Introduction to Power Electronics

by D. W. Hart

Chapter 4. Full-wave Rectifier

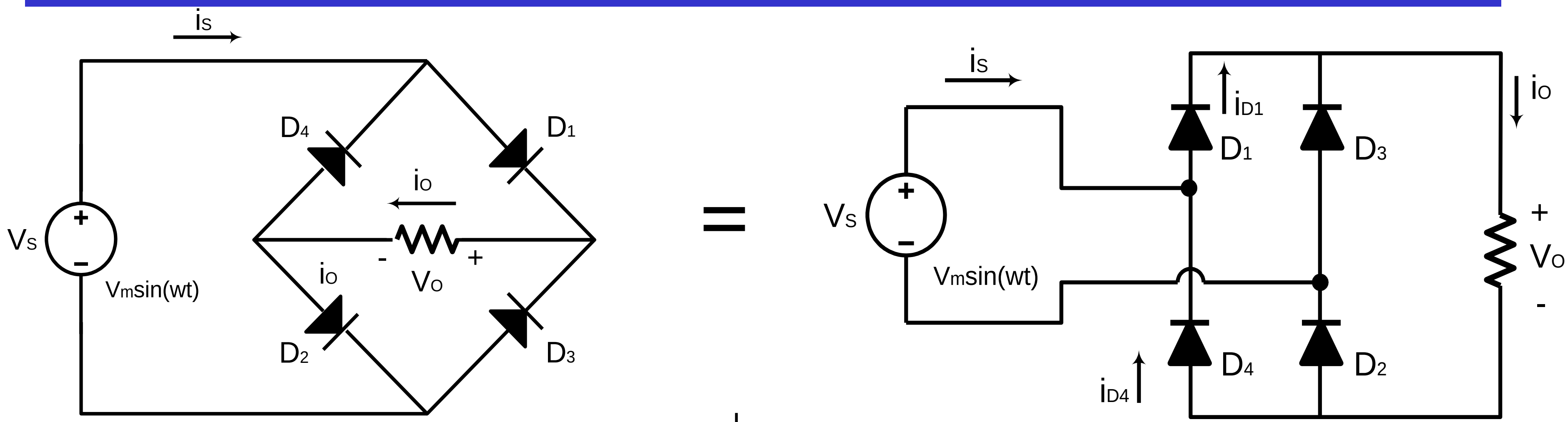
Contents

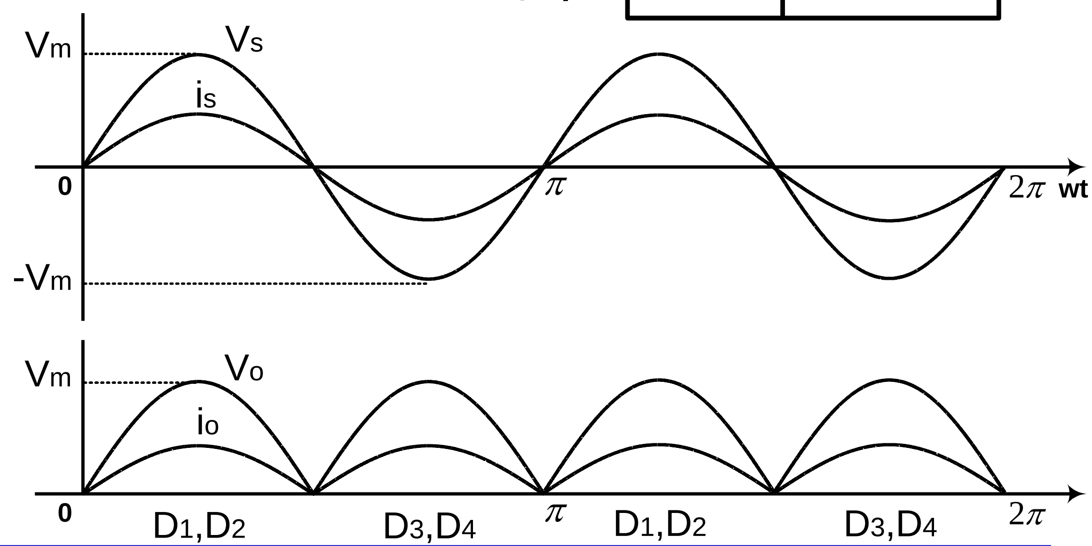
1 단상 전파 정류기

2 커패시터 필터를 가진 단상 전파 정류기

3 단상 전파 제어 정류기

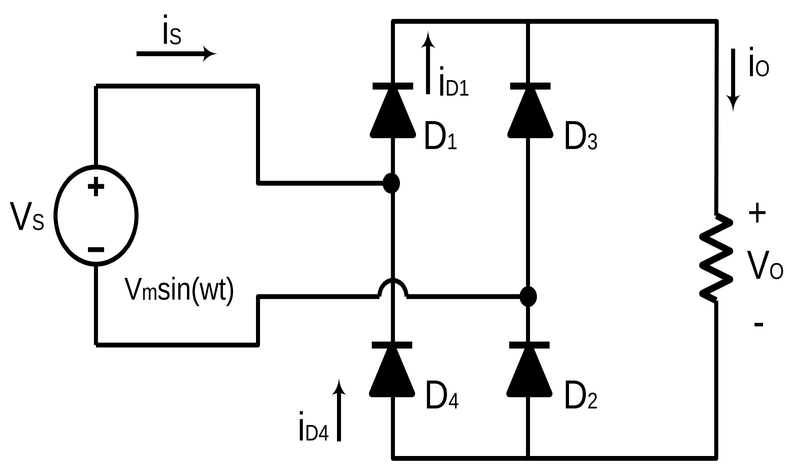
단상 전파 정류기(브리지 정류기1)

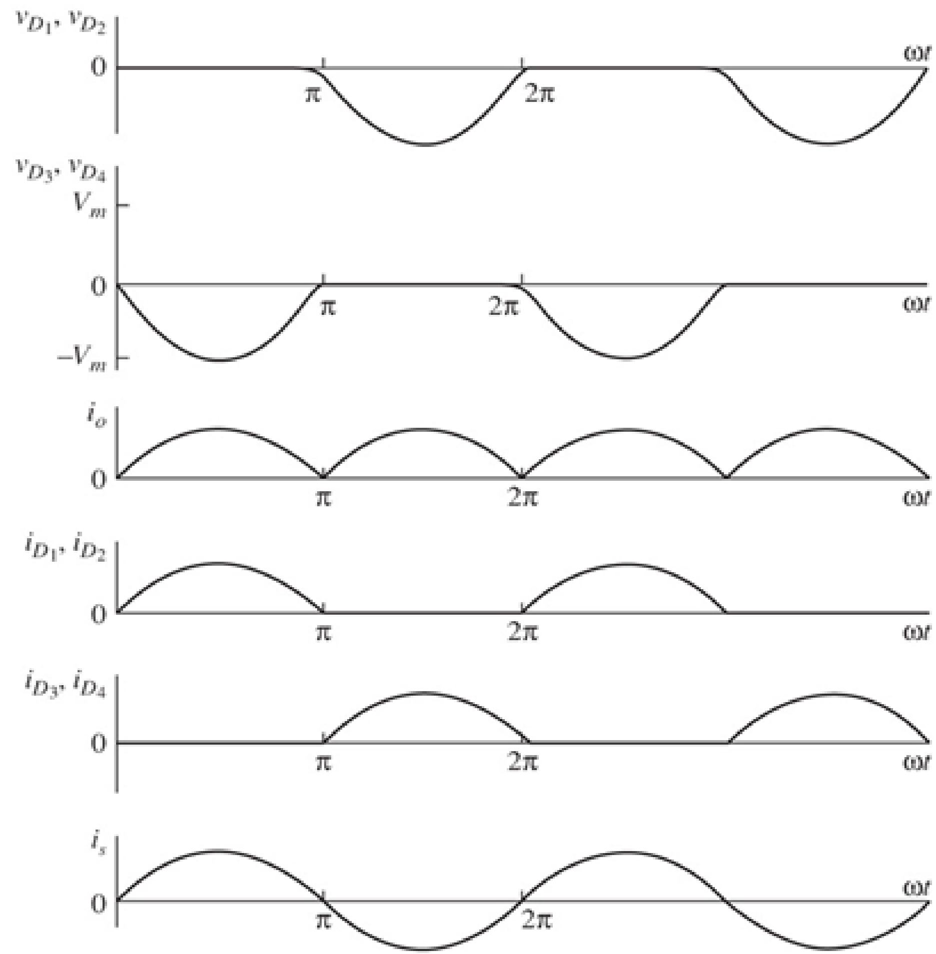




- 출력전압의 주파수는 입력 전압의 주파수의 2배가 된다.
- 다이오드에 걸리는 역전압의 최대치는 인가전압의 최대치와 같다.
- 고전압 응용에 적합

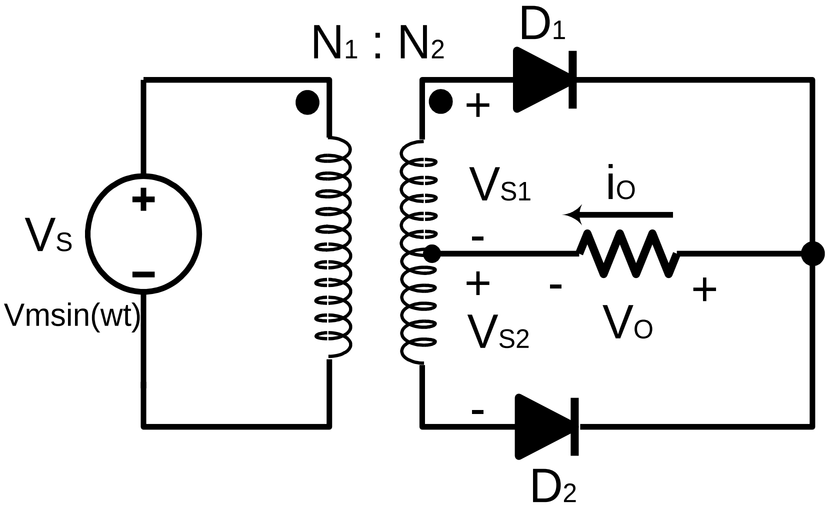
단상 전파 정류기(브리지 정류기2)

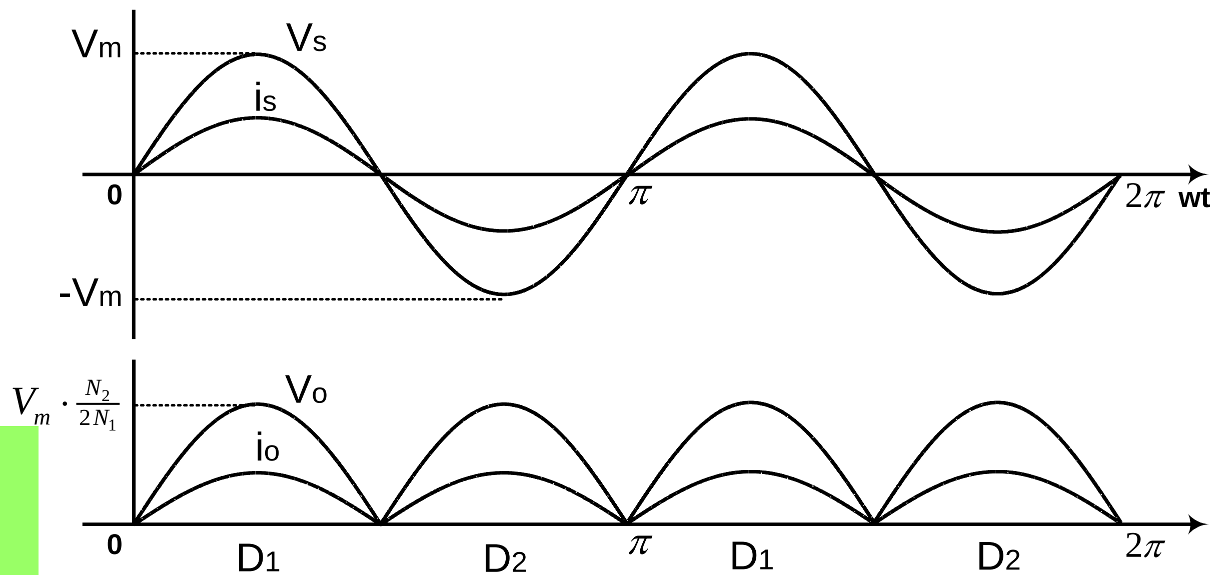




(c)

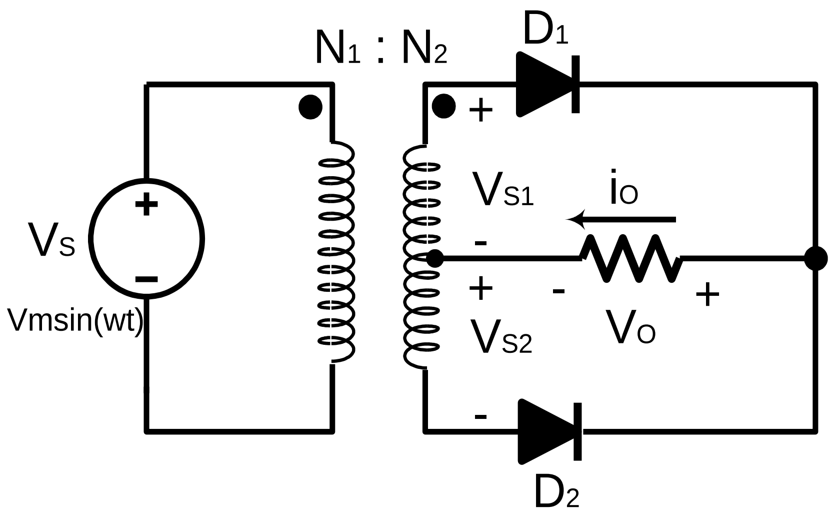
단상 전파 정류기(중간탭 변압기 정류기1)

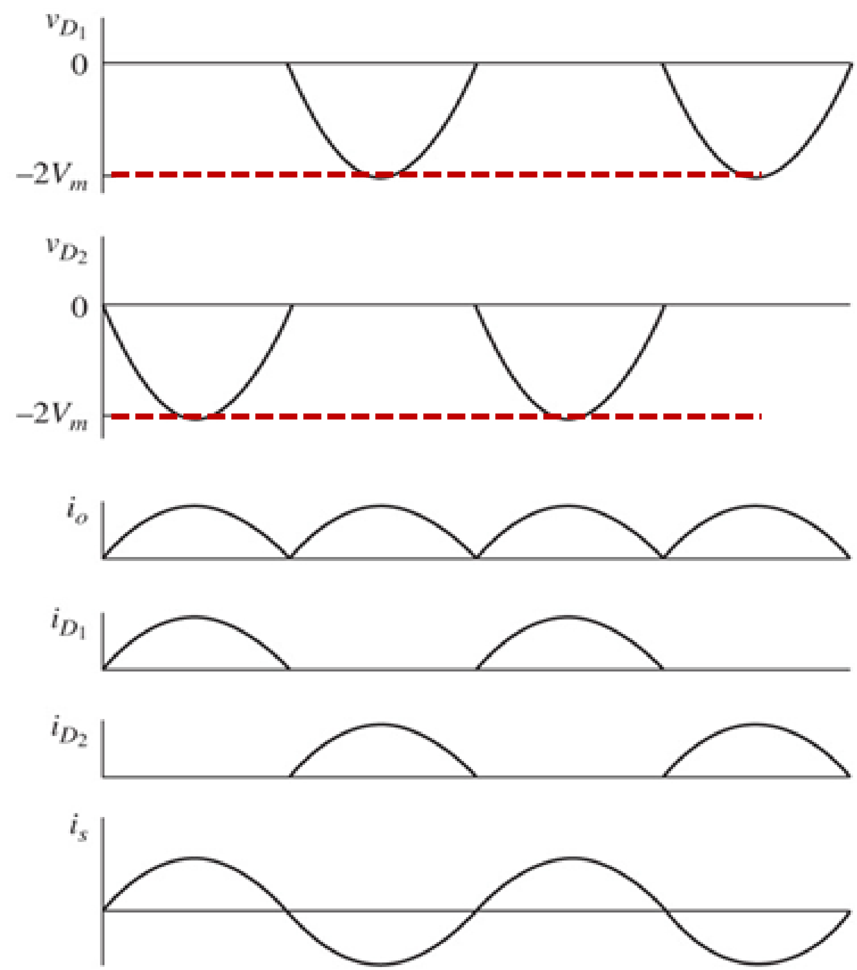




- 출력전압의 주파수는 입력 전압의 주파수의 2배가 된다.
- 다이오드에 걸리는 역전압의 최대치는 인가전압의 최대치에 변압비를 곱한 값이 된다.
- 저전압 대전류 응용에 적합 (다이오드 전압강하가 작다.)

단상 전파 정류기(중간탭 변압기 정류기2)

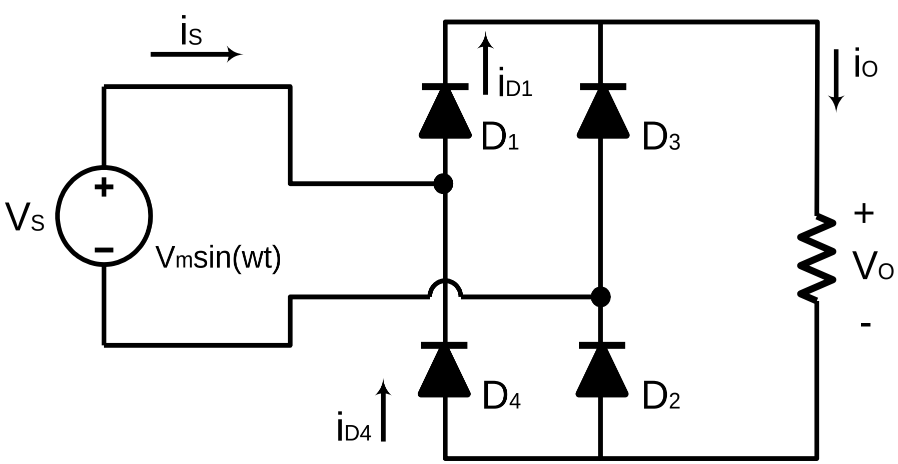




- 다이오드에 걸리는 역전압의 최대치는 인가전압의 최대치에 변압비를 곱한 값이 된다.

- 즉 $\mathbf{V_{D1}, V_{D2} = -2V_m}$

단상 전파 정류기(R 부하)



➢ 부하전압의 순시치

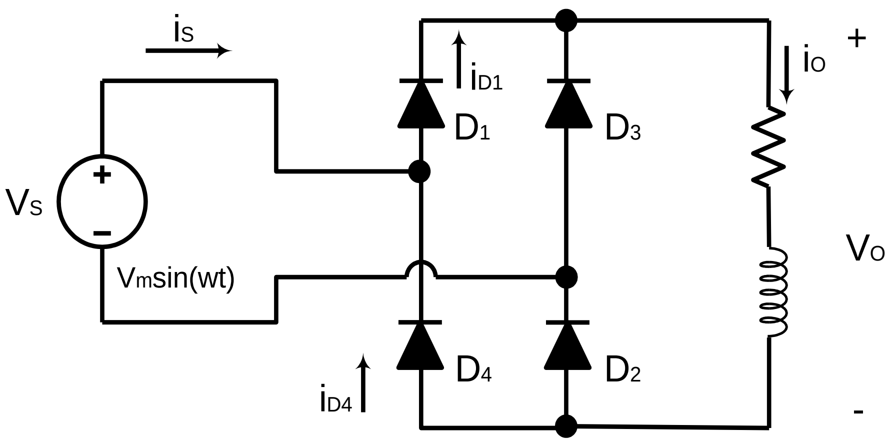
$$v_o(\omega t) = \begin{cases} V_m \sin(\omega t) & 0 \le \omega t \le \pi \\ -V_m \sin(\omega t) & \pi \le \omega t \le 2\pi \end{cases}$$

➢ 부하전압 및 전류의 평균치

$$V_o = V_{avg} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t)\, d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{\pi R}$$

단상 전파 정류기(R-L 부하1)



➢ 전파 정류된 출력전압의 퓨리에 전개

$$v_o(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} + \sum_{n=2,4\ldots}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \pi)$$

$$where,\quad V_n = \frac{2V_m}{\pi}\left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1}\right)$$

➢ 부하전류는 중첩의 원리를 이용해 각 주파수별로 얻은 결과를 더해서 계산한다.

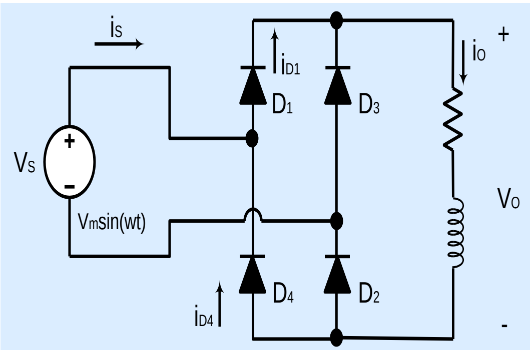
$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

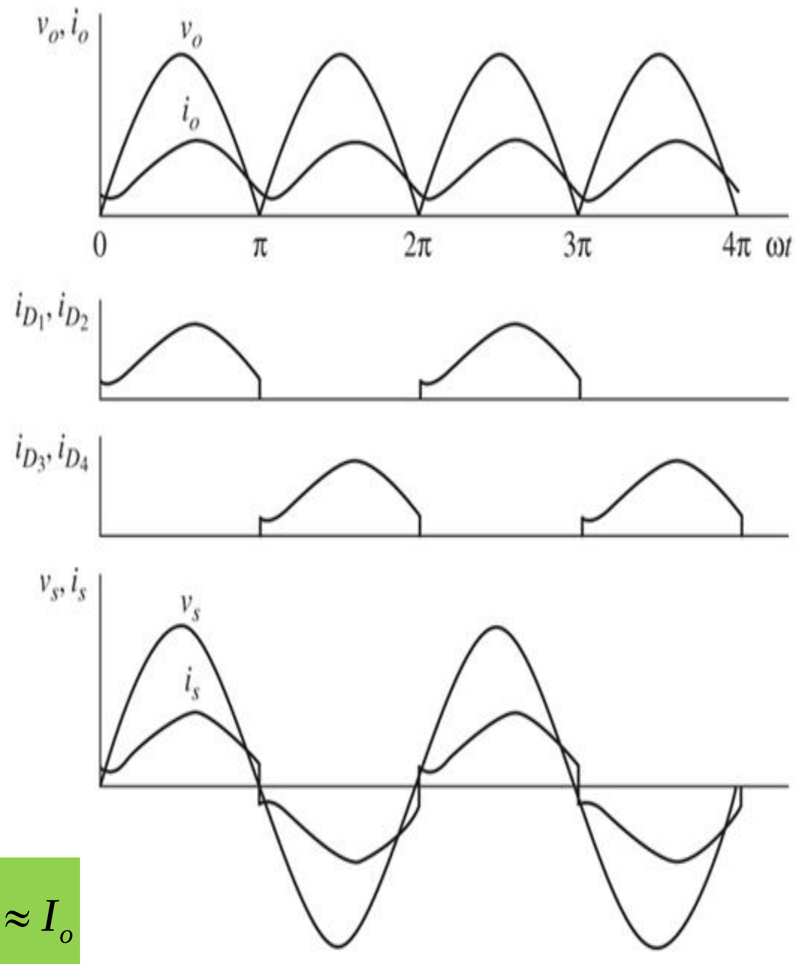
$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega L|}$$

➢ 부하의 유도 임피던스가 상당히 크다면, 즉, **wL >> R**

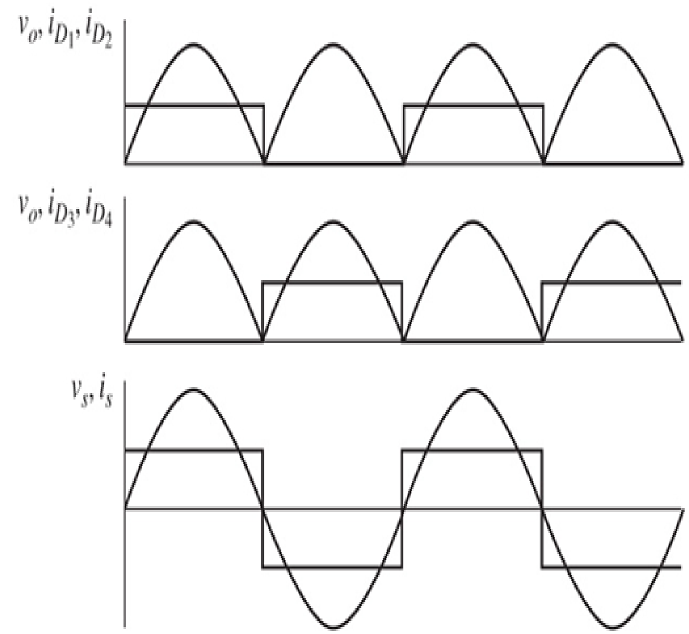
$$i(\omega t) \approx I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{\pi R}, \qquad I_{rms} \approx I_o$$

단상 전파 정류기(R-L 부하2)





(b)

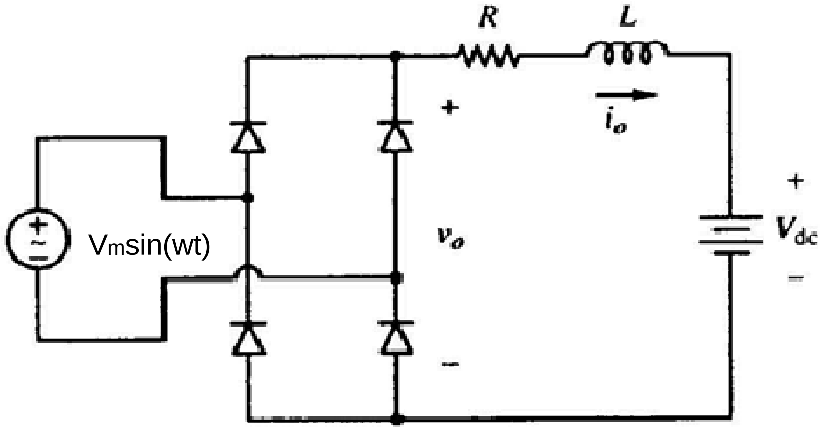


(c)

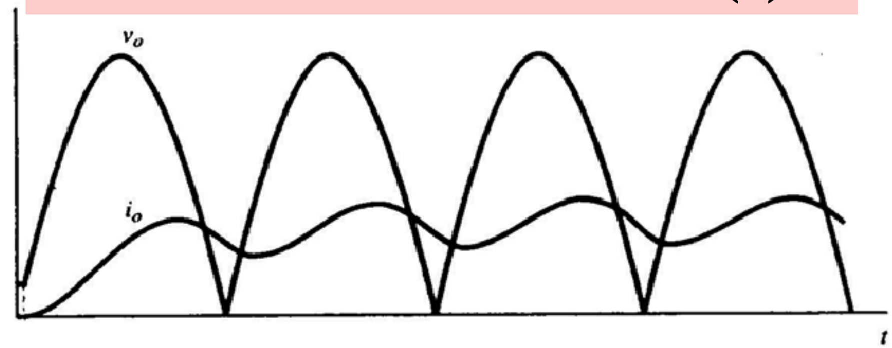
$$i(\omega t) \approx I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{\pi R}, \quad I_{rms} \approx I_o$$

Electrical Engineering

단상 전파 정류기(R-L 기전력 부하)



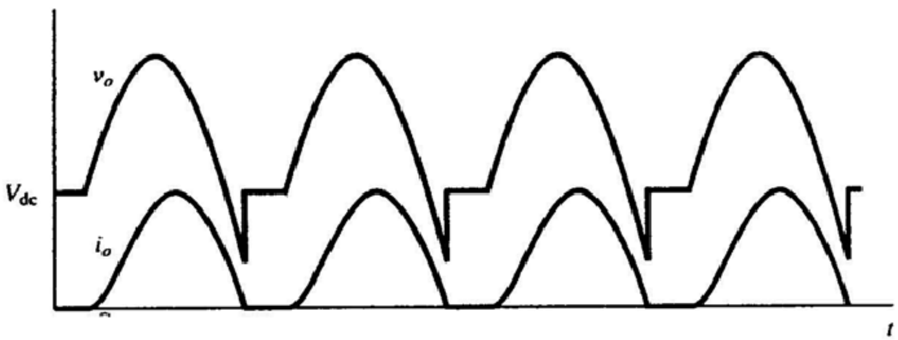
➢ 연속전류 모드=전류가 항상 양(+)



$$v_o(\omega t) = \left(\frac{2V_m}{\pi} - V_{dc}\right) + \sum_{n=2,4\ldots}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \pi)$$

$$where,\quad V_n = \frac{2V_m}{\pi}\left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1}\right)$$

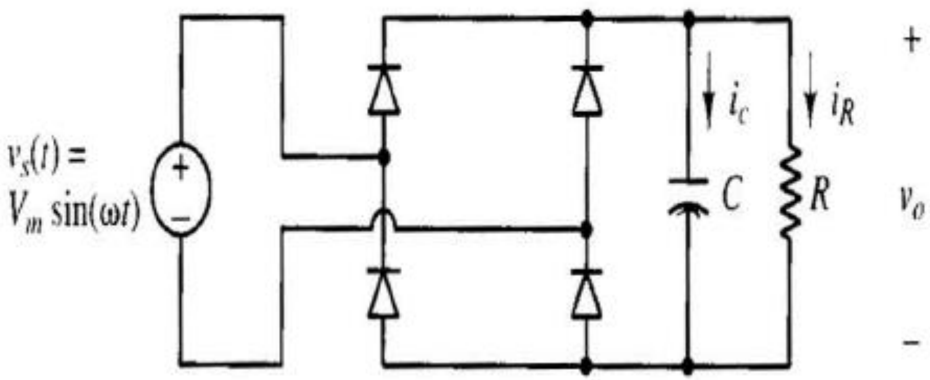
➢ 불연속 전류 모드

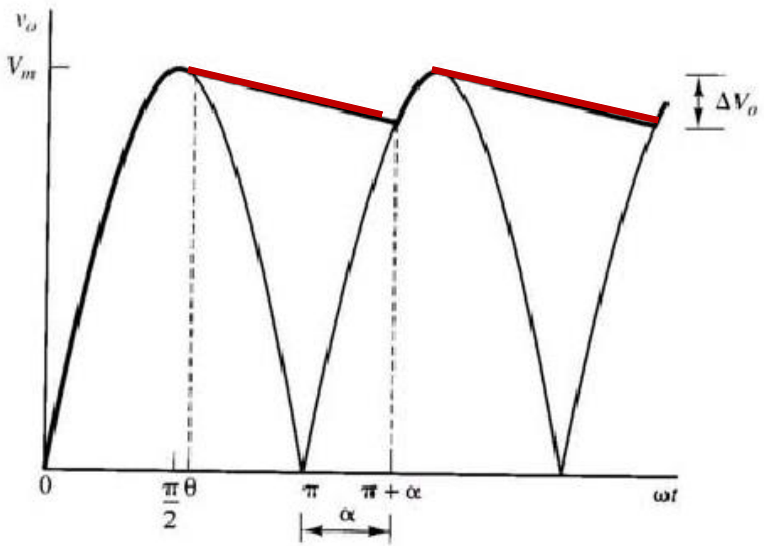


$$I_o = \frac{V_o - V_{dc}}{R} = \frac{\frac{2V_m}{\pi} - V_{dc}}{R}$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega L|}$$

단상 전파 정류기(출력 커패시터 필터) 1





➤ 출력전압의 파형으로 부터

$$V_O(\omega t) = \begin{cases} |V_m \sin(\omega t)| & Diode\ On \\ V_m \sin(\theta) e^{-\frac{(\omega t - \theta)}{\omega RC}} & Diode\ Off \end{cases}$$

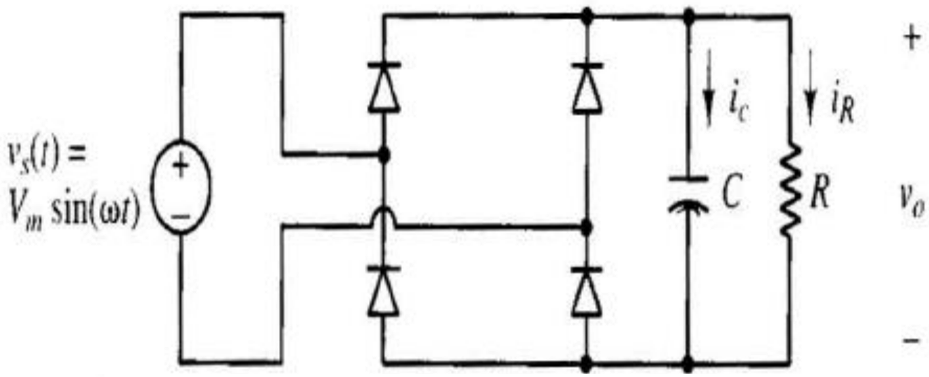
$\omega t = \theta$에서 두함수의 기울기가 같음을 이용하여 θ값을 구할 수 있다.

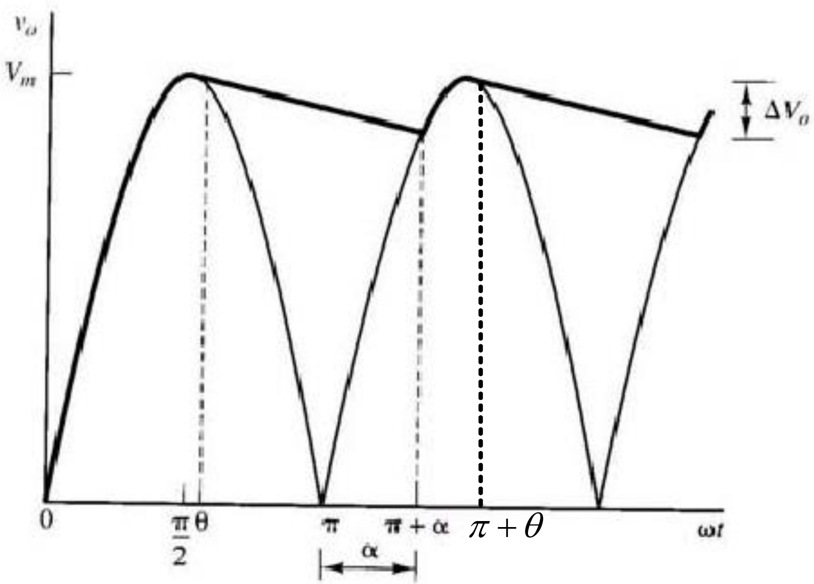
$$\frac{d}{d(\omega t)}(V_m \sin(\omega t)) = V_m \cos(\omega t)$$

$$\frac{d}{d(\omega t)}\left(V_m \sin(\theta) e^{-\frac{(\omega t - \theta)}{\omega RC}}\right) = V_m \sin(\theta)\left(-\frac{1}{\omega RC}\right) e^{-\frac{(\omega t - \theta)}{\omega RC}}$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1}(-\omega RC) = -\tan^{-1}(\omega RC) + \pi$$

단상 전파 정류기(출력 커패시터 필터) 2





- 실제 회로에서는 인가전압의 주기가 회로의 시정수 보다 훨씬 작으므로, 즉 **(1/120 Hz) << RC**

$$\theta \approx \frac{\pi}{2} \qquad \& \qquad V_m \sin\theta \approx V_m$$

- 두개의 함수가 **Alpha**에서 같은 값임을 이용하여 방정식을 세우고 수치해석에 의해 **Alpha** 값을 구한다.

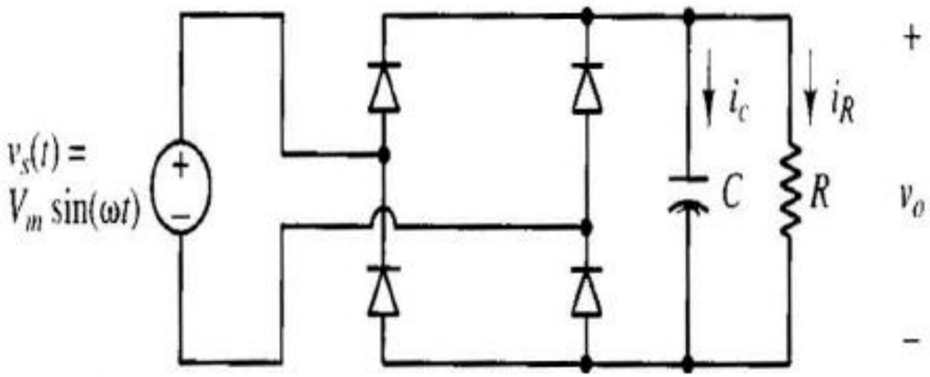
$$V_m \sin(\theta) e^{-\frac{(\pi+\alpha-\theta)}{\omega RC}} = -V_m \sin(\pi+\alpha)$$

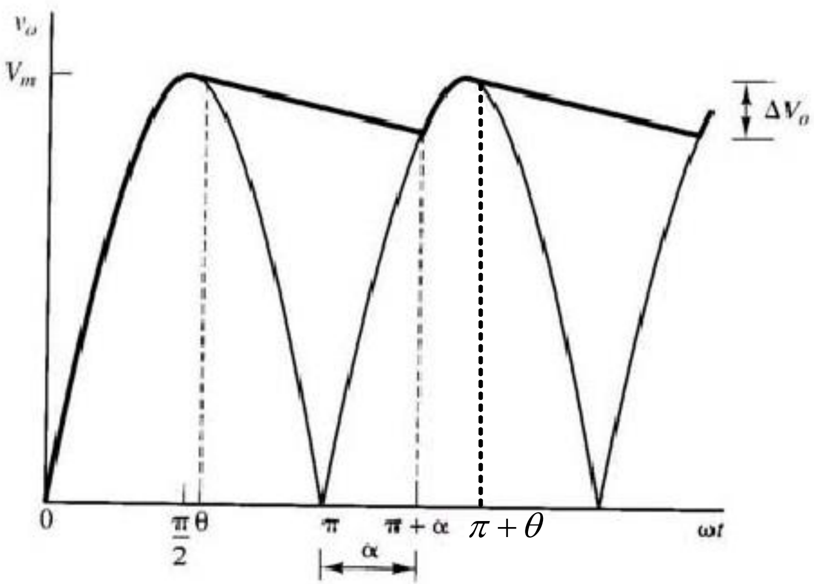
$$\sin(\theta) e^{-\frac{(\pi+\alpha-\theta)}{\omega RC}} - \sin(\alpha) = 0$$

- 커패시터의 충전전류는 출력 전압을 미분함으로 구할 수 있다.

$$i_C(\omega t) = \begin{cases} -\dfrac{V_m \sin\theta}{R} e^{-\frac{(\omega t-\theta)}{\omega RC}} & \theta \le \omega t \le \pi+\alpha \quad D\ Off \\ \omega C V_m \cos(\omega t) & \pi+\alpha \le \omega t \le \pi+\theta \quad D\ On \end{cases}$$

단상 전파 정류기(출력 커패시터 필터) 3





- 첨두전류는 다이오드가 턴온되어 커패시터를 충전할 때 발생하며 다음처럼 계산한다.

$$i_S = i_C + i_R$$

$$i_C(\pi+\alpha) = \omega C V_m \cos(\pi+\alpha) = \omega C V_m \cos(\alpha)$$

$$i_R(\pi+\alpha) = \frac{V_m \sin(\pi+\alpha)}{R} = \frac{V_m \sin\alpha}{R}$$

$$\therefore i_{D,peak} = V_m\left(\omega C\cos(\alpha) + \frac{\sin\alpha}{R}\right)$$

- 필터의 효과는 출력전압의 변동에 따르며 출력전압의 최대치와 최소치의 차가 **Peak-Peak Ripple**로 주어진다.

$$\Delta V_O = V_m - \left|V_m \sin(\pi+\alpha)\right| = V_m(1-\sin\alpha)$$

- **Ripple** 계산의 근사식

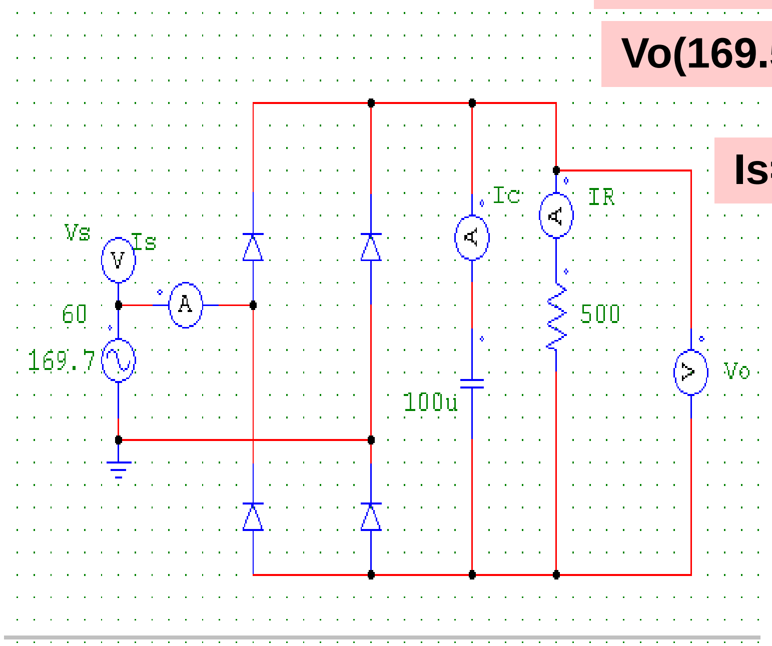
$$\Delta V_O \approx V_m\left(\frac{\pi}{\omega RC}\right) = \frac{V_m}{2fRC}$$

단상 전파 정류기 4 (시뮬레이션)

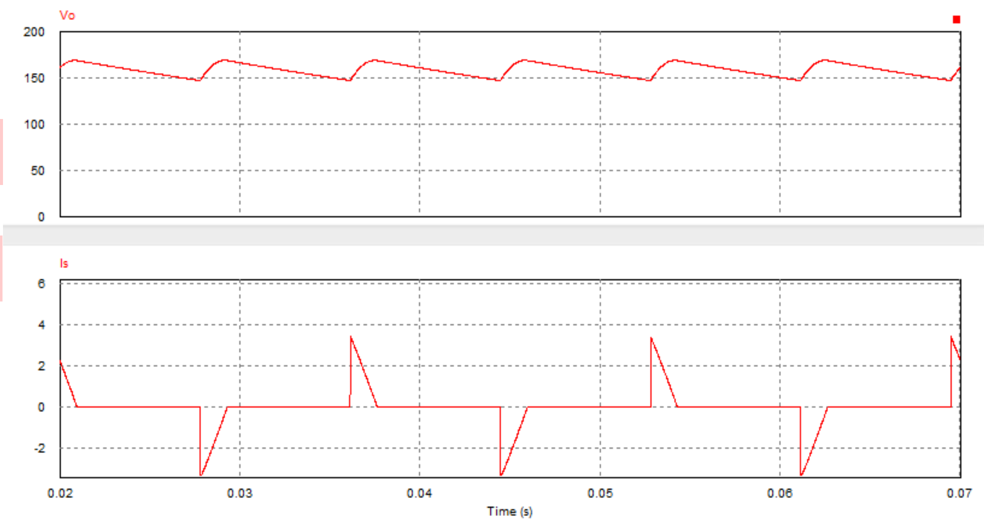
$$\Delta V_O \approx V_m\left(\frac{\pi}{\omega RC}\right) = \frac{V_m}{2\,fRC}$$

C=100[uF]

Vo(169.5-148)



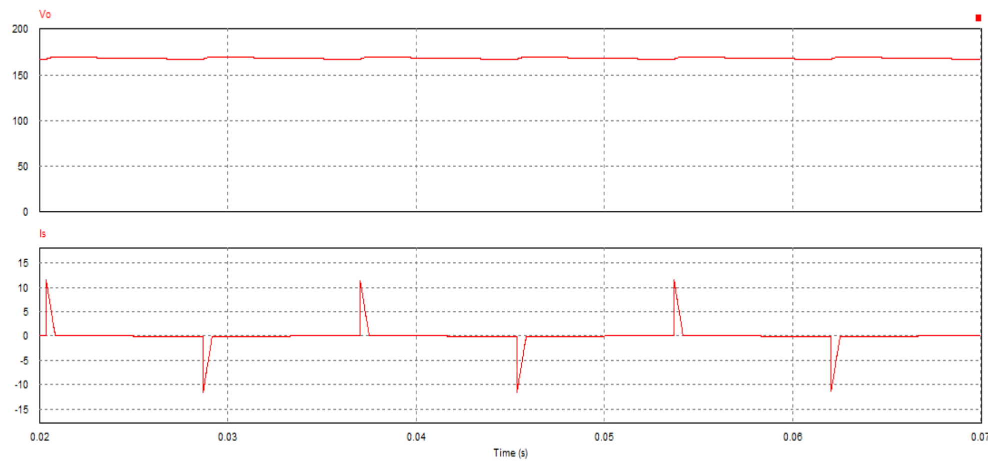
Is=4A



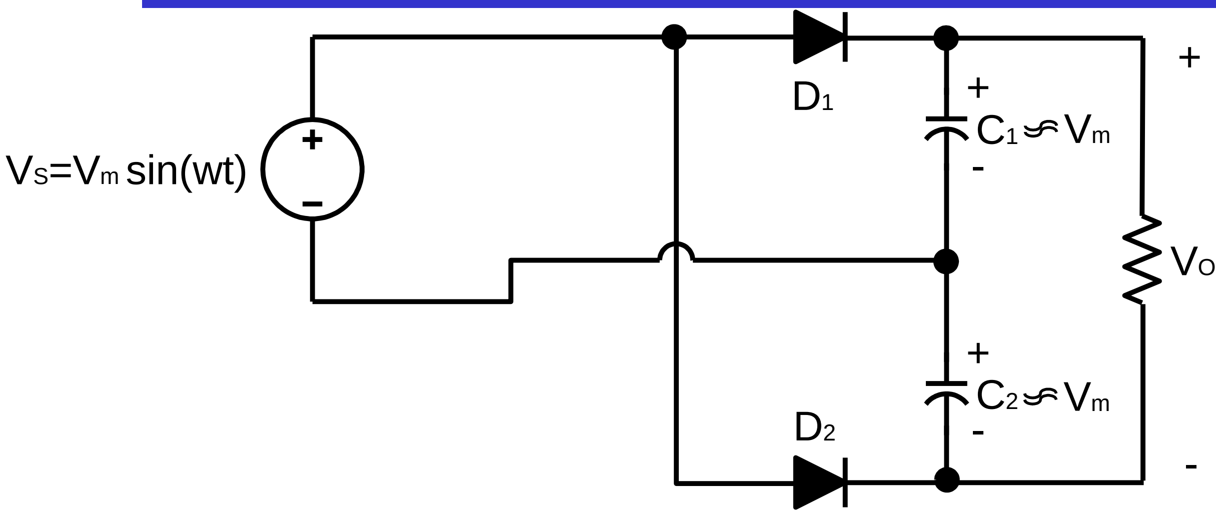
Vo(169.5-167)

C=1,000[uF]경우

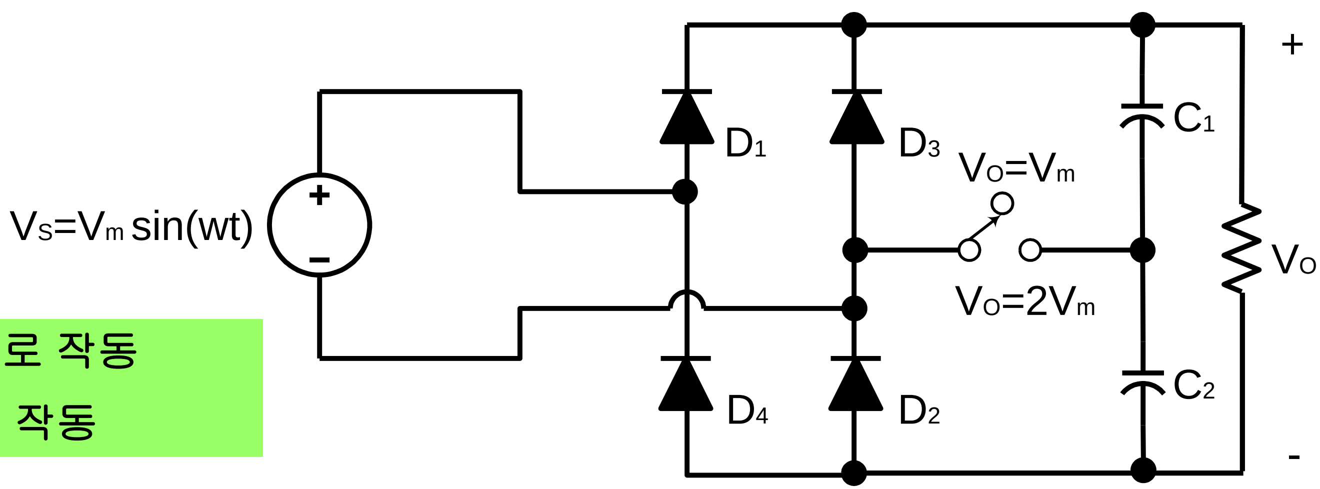
Is=12A



전압체배기



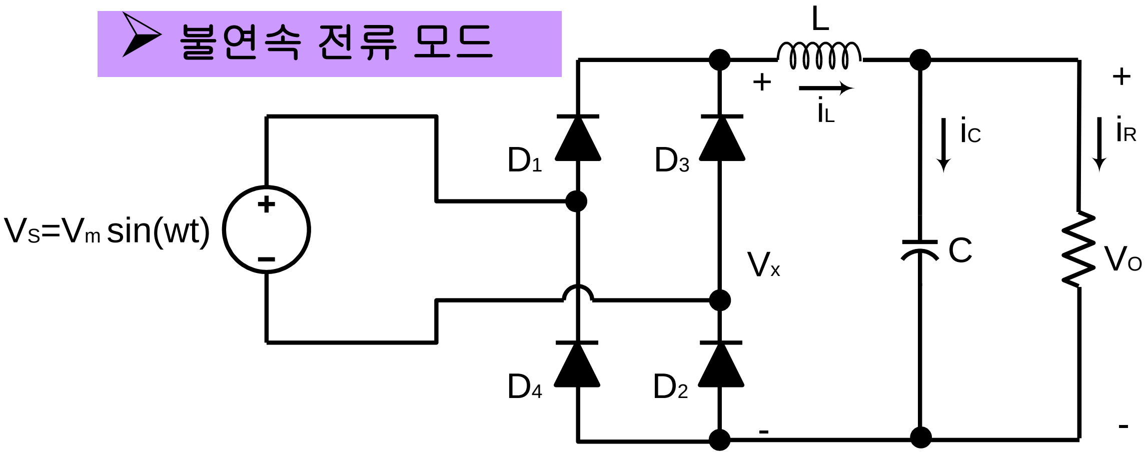
- 출력 전압의 첨두치는 입력전압의 첨두치의 **2**배가 된다.
- 승압을 위해 변압기를 사용하지 않으므로 비용과 무게를 줄일 수 있다.

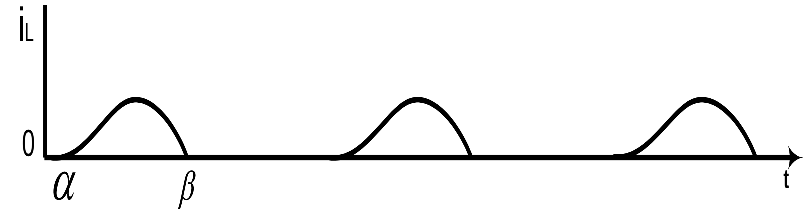


- 스위치 오프: 전파정류기로 작동
- 스위치 온: 전압체배기로 작동

단상 전파 정류기(출력 L-C 필터) 6

➢ 불연속 전류 모드



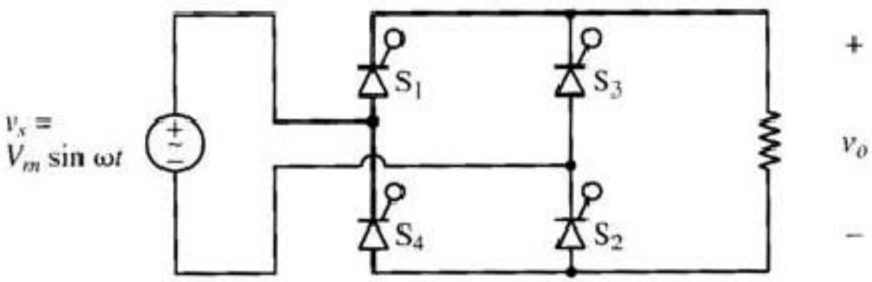


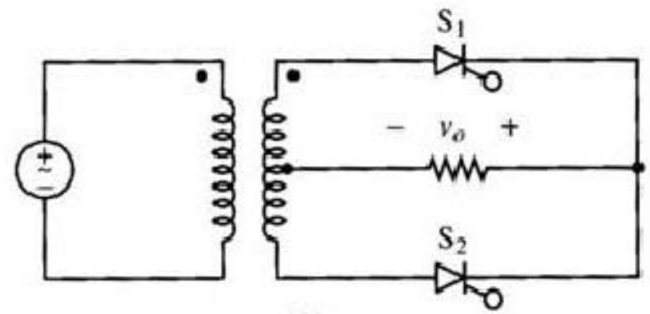
➢ 부하전압 **Vo**는 평균 인덕터 전류가 부하저항의 전류와 같다는 사실을 이용하여 반복법으로 구한다.

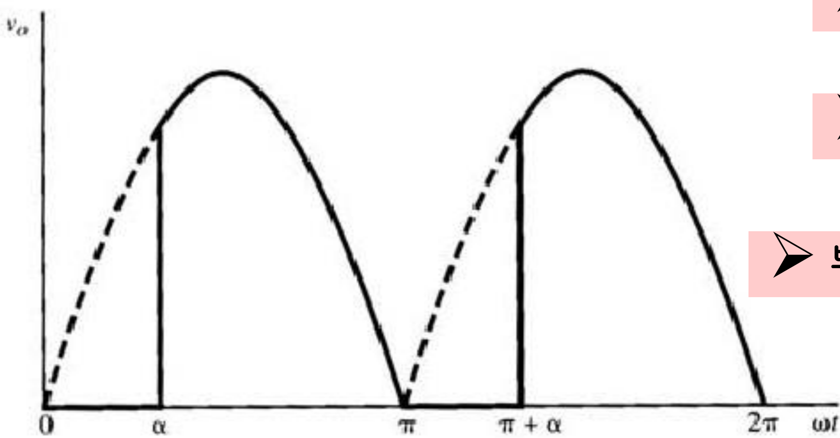
1. **Vm**보다 **Vo**를 약간 작게 설정하고 **Alpha**각을 구한다.
2. 각도 **Beta**에서 전류가 **'0'**이 됨을 이용하여 **Beta** 값을 구한다.
3. 평균 인덕터 전류 **I_L** 을 구한다.
4. **3**단계의 값을 이용하여 부하전압 **Vo(= I_L *R)**을 구한다.
5. **4**단계에서 구한 **Vo**의 값이 **1**단계에서 설정한 값과 같아지도록 **1-4**단계를 반복한다.

가천대학교 Gachon University
Electrical Engineering

단상 전파 제어 정류기(R 부하)







- 평균 부하전압

$$V_o = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin(\omega t)\, d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi}[1+\cos\alpha]$$

- 평균 부하전류

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_m}{\pi R}[1+\cos\alpha]$$

- 부하전류의 실효치

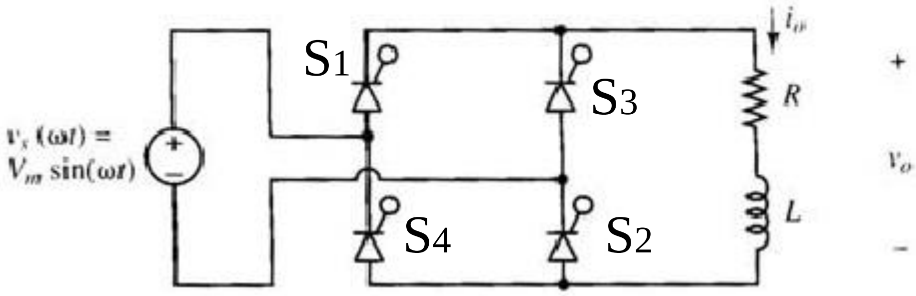
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\left[\frac{V_m \sin(\omega t)}{R}\right]^2 d(\omega t)}$$

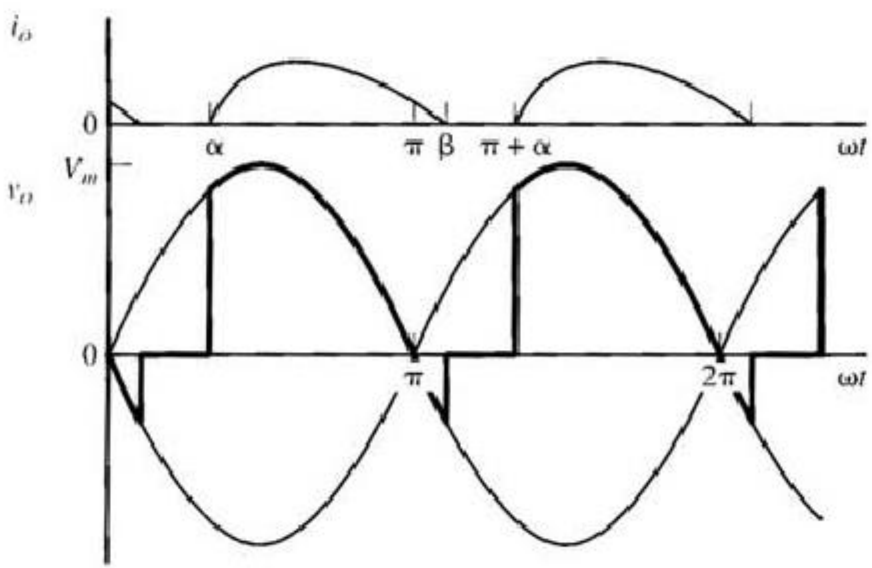
$$= \frac{V_m}{R}\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}}$$

- 부하전력

$$\therefore P_R = I_{rms}{}^2 R = \frac{(V_m)^2}{R}\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right)$$

단상 전파 제어 정류기(R-L 부하) 1





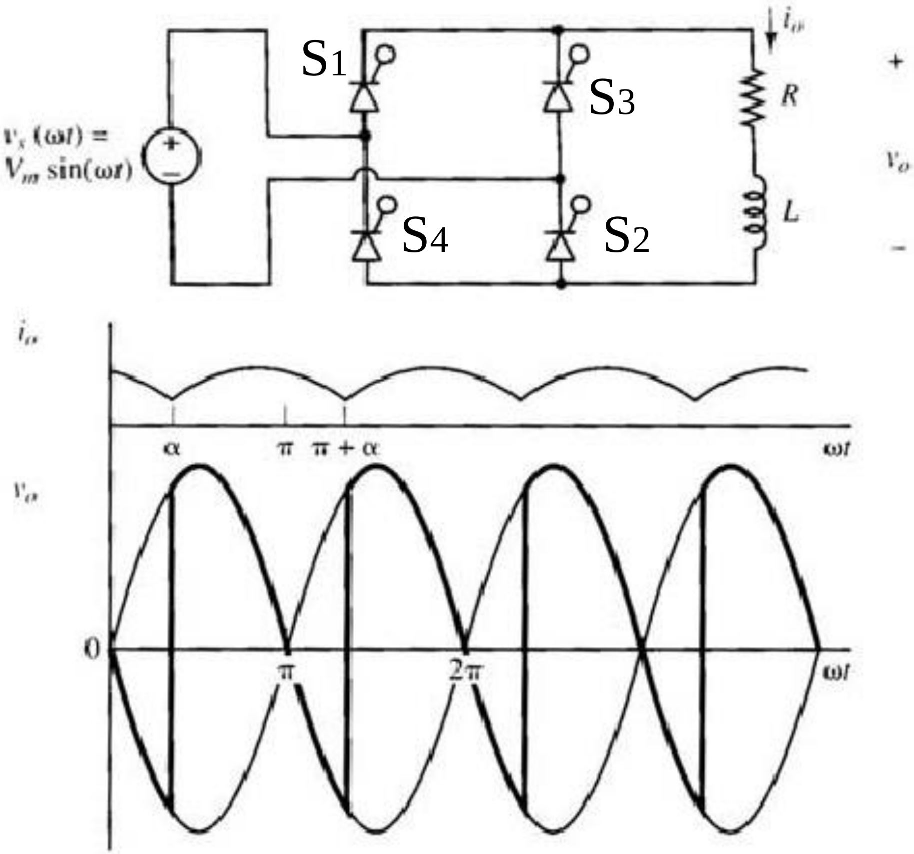
➤ 불연속 전류 모드

$$\beta < \alpha + \pi$$

$$i(t) = \begin{cases} \left(\dfrac{V_m}{Z}\right)\left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{-\frac{(\omega t - \alpha)}{\omega\tau}}\right] & (\alpha \le \omega t \le \beta) \\ 0 & \text{나머지 구간} \end{cases}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right),\ \tau = \frac{L}{R}$$

단상 전파 제어 정류기(R-L 부하) 2



- 연속 전류와 불연속 전류의 경계

$$\beta = \pi + \alpha$$

- 연속 전류 모드의 조건

$$\beta \geq \pi + \alpha$$
$$i(\pi + \alpha) \geq 0$$

- 위의 연속 전류 모드의 조건을 이용하여 연속전류를 만드는 **Alpha**각을 구하면,

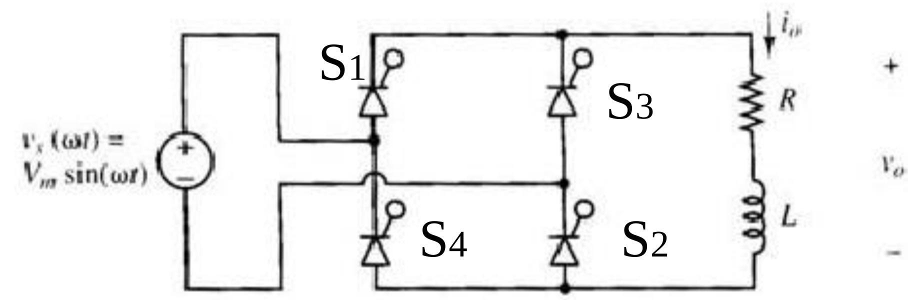
$$i(\pi+\alpha) = \sin(\pi+\alpha-\theta) - \sin(\alpha-\theta)e^{-\frac{(\pi+\alpha-\alpha)}{\omega\tau}} \geq 0$$

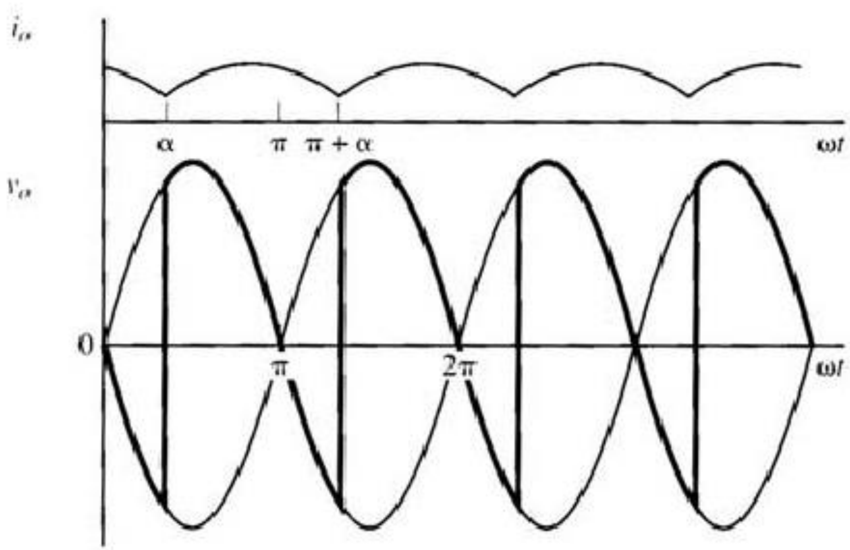
$$\therefore \alpha \leq \theta$$

그런데, $\theta = \tan^{-1}\dfrac{\omega L}{R}$이므로

$$\therefore \alpha \leq \tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$$

단상 전파 제어 정류기(R-L 부하) 3





➢ 연속 전류의 경우 출력전압과 전류의 계산

$$v_o(\omega t) = V_O + \sum_{n=2,4\ldots}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \pi)$$

$$\boxed{V_O = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin(\omega t)\,d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}\cos\alpha}$$

$$where,\quad V_n = \sqrt{a^2{}_n + b^2{}_n}$$

$$a_n = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1}\right]$$

$$b_n = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1}\right]$$

$$n = 2, 4, 6\ldots$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_O + \sum_{n=2,4,6\ldots}^{\infty}\left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2},\quad I_O = \frac{V_O}{R},\quad I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega_O L|}$$