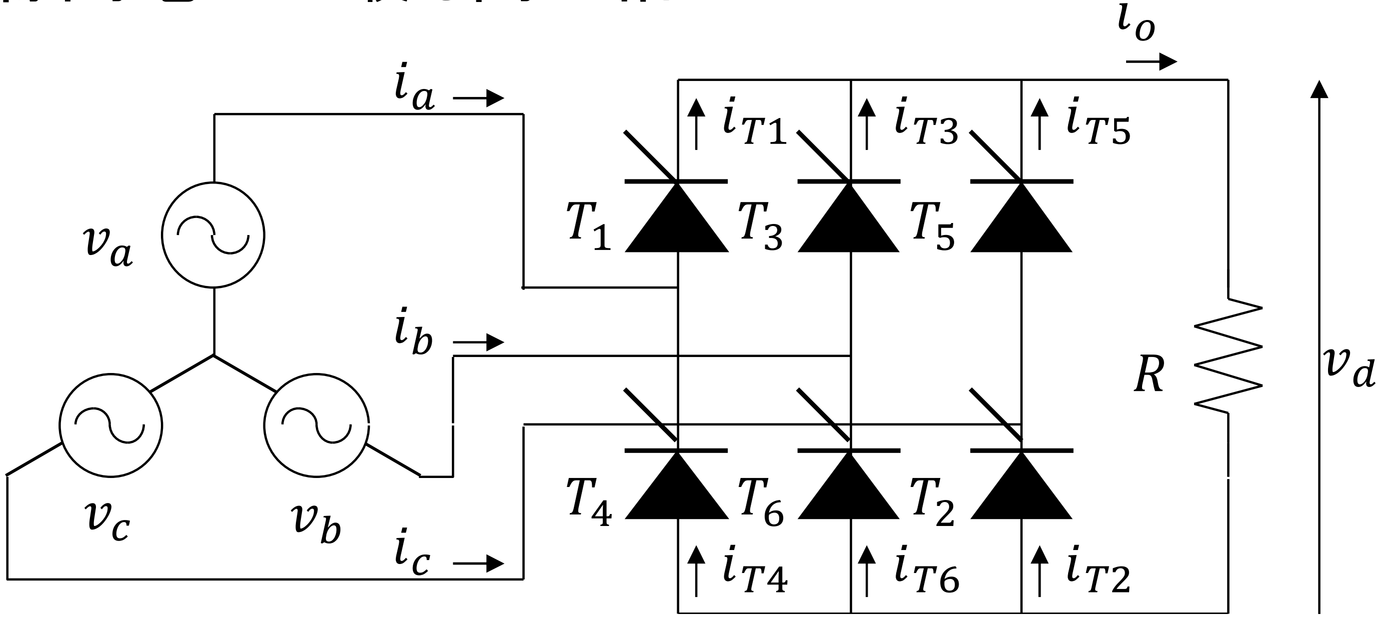
- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

多相整流回路

- 半波整流回路
- 全波整流回路
- 負荷条件
  - 抵抗負荷
  - 誘導負荷
- 出力
  - 電圧
  - 高調波
  - 歪率
- 可制御素子
  - サイリスタを用いた点弧位相制御
    - 誘導負荷
    - 起電力付誘導負荷
    - 定電流源
- 転流
  - 転流重なり角

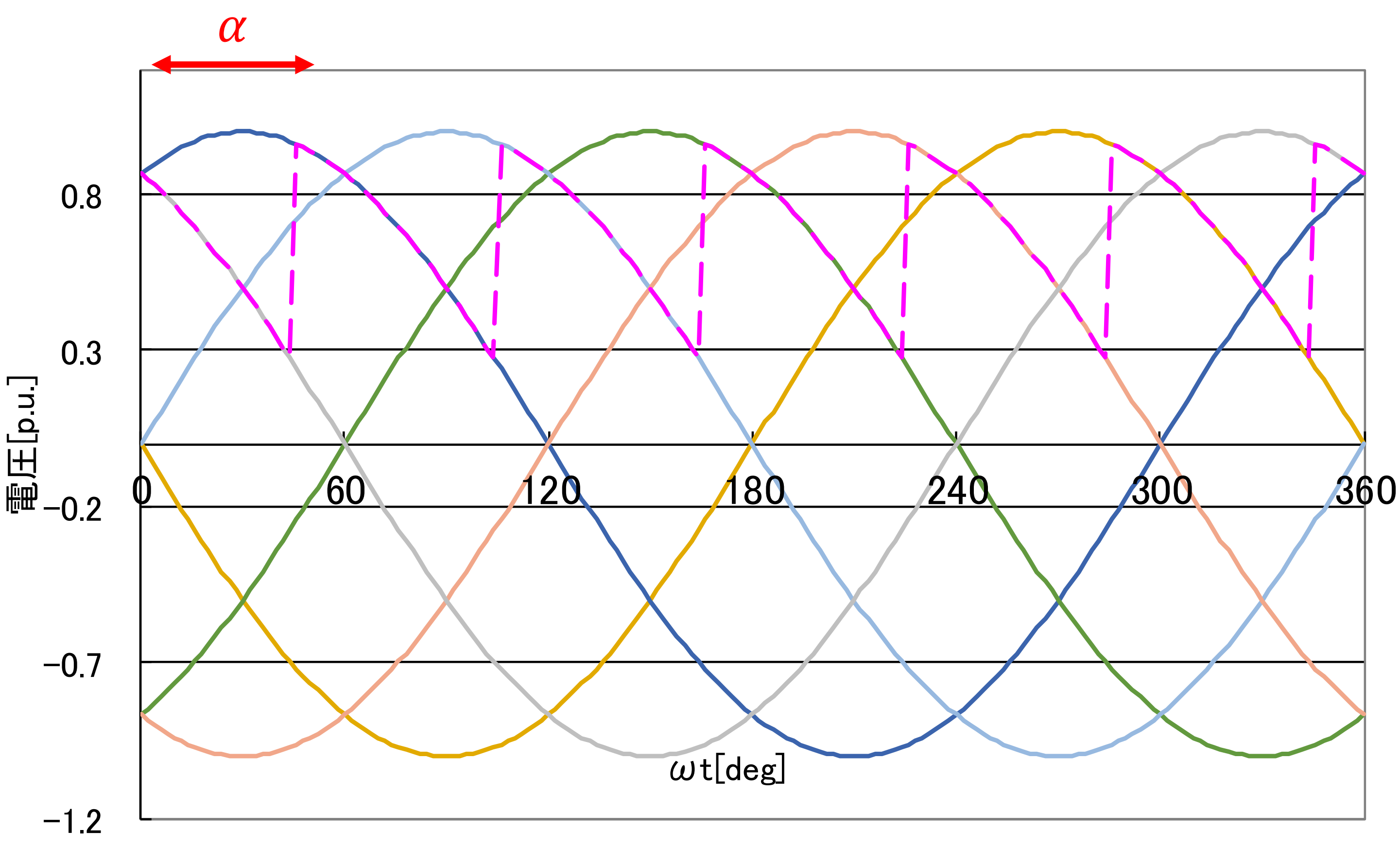
位相制御三相全波整流回路

- サイリスタは順方向電圧が印加された状態でゲート信号が与えられるまで遮断状態を維持
  - 次の相のゲート信号が与えられるまで導通
    - 線間電圧の最も高い相



位相制御三相全波整流回路

- 点弧角$\alpha = 45^\circ$



位相制御三相全波整流回路

- 直流出力平均電圧
  - 60°毎に導通するサイリスタペアが交代
  - $V_O = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha} \sqrt{3}V \sin \omega t \, d\omega t$

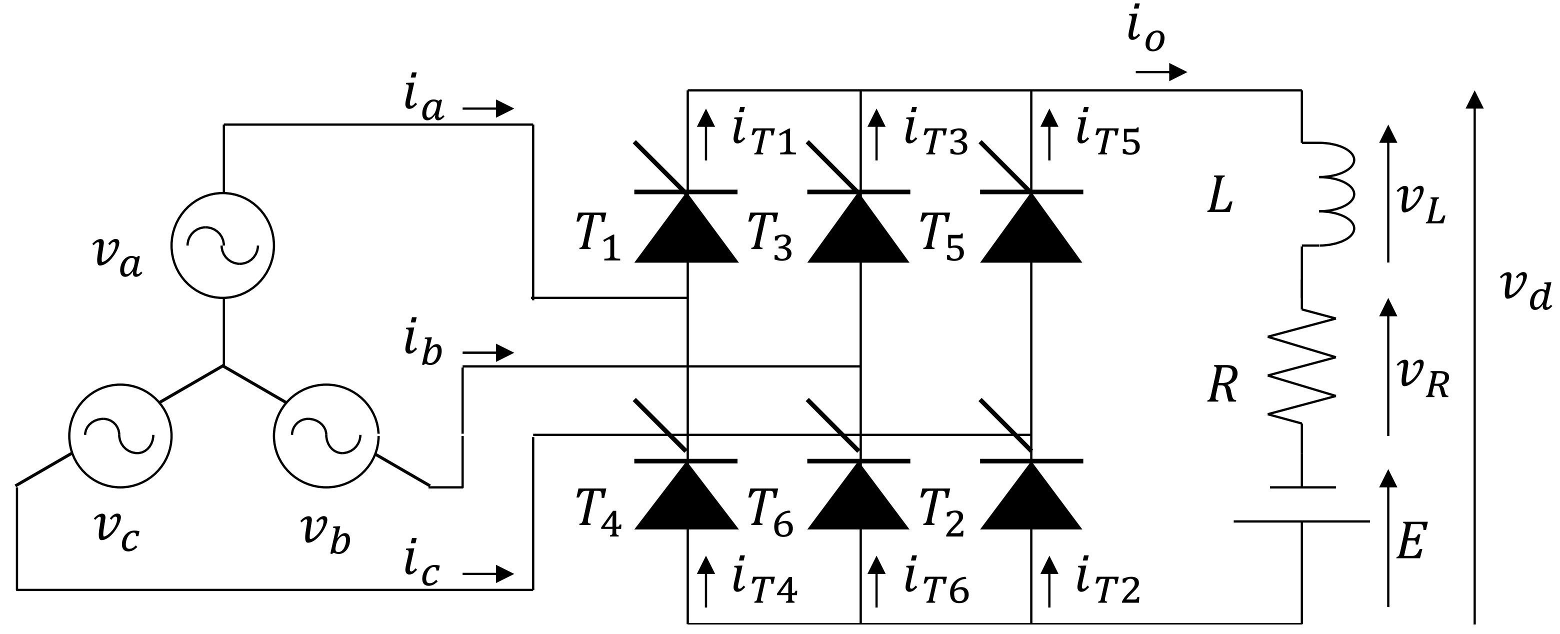
$$= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} [-\cos \omega t]_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha}$$

$$= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \cos \alpha$$

  - $90^\circ < \alpha$で$\cos \alpha$は負となる

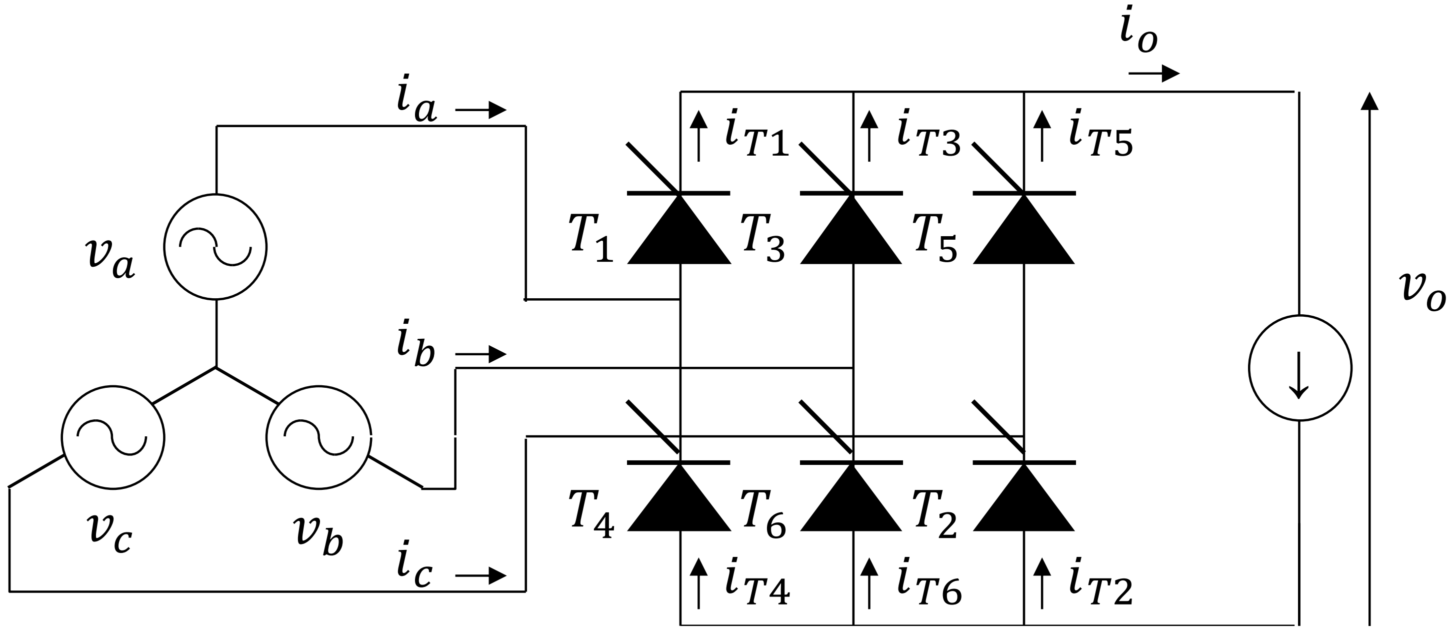
位相制御三相全波サイリスタ回路インバータ運転

- 直流側に誘導性電源を有する
  - 負極性の直流電圧



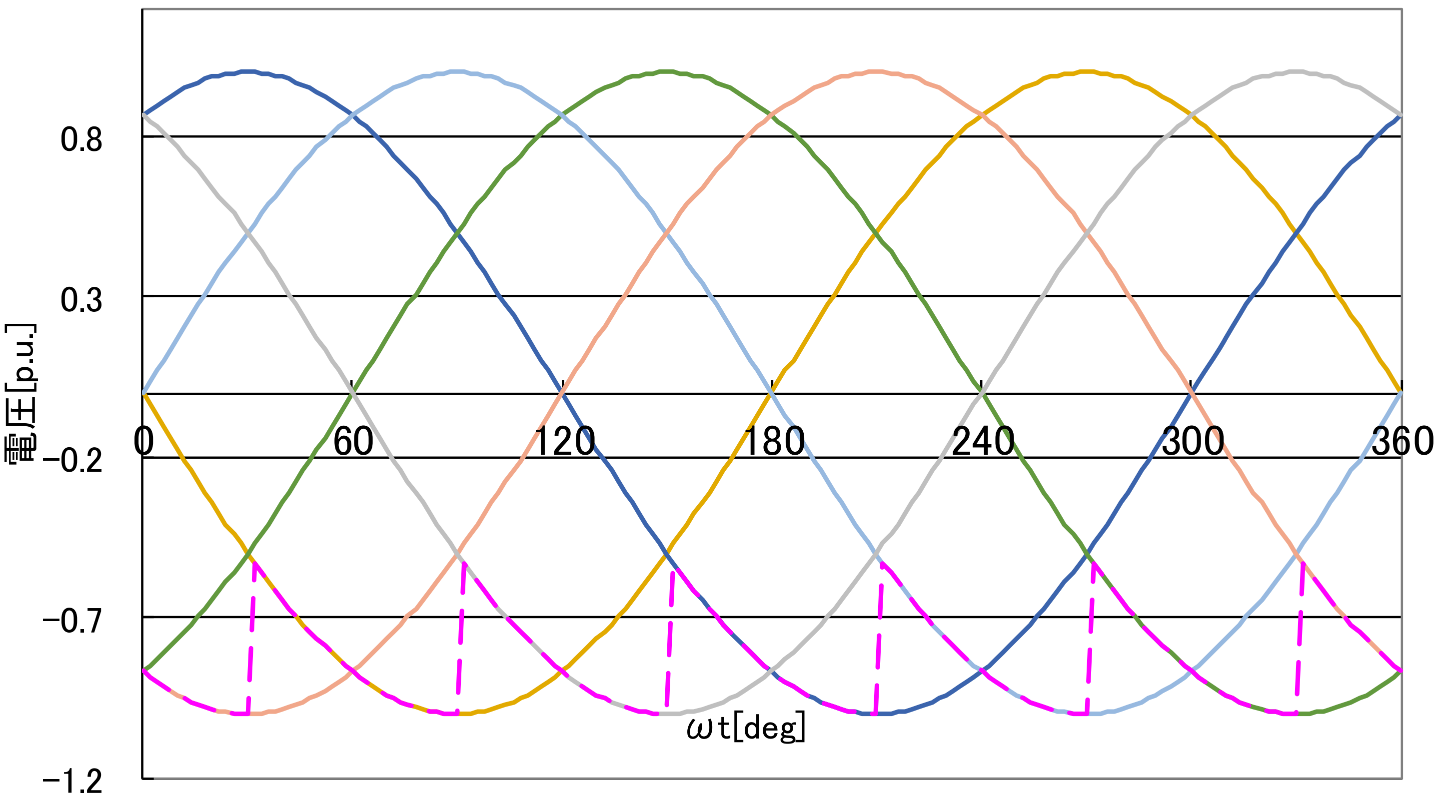
位相制御三相全波サイリスタ回路 インバータ運転

- $0^\circ < \alpha < 90^\circ$　　整流動作
- $90^\circ < \alpha < 180^\circ$　　インバータ動作

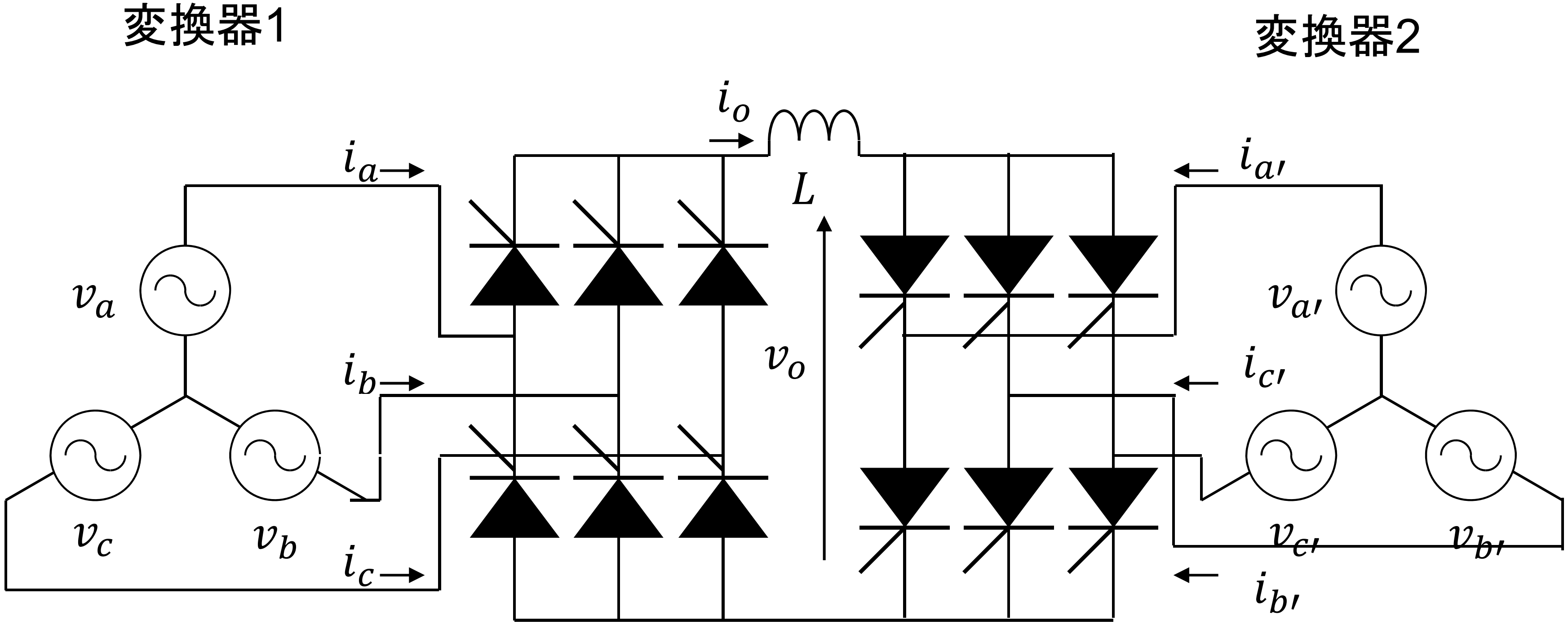


位相制御三相全波サイリスタ回路 インバータ運転

- 点弧角$\alpha = 150^{\circ}$



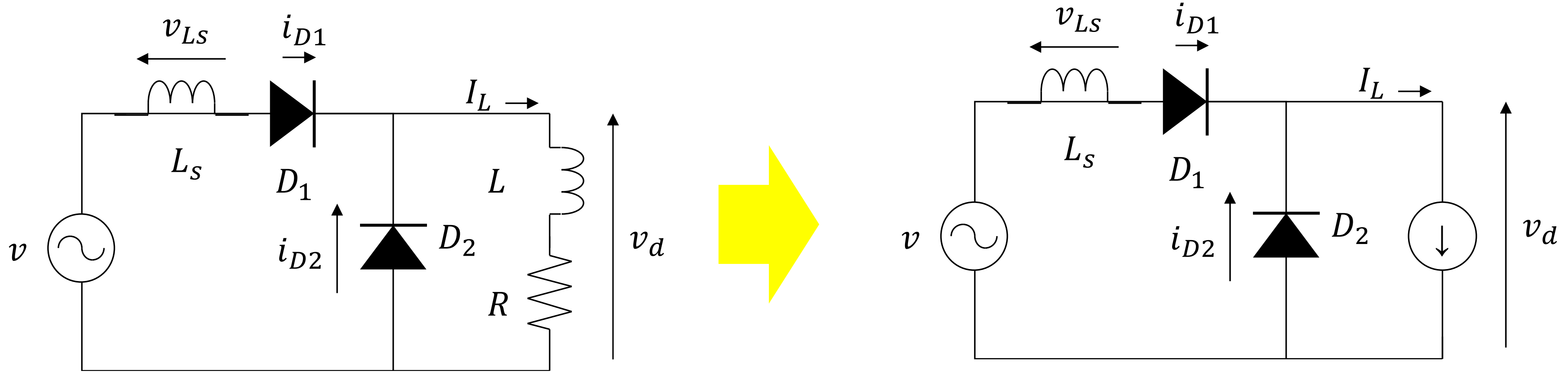
位相制御サイリスタ回路を用いた直流送電



整流動作　→　インバータ動作
インバータ動作　→　整流動作

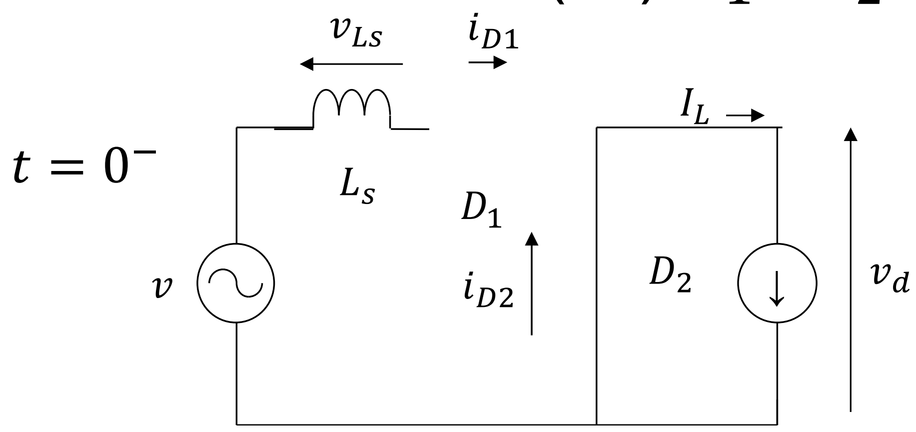
転流
交流電源インダクタンスの影響

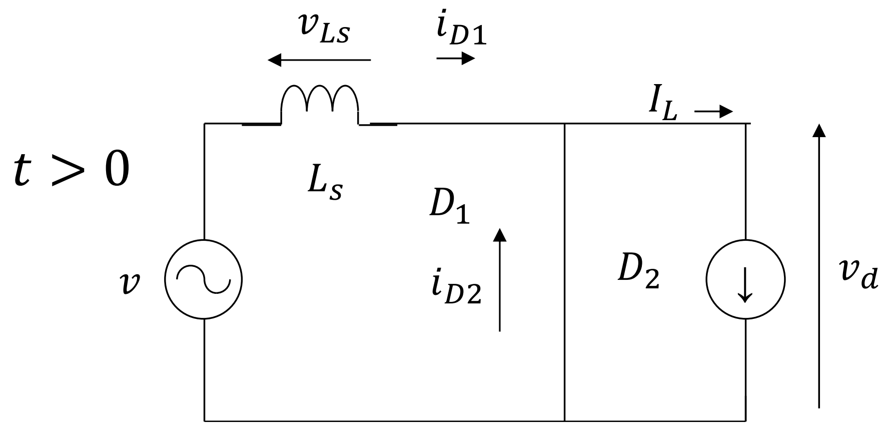
- 現実の回路では交流電源に誘導性リアクタンスが存在する
  - 変圧器の漏れインダクタンス等
- 還流ダイオード付き半波整流回路
  - 誘導負荷(L大)→定電流源で模擬



転流
半波整流回路

- 初期状態
  - $t = 0^-$:D_1:オフ→$I_{D1} = 0$ D_2:オン→$I_{D2} = I_L$
  - $t = 0$, $v(t) > 0$となるとD_1ターンオン
    - L_sがあるため電流は瞬間的に変化しない
    - $I_{D1} = I_L$となるまでD_2はオンしつづける
    - 転流期間(角):D_1とD_2が両方オンしている期間





転流
半波整流回路

- 電源電圧　$v(t) = V_m \sin \omega t$
- D_1, D_2がオン状態でL_sに印加される電圧
  - $v_{Ls} = v(t) = V_m \sin \omega t$
- L_sに流れる電流$i_s(t)$
  - $v_{Ls} = L_s \frac{d}{dt} i_s$
  - $i_s(t) = \frac{1}{L_s} \int_0^t v_{Ls} dt = \frac{V_m}{L_s} \int_0^t \sin \omega t \, dt$

$$= \frac{V_m}{\omega L_s} [-\cos \omega t]_0^t = \frac{V_m}{\omega L_s} (1 - \cos \omega t)$$

転流
半波整流回路

- D_2に流れる電流
  - $i_{D2} = I_L - i_{D1} = I_L - \frac{V_m}{\omega L_s}(1 - \cos \omega t)$
  - $i_{D2} = 0$となった時点($\omega t = u$)で転流終了
    - $I_L - \frac{V_m}{\omega L_s}(1 - \cos u) = 0$
    - $1 - \cos u = \frac{I_L \omega L_s}{V_m}$
    - $u = \cos^{-1}\left(1 - \frac{I_L \omega L_s}{V_m}\right) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{I_L X_s}{V_m}\right)$
      - 電源のリアクタンス$X_s = \omega L_s$

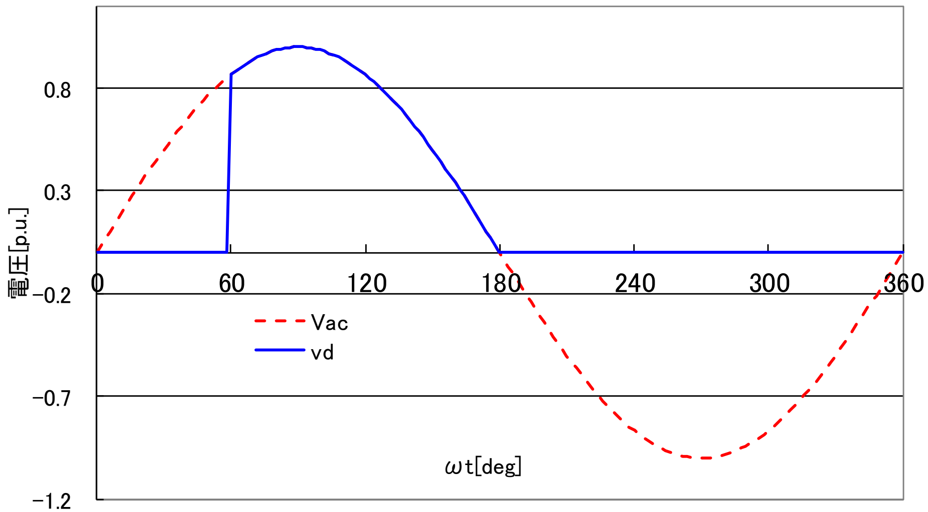
転流
半波整流回路

- 転流により平均出力直流電圧は低下する
  - 転流期間中は負荷に印加される電圧は0
  - 平均出力直流電圧$V_O = \frac{1}{T}\int_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{2}} V_m \sin \omega t \, dt$

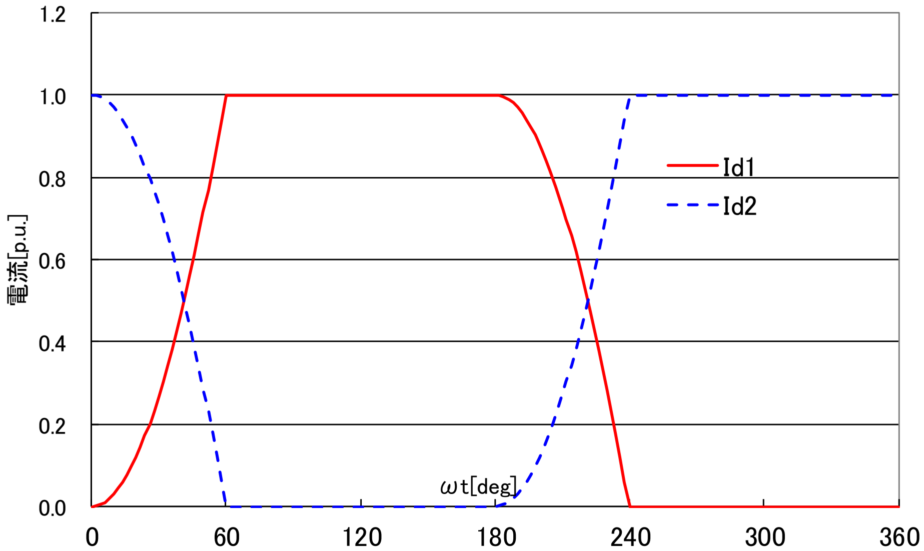
$$= \frac{V_m}{2\pi}\left[-\cos \omega t\right]_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{2}} = \frac{V_m}{2\pi}(1 + \cos u)$$

$$= \frac{V_m}{\pi}\left(1 - \frac{I_L X_s}{2V_m}\right)$$

転流
半波整流回路



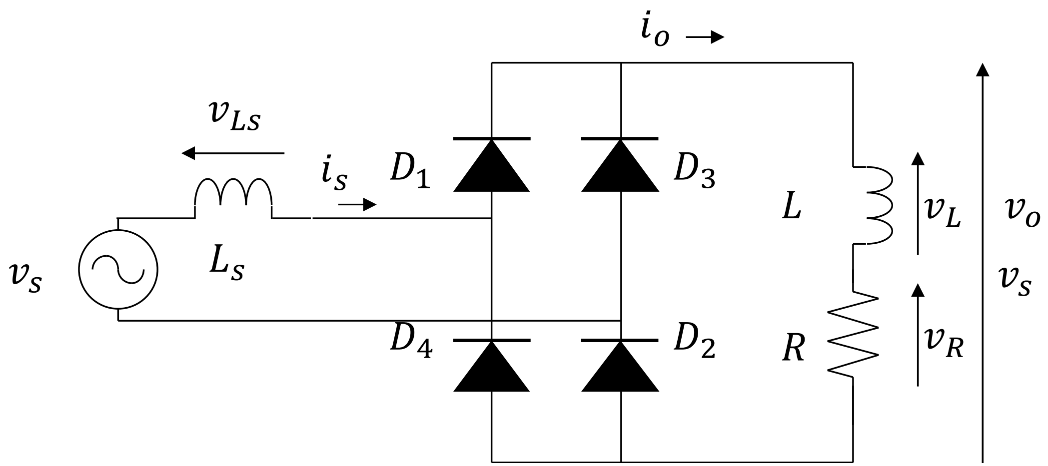
0.8
0.3
−0.2
−0.7
−1.2
電圧[p.u.]
0
60
120
180
240
300
360
Vac
vd
ωt[deg]

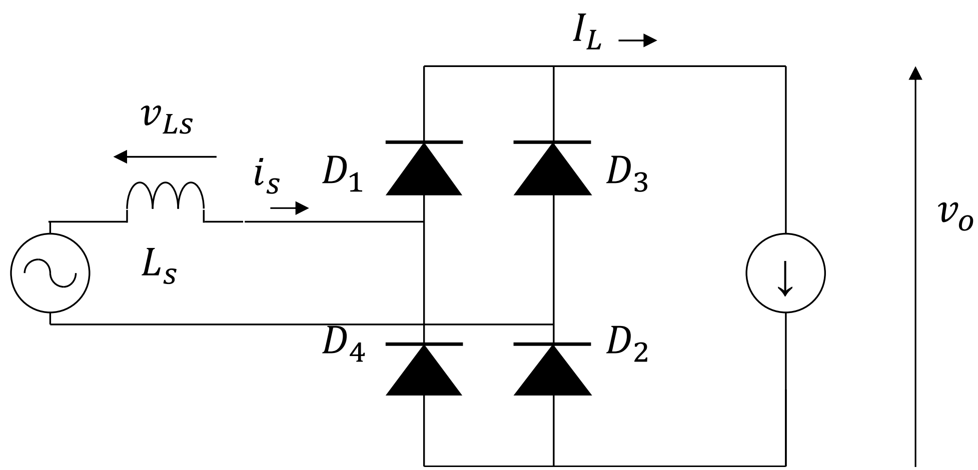


1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
電流[p.u.]
Id1
Id2
ωt[deg]
0
60
120
180
240
300
360

転流
単相全波整流回路

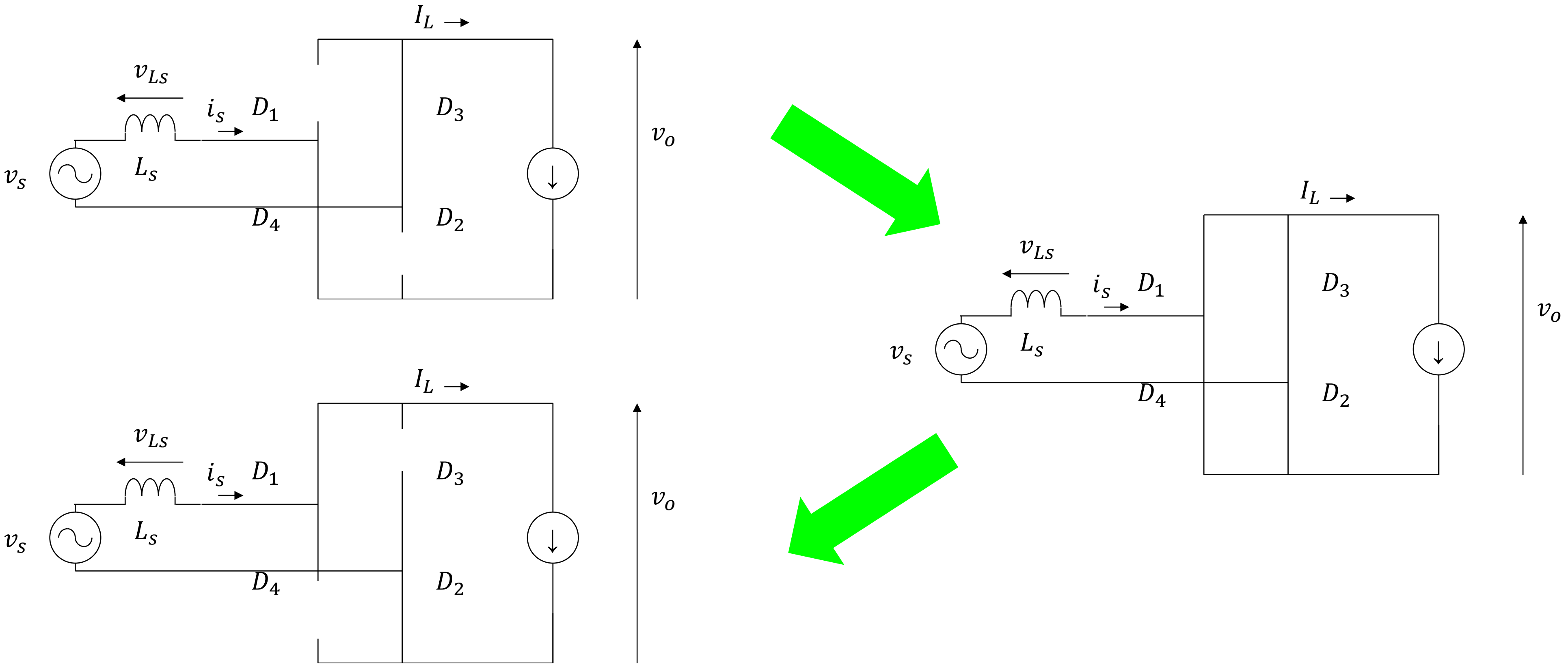
- 導通するダイオードの組み合わせの遷移
  - $D_1, D_2 \rightarrow D_3, D_4 \rightarrow D_1, D_2$
  - 転流期間中は4つ全てのダイオードがオン





転流
単相全波整流回路

- 例　D_3, D_4からD_1, D_2への転流
  - 電源電流　$-I_L$から$+I_L$へ変化



転流
単相全波整流回路

- 電源電圧　$v(t) = V_m \sin \omega t$
- L_sに流れる電流$i_s(t)$
  - $i_s(t) = \frac{V_m}{L_s}\int_0^t \sin \omega t \, dt - I_L$

$$= \frac{V_m}{\omega L_s}[-\cos \omega t]_0^t - I_L = \frac{V_m}{\omega L_s}(1 - \cos \omega t) - I_L$$

  - 転流終了時$\left(t = \frac{u}{\omega}\right)$の電流
    - $i_s\left(\frac{u}{\omega}\right) = I_L = \frac{V_m}{\omega L_s}(1 - \cos u) - I_L$

転流
単相全波整流回路

- 転流重なり角u
  - $\frac{V_m}{\omega L_s}(1-\cos u) = 2I_L$
  - $1-\cos u = \frac{2I_L \omega L_s}{V_m}$
  - $\cos u = 1 - \frac{2I_L \omega L_s}{V_m}$
  - $u = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2I_L \omega L_s}{V_m}\right)$

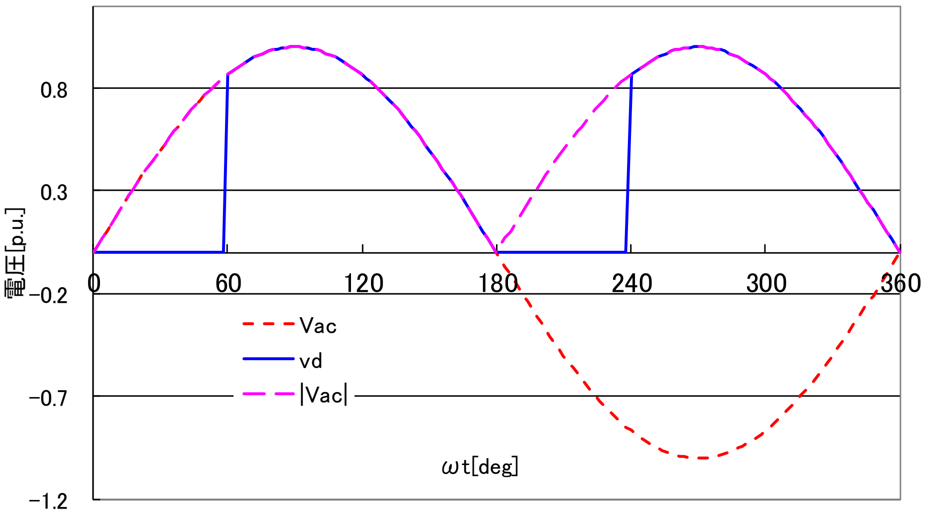
転流
単相全波整流回路

- 転流により平均出力直流電圧は低下する
  - 転流期間中は負荷に印加される電圧は0
  - 半周期毎に繰り返す
  - 平均出力直流電圧$V_O = \frac{2}{T}\int_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{2}} V_m \sin\omega t \, dt$

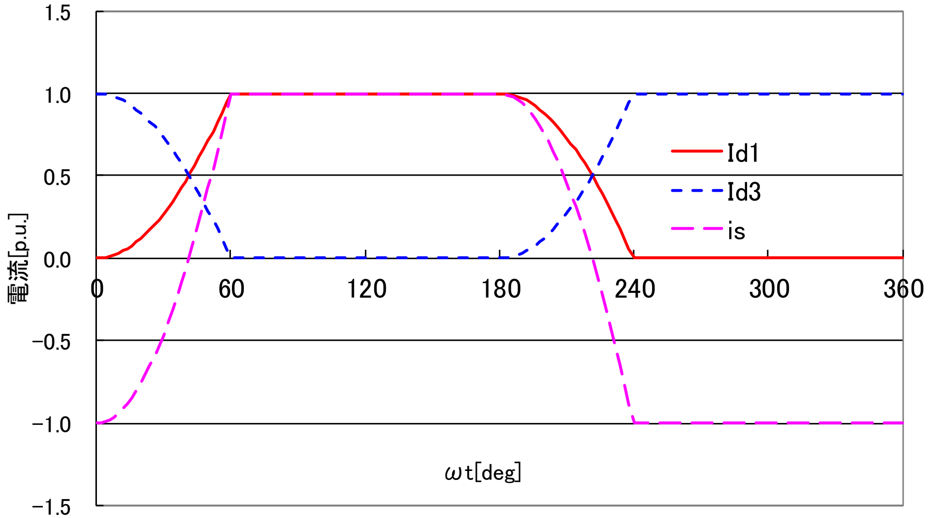
$$= \frac{V_m}{\pi}[-\cos\omega t]_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{2}} = \frac{V_m}{\pi}(1+\cos u)$$

$$= \frac{2V_m}{\pi}\left(1 - \frac{I_L X_s}{V_m}\right)$$

転流
単相全波整流回路



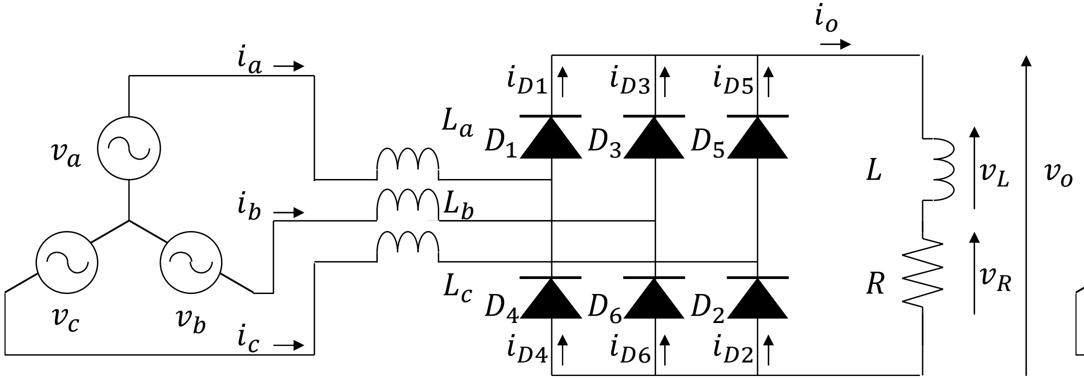
0.8
0.3
-0.2
-0.7
-1.2
0
60
120
180
240
300
360
電圧[p.u.]
Vac
vd
|Vac|
ωt[deg]

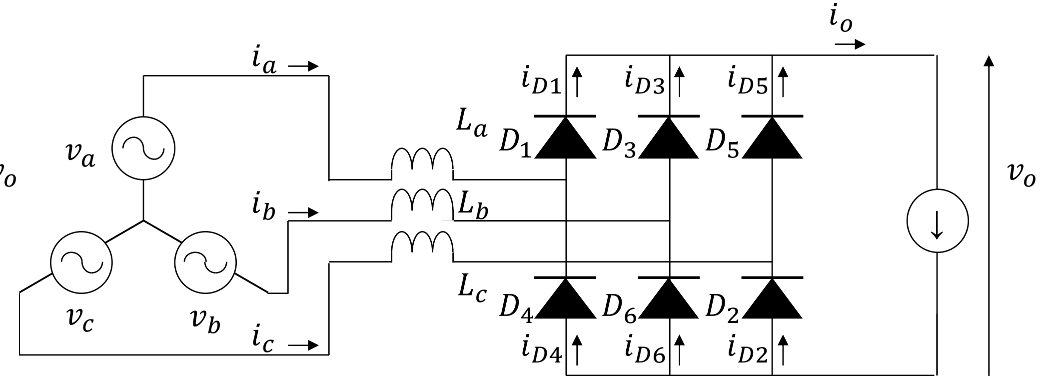


1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
0
60
120
180
240
300
360
電流[p.u.]
Id1
Id3
is
ωt[deg]

転流
三相全波整流回路

- 導通するダイオードの組み合わせの遷移
  - 同時にオンしているダイオードは上下各一つ
  - $D_1, D_2 \rightarrow D_3, D_2 \rightarrow D_3, D_4 \rightarrow D_5, D_4 \rightarrow D_5, D_6 \rightarrow D_1, D_6 \rightarrow D_1, D_2$
  - 転流期間中は3つのダイオードがオン



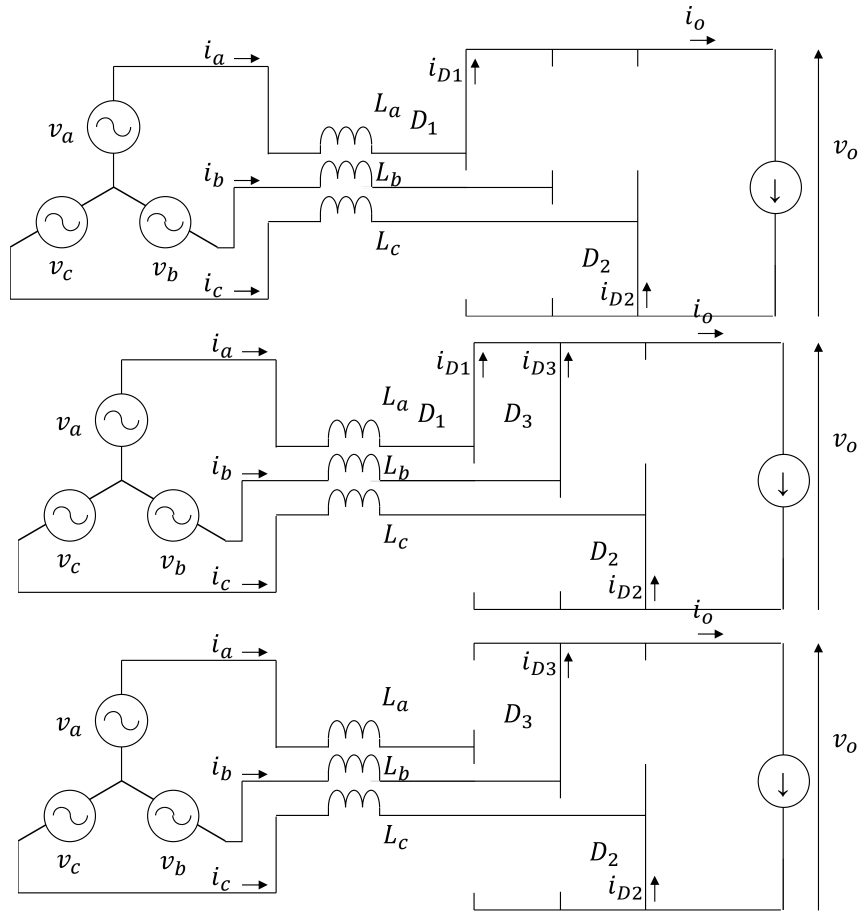


転流
三相全波整流回路

- 相電圧
  - $v_a(t) = \frac{V_m}{\sqrt{3}} \sin\left(\omega t + \frac{5}{6}\pi\right)$
  - $v_b(t) = \frac{V_m}{\sqrt{3}} \sin\left(\omega t + \frac{1}{6}\pi\right)$
  - $v_c(t) = \frac{V_m}{\sqrt{3}} \sin\left(\omega t - \frac{1}{2}\pi\right)$
- 線間電圧
  - $v_{ab}(t) = V_m \sin(\omega t - \pi)$
  - $v_{bc}(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{5}{3}\pi\right)$
  - $v_{ca}(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{1}{3}\pi\right)$
  - $v_{ba}(t) = V_m \sin \omega t$
  - $v_{cb}(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$
  - $v_{ac}(t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$

転流
三相全波整流回路

- 例　D_1, D_2からD_3, D_2への転流
  - D_1, D_2の導通状態
    - $v_{ac} > v_{ab}, v_{ac} > v_{bc}$
  - $v_b > v_a$となると転流開始
    - D_1, D_2, D_3が導通
  - D_3, D_2の導通状態
    - $v_{bc} > v_{ac}, v_{bc} > v_{ba}$



転流
三相全波整流回路

- D_1からD_3への転流において
  - L_a, L_bに印加される電圧v_{La}, v_{Lb}
    - $v_{Lb} - v_{La} = v_{ba} = V_m \sin \omega t$
      - $t > 0$で$v_b > v_a$となる
      - $L_a = L_b$なので$v_{La} = -v_{Lb}$
        - $v_{La} = -\frac{V_m}{2} \sin \omega t$
- 転流期間中の電流i_{La}の変化
  - $v_{La} = L_a \frac{di_{La}}{dt}$

転流
三相全波整流回路

- D_1からD_3への転流
  - L_aの電流初期値I_L
  - 転流期間中にL_aの電流i_{La}はI_L →0となる
  - 重なり角u
  - $i_{La}\left(\frac{u}{\omega}\right) = 0 = \frac{1}{L_a}\int_0^{\frac{u}{\omega}} -\frac{V_m}{2}\sin\omega t\, dt + I_L$

$$= \frac{V_m}{2\omega L_a}[\cos\omega t]_0^{\frac{u}{\omega}} + I_L$$

$$= \frac{V_m}{2\omega L_a}(\cos u - 1) + I_L$$

転流
三相全波整流回路

- $\frac{V_m}{2\omega L_a}(\cos u - 1) = -I_L$
- $\cos u = 1 - \frac{2\omega L_a I_L}{V_m}$
- $u = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2\omega L_a I_L}{V_m}\right) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2X_s I_L}{V_m}\right)$

転流
三相全波整流回路

- 転流中負荷に印加される電圧
  - $v_o = \frac{v_{bc}+v_{ca}}{2} = \frac{V_m}{2}\left\{\sin\left(\omega t - \frac{5}{3}\pi\right) + \sin\left(\omega t - \frac{1}{3}\pi\right)\right\}$
    $$= \frac{\sqrt{3}V_m}{2}\cos\omega t$$
  - $\frac{1}{6}$周期毎に繰り返す
  - 平均出力直流電圧$V_O = \frac{6}{T}\int_0^{\frac{T}{6}} v_o(t)dt$
    $$= \frac{6}{T}\left\{\int_0^{\frac{u}{\omega}} \frac{v_{bc}+v_{ca}}{2}dt + \int_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{6}} v_{bc}dt\right\}$$

転流
三相全波整流回路

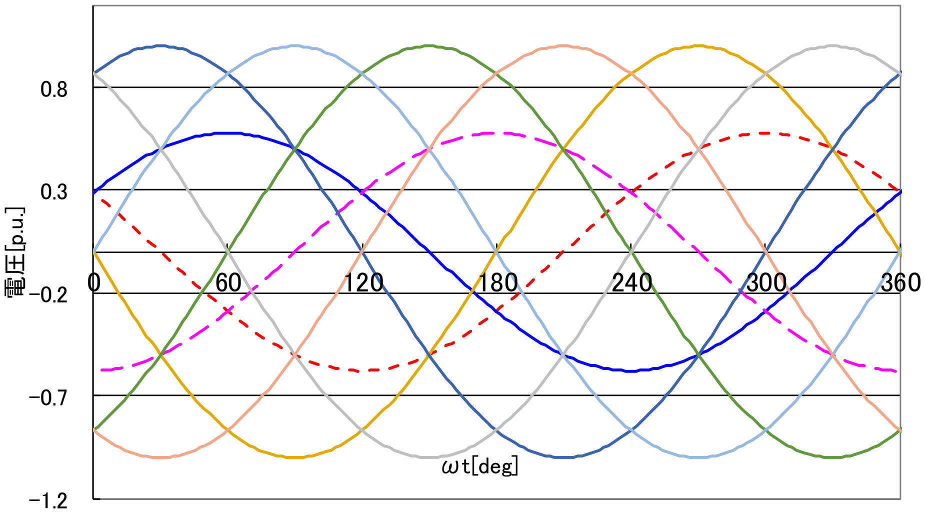
- $V_O = \frac{6}{T}\left\{\int_0^{\frac{u}{\omega}} \frac{\sqrt{3}V_m}{2}\cos\omega t\, dt + \int_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{6}} V_m \sin\left(\omega t - \frac{5}{3}\pi\right) dt\right\}$

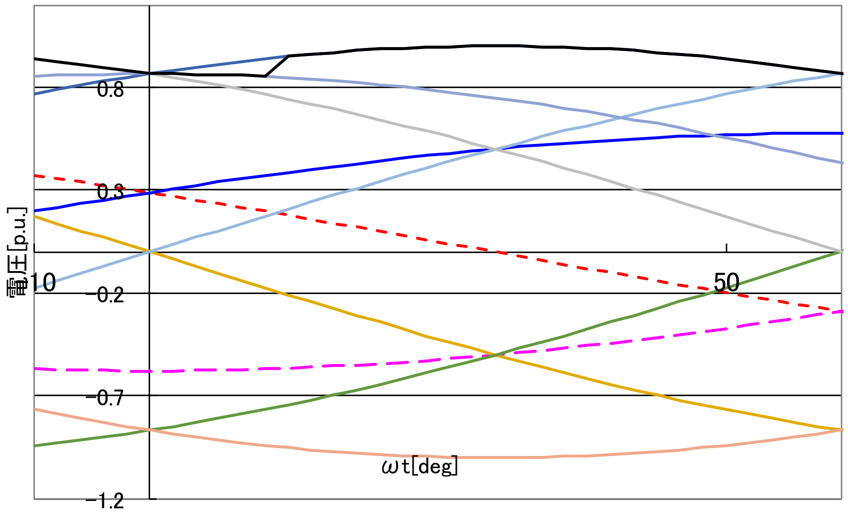
$$= \frac{6V_m}{T}\left\{\frac{\sqrt{3}}{2\omega}[\sin\omega t]_0^{\frac{u}{\omega}} + \frac{1}{\omega}\left[-\cos\left(\omega t - \frac{5}{3}\pi\right)\right]_{\frac{u}{\omega}}^{\frac{T}{6}}\right\}$$

$$= \frac{6V_m}{\pi}\left\{\frac{\sqrt{3}}{2}\sin u + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos u - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin u\right\}$$

$$= \frac{3V_m}{\pi}\{1 + \cos u\} = \frac{3V_m}{\pi}\left(1 - \frac{I_L X_s}{V_m}\right)$$

転流
単相全波整流回路





転流を考えなければ$90^\circ < \alpha < 180^\circ$でインバータ動作となるが
転流を考える場合$\alpha + u < 180^\circ$となる範囲でしか次の相に転流してインバータ運転ができない