

3. 다이오드 정류회로

3-1 기본개념

- **정류기(Rectifier)** : 교류를 직류로 변환하는 장치
 - DC 전원을 사용하는 여러 전자회로를 위한 AC 전원 정류용으로 사용.
 - 정류될 AC 입력 전원에 따라 단상, 3상으로 나뉜다.
- **다이오드 정류기** : On/Off 제어를 할 수 없으므로 직류 출력전압의 제어가 불가능하다.
 - 출력전압과 전류 파형은 부하의 종류, 성질에 따라 달라짐.

3-2 단상 다이오드 정류회로 : 저항 부하

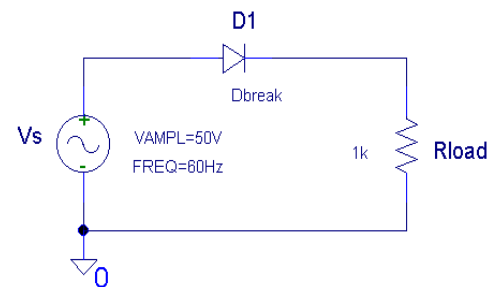
3-2-1 반파 정류회로 (Half Wave Rectification Circuit)

- **반파정류** → 교류입력전원의 양(positive)의 반주기만 출력되는 정류방식.

■ 회로 동작원리

- 회로의 전원전압 : $v_s = \sqrt{2} V \sin \omega t$

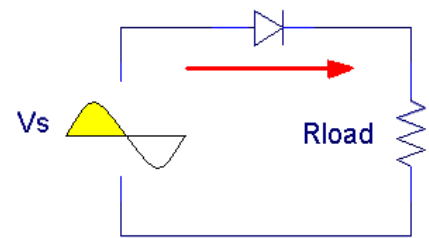
- v_s 양의 반주기 ($0 \leq \omega t < \pi$)
 - 다이오드는 순방향 바이어스되어 On.
 - 부하 측으로 전류가 흐른다.



- 출력전압 : $v_o = v_s = \sqrt{2} V \sin \omega t$

- 출력전류 : $i_o = \frac{v_o}{R} = \frac{\sqrt{2} V \sin \omega t}{R}$

- 다이오드 전압 : $v_D = 0$

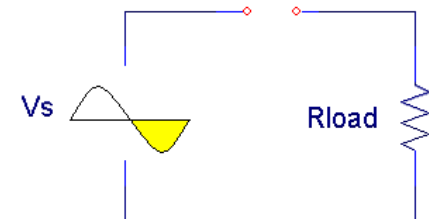


- v_s 음의 반주기 ($\pi \leq \omega t < 2\pi$)
 - 다이오드는 역방향 바이어스되어 Off.

- 출력전압 : $v_o = 0$

- 출력전류 : $i_o = 0$

- 다이오드 전압 : $v_D = v_s$ → 모든 전원전압이 인가됨.



- 다이오드에 인가되는 최대전압 → 다이오드가 역 바이어스일 때 전원전압의 최대 값.
 - 다이오드의 전압정격을 결정하는데 사용

예) $V = 220[V_{rms}]$ 인 경우 $v_D = -220\sqrt{2} = -311.13[V]$

• **평균 DC 출력전압**

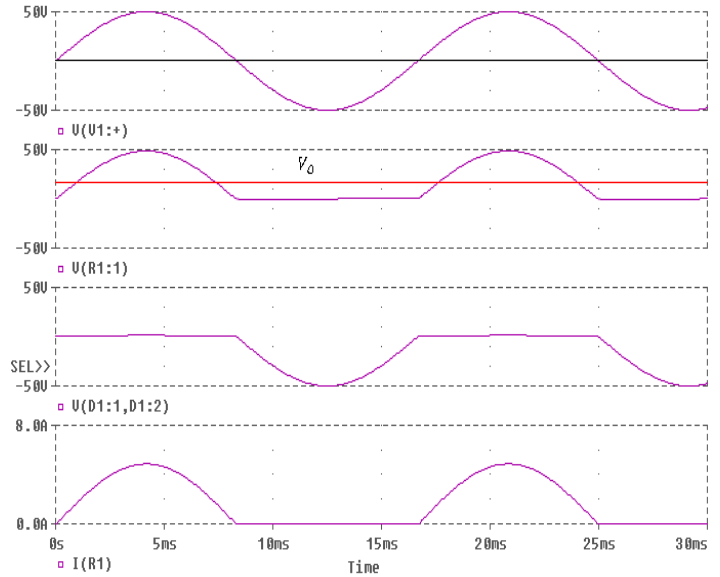
→ 부하에 인가되는 DC 출력전압 v_o 의 한 주기 평균값 V_o

- 평균값 정의 : $\frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt$

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 d(\omega t) \right]$$

$$= \frac{\sqrt{2} V}{\pi} = 0.318 V_m = 0.45 V$$



- 출력 직류전압의 크기는 입력 교류전압의 크기에 의해 결정된다.
- 반파 정류회로는 주어진 AC 입력 전원전압 실효값의 45%에 해당하는 출력 DC전압을 얻을 수 있다.

• 출력전류의 평균값

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_o d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sqrt{2} V \sin \omega t}{R} d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} V}{\pi R}$$

• 출력전류의 실효값

- 실효값 정의 : $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt}$

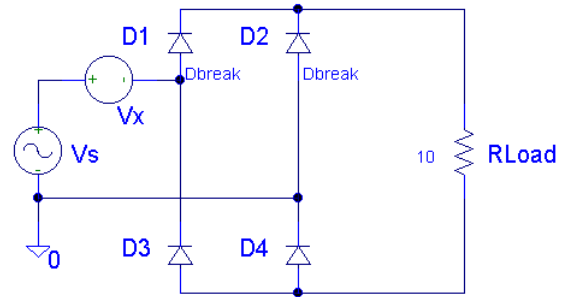
$$I_{o_rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_o^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2} V \sin \omega t}{R} \right)^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2} V}{2R} \rightarrow \frac{\pi}{2} I_o$$

- 실효값이 평균값보다 $\pi/2$ 배 크다. (순수 DC인 경우는 실효값=평균값)
- 실효값과 평균값의 계산은 출력전력과 정류기 설계시 다이오드 정격용량, 전선의 굵기를 산정하기 위해 필요.

• 부하에 공급되는 전력 : $P_o = I_{orms}^2 \cdot R$

3-2-2 전파 정류회로 (Full Wave Rectification Circuit)

- 전파 정류회로 : 4개의 다이오드(D₁~ D₄)로 구성.



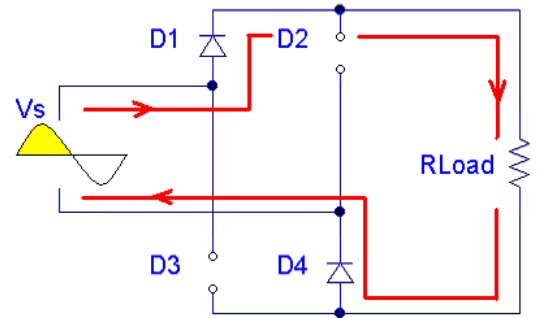
회로 동작원리

- v_s 양의 반주기 ($0 \leq \omega t < \pi$)

→ 다이오드 D₁과 D₄는 순방향 바이어스 되어 On
D₂과 D₃는 역방향 바이어스 되어 Off.

→ 정류회로의 출력전압

$$v_o = v_s = \sqrt{2} V \sin \omega t$$

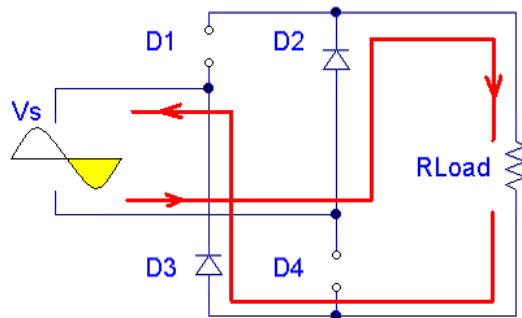


- v_s 음의 반주기 ($\pi \leq \omega t < 2\pi$)

→ 다이오드 D₂과 D₃는 순방향 바이어스 되어 On
D₁과 D₄는 역방향 바이어스 되어 Off

→ 정류회로의 출력전압

$$v_o = -v_s = -\sqrt{2} V \sin \omega t$$



* 출력전압 v_o 는 양의 반주기와 음의 반주기에서 동일

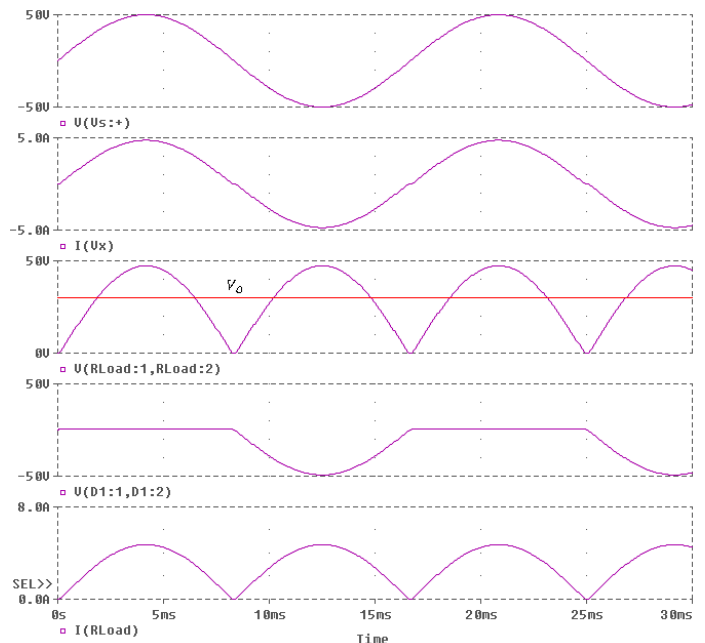
- 평균 출력전압

$$\begin{aligned} V_O &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v_o d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2\sqrt{2} V}{\pi} = 0.9 V \end{aligned}$$

→ 전파 정류회로는 반파 정류회로의 2배인 AC 입력 전원전압 최대값의 90%에 해당하는 출력 DC 전압을 얻을 수 있다.

- 다이오드에 인가되는 최대전압

→ $V_{Dmax} = \sqrt{2} V$: 반파 정류기와 동일.



- 평균출력전류 : $I_o = \frac{2\sqrt{2} V}{\pi R}$ → 반파 정류회로의 2배

- 출력전류의 실효값 : $I_{orms} = \frac{V}{R}$ → 반파 정류회로의 $\sqrt{2}$ 배

• 부하에 공급되는 전력 : $P_o = I_{rms}^2 \cdot R = \left[\frac{V}{R} \right]^2 \times R \rightarrow$ 반파 정류회로의 2배

$$\left(\text{반파정류 } P_o = \left[\frac{\sqrt{2}V}{2R} \right]^2 \times R = \frac{1}{2} \left[\frac{V}{R} \right]^2 \times R \right)$$

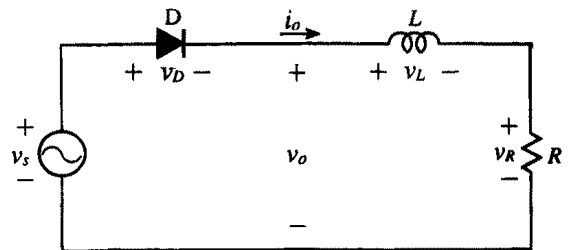
3-3 단상 다이오드 정류회로 : R-L 부하

• 출력전압과 전류 파형은 부하의 종류에 따라 달라짐.

3-3-1 반파 정류회로 (Half Wave Rectification Circuit)

• 특징

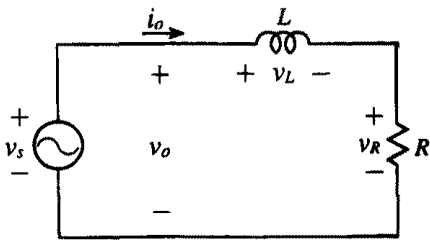
- ① 인덕터에 축적된 에너지로 인해 다이오드는 180° 이상 도통한다.
- ② 출력전류 i_o 의 파형은 비정현파가 되고, π 이상에서 0이 된다.
- ③ 출력전압 v_o 의 파형에 음의 값이 나타난다.



• 회로 동작원리

① $0 \leq \omega t < \theta_1$

→ 다이오드는 순방향 바이어스 되어 On 됨.
다이오드를 통해 부하로 전류가 흐른다.



- 출력전압 = 전원전압 : $v_o = v_s = \sqrt{2} V \sin \omega t$

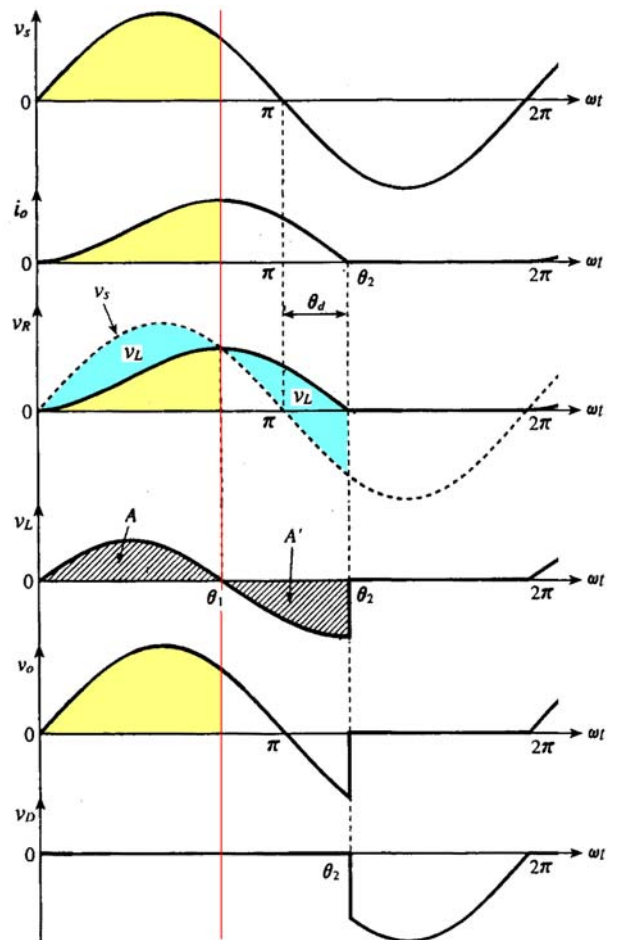
- 인덕터 전압 $v_L (= v_s - v_R) > 0$ 이므로 인덕터 L의 전류(즉, 출력전류 i_o)는 증가.

(→ 인덕터 L에 에너지 축적됨 : $\frac{1}{2} Li^2$)

• 출력전류 : $v_o = L \frac{di_o}{dt} + i_o R$

$$\rightarrow i_o = \frac{\sqrt{2} V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} [\sin(\omega t - \theta) + e^{-t/\tau} \sin \theta]$$

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



② $\omega t = \theta_1$

→ $v_s = v_R$ 으로 $v_L = 0$ (전류변화 없음)

③ $\theta_1 < \omega t < \theta_2$

→ $v_s < v_R$ 이므로 $v_L < 0$ 이 되어 L의 전류 (출력전류) i_o 감소. (인덕터 에너지 방출)

* π 를 지나 전원전압이 (-)이더라도 다이오드는 전류가 0이 될 때까지 계속 도통된다.

④ $\omega t > \theta_2$

$i_o = 0, v_D = v_s < 0$

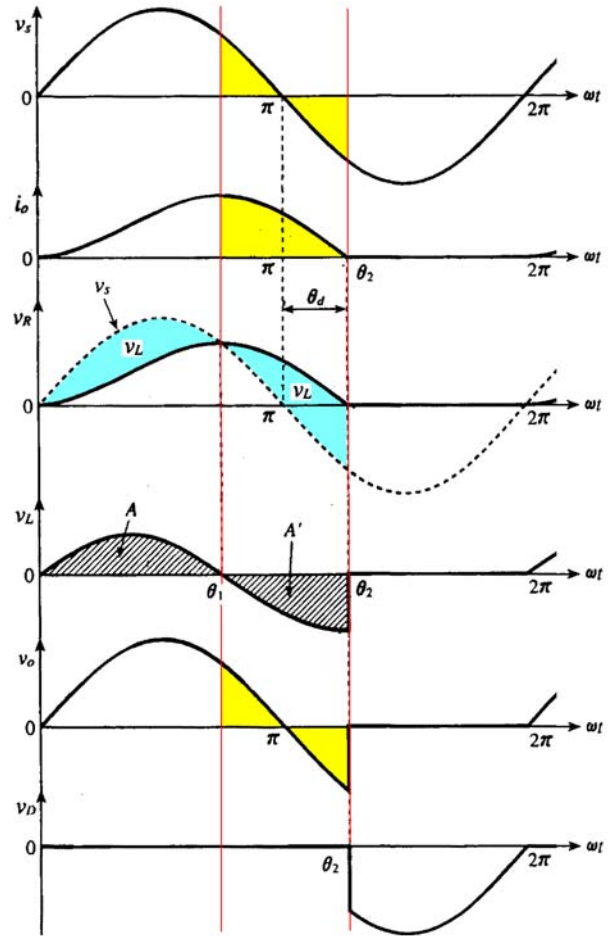
다이오드에 역전압이 인가되어 Off.

• 평균 출력전압

$$\begin{aligned} V_O &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_2} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2} V}{2\pi} (1 - \cos \theta_2) \end{aligned}$$

- θ_2 : 출력전류가 0이 되는 시점

- $\pi \leq \theta_2 \leq 2\pi$ 이므로 평균 출력전압은 저항부하시보다 작다.



* Inductor Volt-Second Balance 원리

- “정상상태에서 스위칭 한주기 동안 인덕터 전류의 총 변화율은 0이다.”

→ (한 주기가 끝나는 부분에서 인덕터에 저장되는 에너지는 시작부분에서 저장되었던 에너지와 같다.)

→ 정상상태에서 인덕터에 인가되는 net volt-second는 0 이 된다.

즉, $\int_0^T v_L(t) dt = 0$

$v_L = L \frac{di(t)}{dt}$ 에서

→ $i(T) = \int_0^T v_L(t) dt + i(0) \rightarrow i(T) - i(0) = \int_0^T v_L(t) dt = 0$

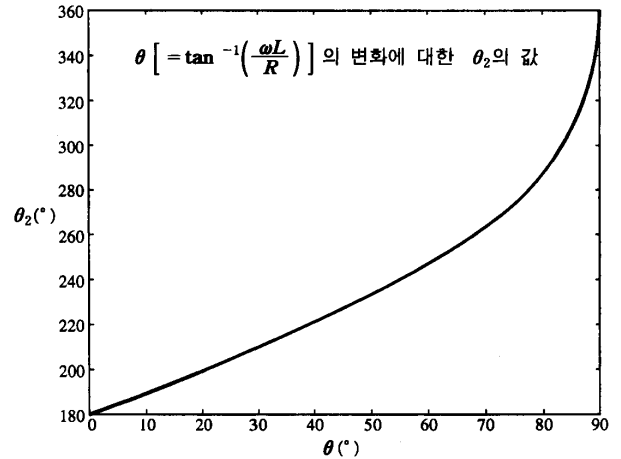
- 정류회로에서 → $i(\theta_2) - i(0) = \int_0^{\theta_2} v_L(t) dt = \int_0^{\theta_1} v_L(t) dt + \int_{\theta_1}^{\theta_2} v_L(t) dt = 0$

∴ $\int_0^{\theta_1} v_L(t) dt = - \int_{\theta_1}^{\theta_2} v_L(t) dt$

- θ_2 ($i_o = 0$ 시점) 결정

$$i_o(\theta_2) = \sin(\theta_2 - \theta) + e^{-\theta_2/\omega\tau} \sin \theta = 0$$

- 인덕턴스 성분이 커질수록 θ_2 가 커진다.
- θ_2 가 클수록 출력전압의 평균값은 작아짐.

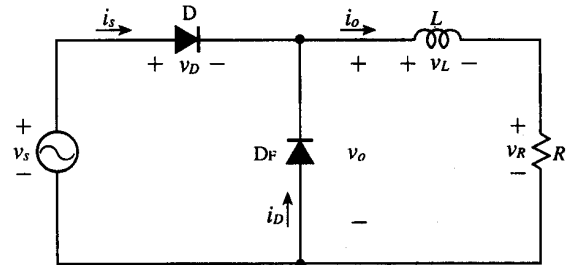


Report

- 반파 정류회로 Pspice Simulation
- 조건 : 전원전압 50V, 60Hz, L=50mH, R=10[Ω]

3-3-2 환류(Freewheeling) 다이오드

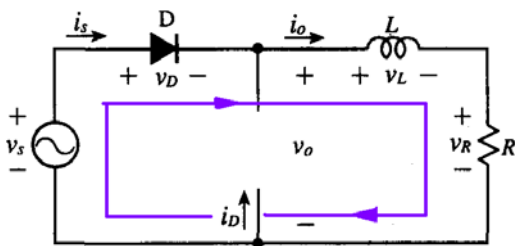
- 유도성부하인 경우 부하와 병렬로 다이오드를 연결한다. → 환류(Freewheeling) 다이오드
- R-L 부하와 병렬로 환류 다이오드 D_F 가 추가된 경우 출력특성이 달라진다.



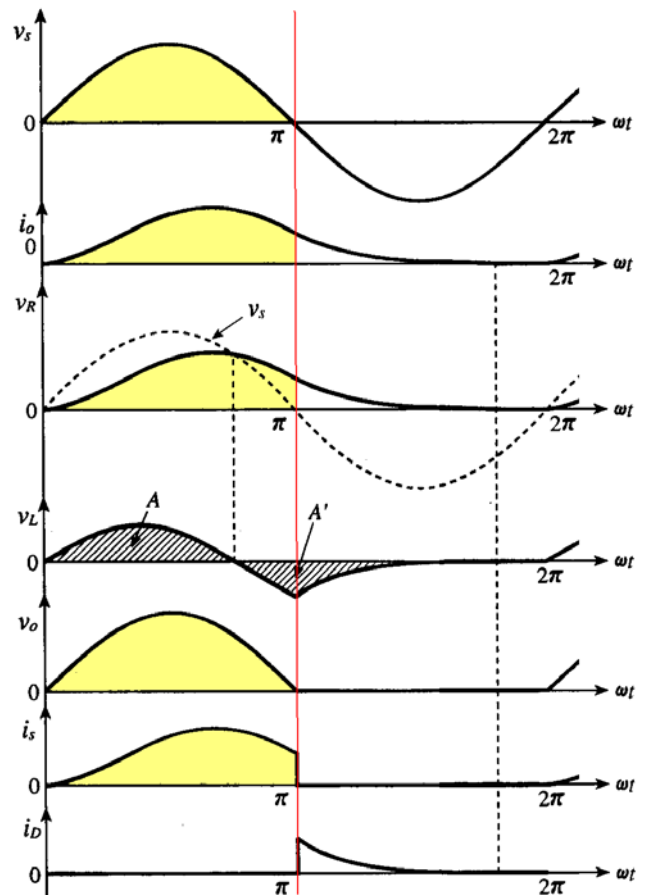
회로 원리 및 동작

① v_s 양의 반주기 ($0 \leq \omega t < \pi$)

- 환류 다이오드 D_F 가 없는 경우와 동일
- 다이오드 D은 순방향 바이어스로 On, 환류 다이오드 D_F 는 역방향 바이어스로 Off



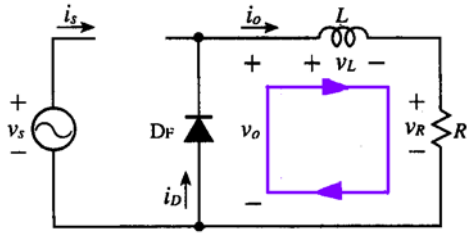
- 출력전압 : $v_o = v_s = \sqrt{2} V \sin \omega t$
- 출력전류(=부하전류) i_o 는 증가하고, 전류가 증가함에 따라 인덕터 L에 에너지가 축적된다.
- D_F 에 인가되는 최대 역전압
→ 전원전압의 최대 값 : $-\sqrt{2} V$



② v_s 음의 반주기 ($\pi \leq \omega t < 2\pi$)

→ D는 역방향 바이어스로 Off

D_F 는 순방향 바이어스 되어 도통시작.



- 출력전압 : $v_o = 0$

(R-L부하에 인가되는 전압 $v_o = D_F$ 의 전압)

→ 출력전류 i_o 는 D_F 를 통하여 흐르고 점차 감소된다. (D_F 가 없는 경우보다 천천히 감소)

→ 출력전류 i_o 의 감소시간은 R-L 회로의 시정수 $\tau (=L/R)$ 에 따라 결정 됨.
(L에 축적되었던 에너지는 모두 부하저항 R에서 소비)

• L이 충분히 큰 경우 ($\tau (=L/R) > 1$) →

→ 부하전류 i_o 는 연속이 되며, 리플이 없는 직류가 된다.

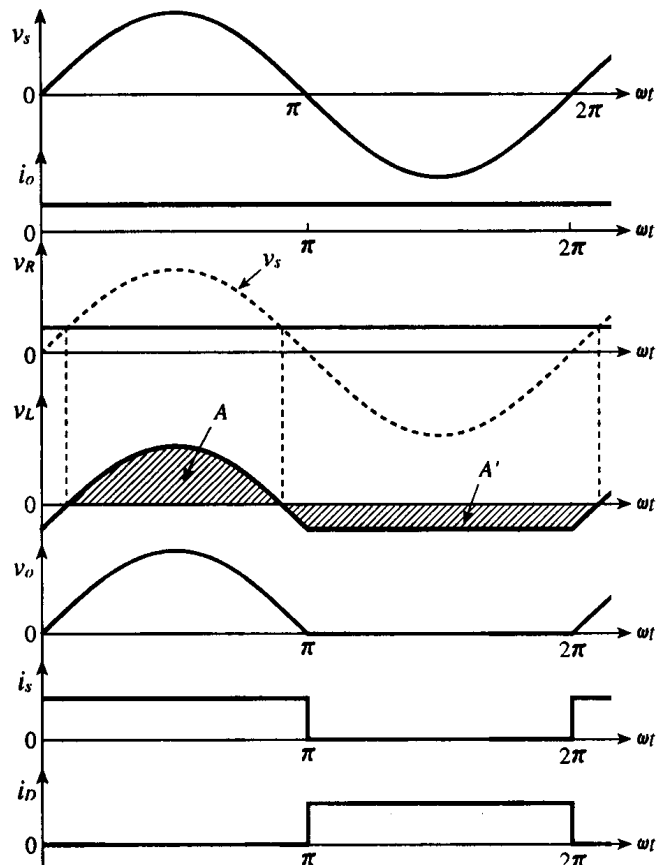
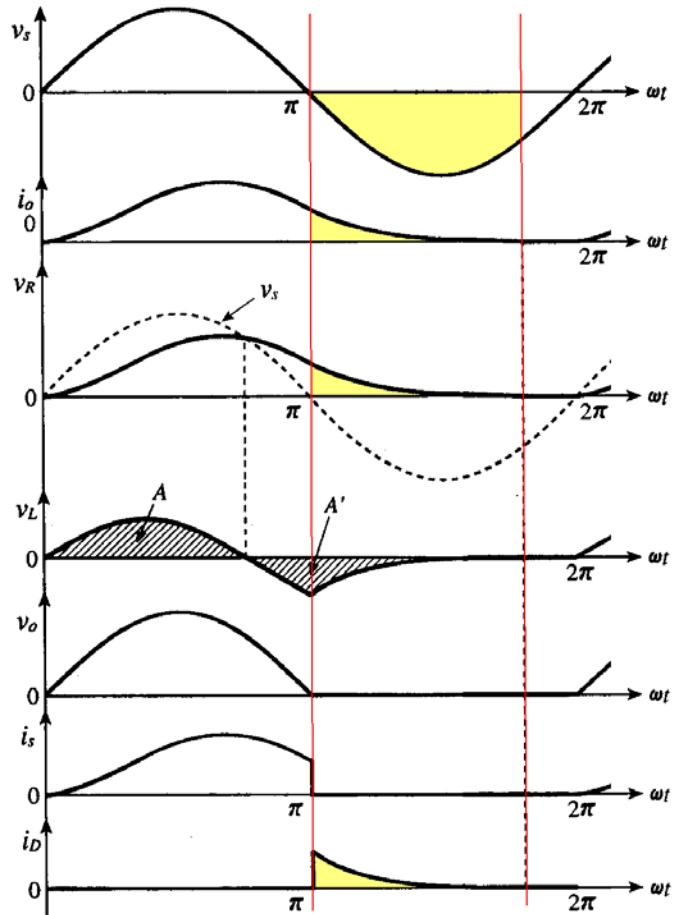
• 출력전압

→ 전원전압의 양의 반주기에서만 나타나며 순수 저항부하를 갖는 단상 반파 정류회로의 출력전압과 동일

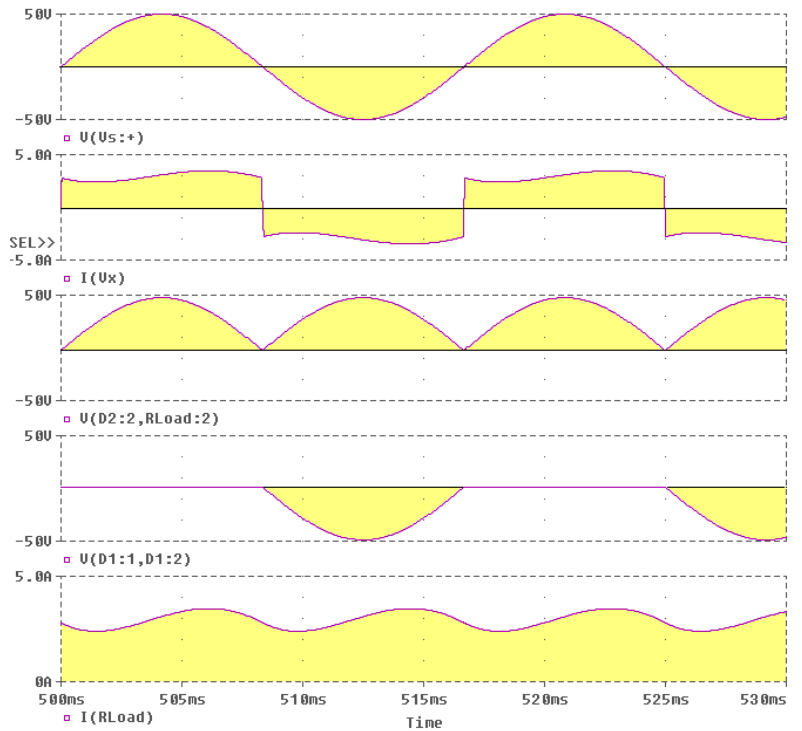
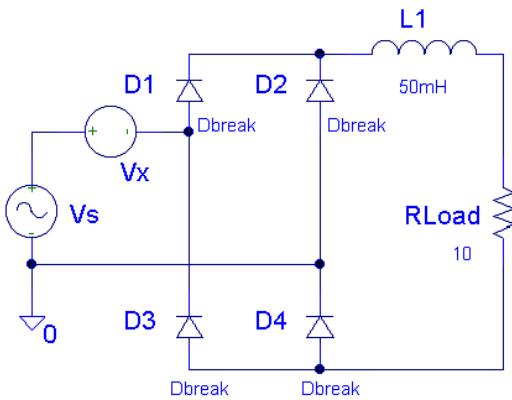
즉, 출력전압의 평균값 : $V_o = \frac{\sqrt{2}V}{\pi}$

■ Report

- 환류 다이오드를 갖는 정류회로 Pspice Simulation
- 조건 : 전원전압 50V, 60Hz, L=20mH, R=1[Ω]



3-3-3 전파 정류회로



• 특징

① 입력전류의 파형은 단상 반파의 경우와 마찬가지로 비정현파가 된다. (고조파 포함)

② 반파 정류기와는 달리 부하전류는

인덕턴스 L의 값에 관계없이 연속인 직류가 된다.

인덕턴스가 매우 큰 경우(회로의 시정수 $\tau(=L/R) > 1[\text{sec}]$) 부하전류는 거의 리플이 없는 직류가 된다.

③ 출력전압의 파형은 저항부하시와 동일

$$\text{- 평균출력전압 : } V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v_o d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2} V}{\pi}$$

④ 평균출력전류 (= 실효값) : $I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2\sqrt{2} V}{\pi R}$

• 저항부하 시와 비교

	저항부하	유도성 부하
평균출력전압	$\frac{2\sqrt{2} V}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{2} V}{\pi}$
평균출력전류	$\frac{2\sqrt{2} V}{\pi R} = 0.9 \frac{V}{R}$	$\frac{2\sqrt{2} V}{\pi R} = 0.9 \frac{V}{R}$
출력전류의 실효값	$\frac{V}{R}$	$\frac{2\sqrt{2} V}{\pi R} = 0.9 \frac{V}{R}$

■ Report

- 전파 정류회로 Pspice Simulation
- 조건 : 전원전압 50V, 60Hz, L=50mH, R=10[Ω]

3-4 3상 다이오드 정류회로

- 단상 정류회로 → 대 전력을 얻기 힘들다.

출력전압의 주파수가 전원주파수의 2배로 고조파 저감을 위한 큰 필터 요구

- 3상 정류회로 → 3상 교류전원을 정류회로에 입력으로 사용

단상 다이오드 정류기에 비해 더 큰 직류전압을 얻을 수 있다.

직류 출력전압의 리플성분이 작아 평활한 직류전압을 얻을 수 있다.

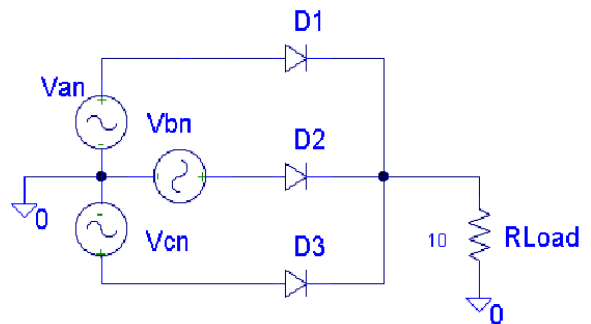
3-4-1 3상 반파 정류회로(3 Phase Half Wave Rectification Circuit)

- 회로 구성 및 동작

- 3개의 다이오드로 구성.

→ 각 다이오드는 교류 3상 전원에 연결됨

- 3상 상전압 : $v_{an} = \sqrt{2} V \sin \omega t$
 $v_{bn} = \sqrt{2} V \sin (\omega t - 2\pi/3)$
 $v_{cn} = \sqrt{2} V \sin (\omega t - 4\pi/3)$

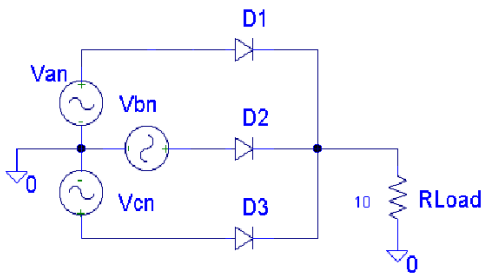


- 다이오드의 도통

→ 임의의 시각에 3상 전압 중 그 크기가 가장 큰 상에 연결된 다이오드가 On.

(임의의 시각에 3상 전압 중 크기가 가장 큰 상의 전압이 출력됨)

→ OR Logic



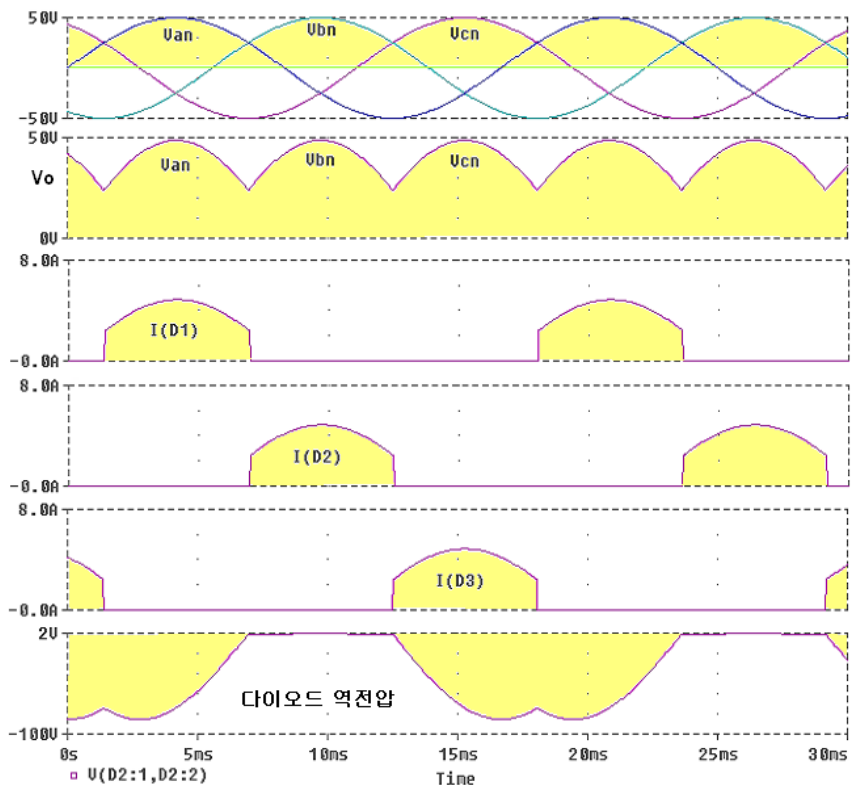
- ① 각각의 다이오드는 120°씩 도통

→ 전원 측 전류는 한 주기의 1/3구간만 흐른다.

- ② 출력전압의 리플주파수

→ 전원주파수의 3배

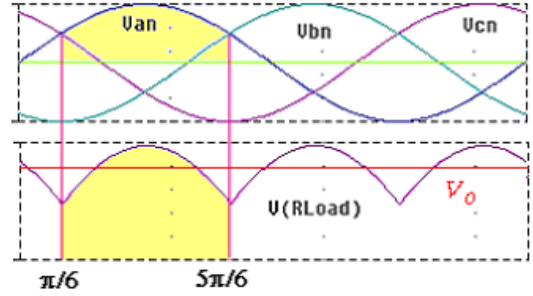
→ 단상 전파회로에 비해 리플의 크기는 상당히 작다.



③ 직류 평균 전압 $V_o \rightarrow 120^\circ$ 구간만 고려하면 됨.

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} v_{an} d(\omega t)$$

$$= \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6} V}{2\pi}$$



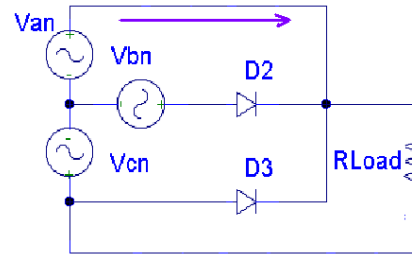
④ 다이오드의 평균전류

\rightarrow 출력전류 ($= \frac{3\sqrt{6} V}{2\pi R}$)의 $\frac{1}{3}$

⑤ 다이오드에 인가되는 역전압 \rightarrow

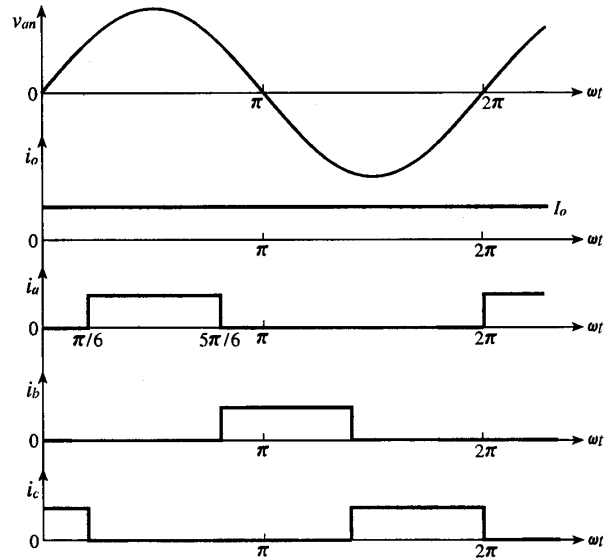
$\rightarrow V_{D2} = v_{an} - v_{bn}$

\rightarrow 최대 역전압 : 선간 전압의 최대 값
($= \sqrt{3} \sqrt{2} V$)



⑥ 유도성 부하인 경우의 특성 \rightarrow

- 출력전압 v_o 에는 변화가 없고 출력전류는 리플이 거의 없는 직류가 된다.
- 저항부하인 경우보다 출력전류의 실효값은 작아지나, 평균값은 동일하다.

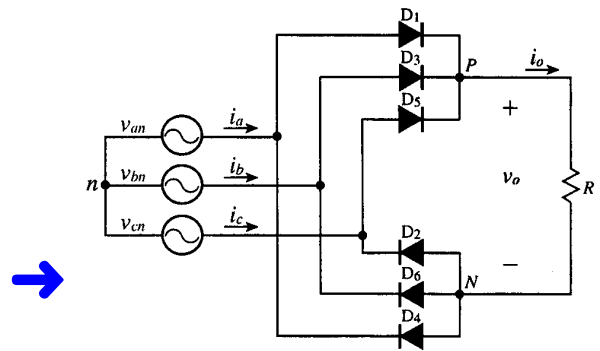
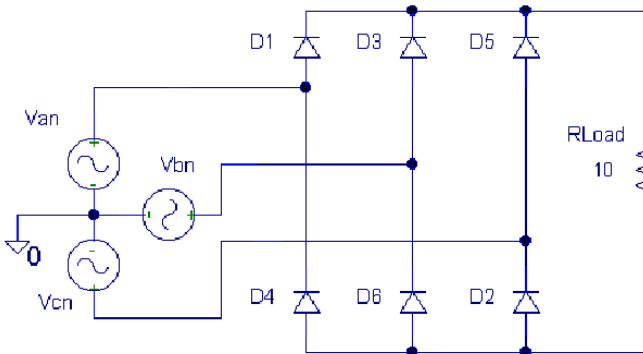


⑦ 반파 정류회로의 문제점

- \rightarrow 각상의 전원 측 전류가 한쪽으로만 흐르게 되어 입력 측에 변압기가 사용된다면 변압기가 자기적으로 포화된다.

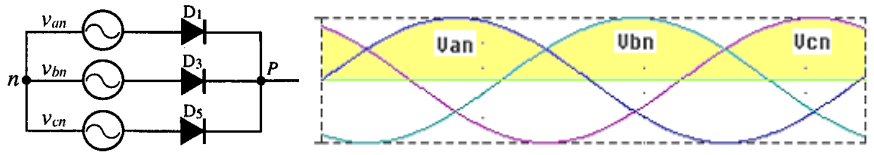
3-4-2 3상 전파 정류회로(3 Phase Full Wave Rectification Circuit)

• 회로 구성 : 6개의 다이오드로 구성 \rightarrow 2개의 3상 반파 정류회로의 결합

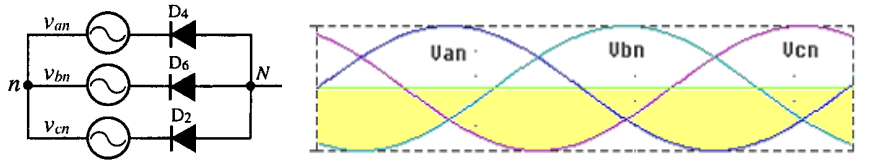


• 회로 동작

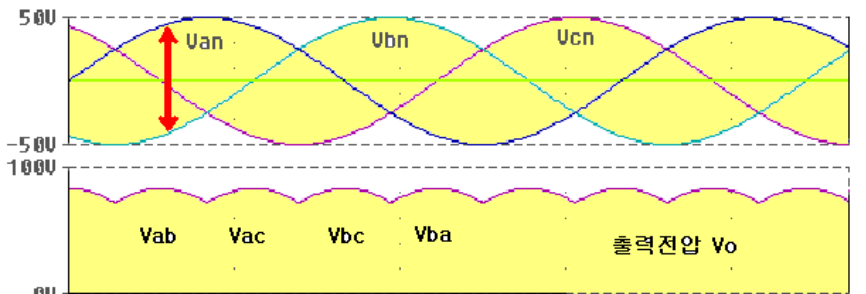
- 상단부 다이오드 D₁, D₃, D₅
 → 3상 전원 중 크기가 양의 방향으로 가장 큰 상의 다이오드가 도통됨



- 하단부 다이오드 D₄, D₆, D₂
 → 3상 전압 중 크기가 음의 방향으로 가장 큰 상의 다이오드가 도통됨

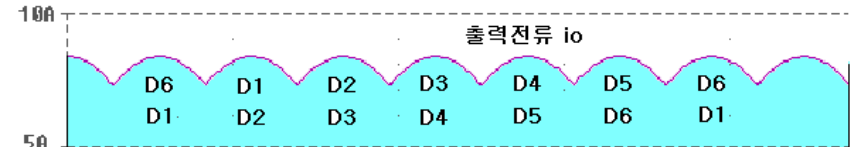


- 즉, 언제나 선간 전압이 가장 크게 되는 2개 조합의 다이오드가 도통.

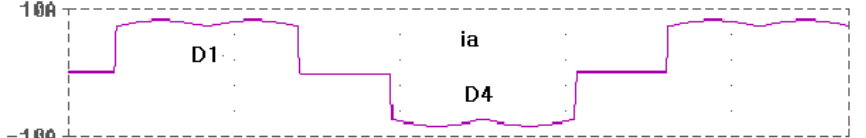


- 각각의 다이오드는 120° 씩 도통되고 순서는 ...1,2,3,4,5,6,1...이다.

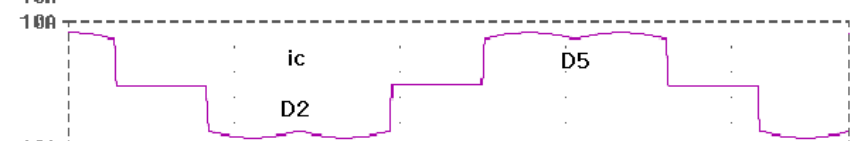
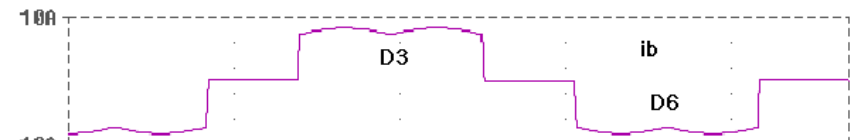
- 부하에는 구간별로 가장 큰 선간전압이 인가되며 전원전압 한주기에 6개의 구간이 존재.



- 출력전압의 리플주파수는 전원주파수의 6배이고 리플전압의 크기는 단상 정류기에 비해 상당히 감소된다.

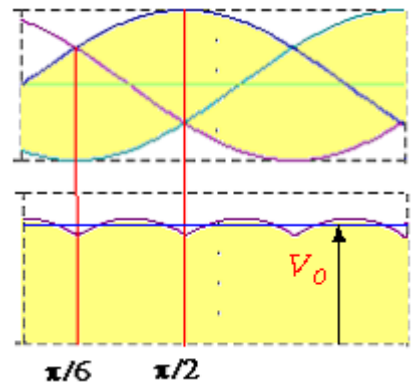


- 입력전류의 파형은 비정현파가 된다. →



• 직류 평균 전압

$$\begin{aligned}
 V_O &= \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} v_{ab} d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} [v_{an} - v_{bn}] d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{2} V [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3)] d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{6} V \sin(\omega t + \pi/6) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6} V}{\pi}
 \end{aligned}$$



- 다이오드에 인가되는 최대 역전압 →

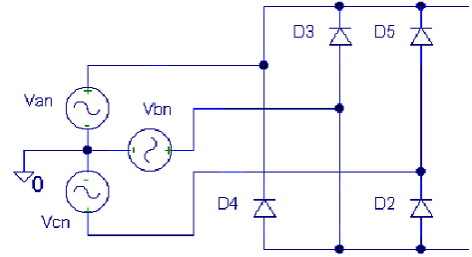
→ 최대 순간전압. 즉, $V_{Dmax} = \sqrt{3} \sqrt{2} V$

- 유도성 R-L 부하인 경우

→ 출력전압에는 변화가 없으나 출력전류는 직류에

가깝게 되어 출력전류의 최대값, 평균값, 실효값은

순수 저항부하인 경우와는 달라지는데 실효값은 줄어들어 부하저항에 공급되는 전력이 줄어든다.



■ Report : 3상 다이오드 전파 정류회로 Pspice Simulation

■ 정류기의 출력 특성 평가

- 리플률 RF(Ripple Factor) : 직류 평균전압에 대해 직류 측에 포함된 리플성분의 상대적 크기

- Ripple Factor(RF) = $\frac{V_{ac}}{V_{dc}}$ → 작을수록 직류에 가깝다. Ideal : RF=0

V_{dc} : 직류 평균 전압

$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}$: 출력전압의 리플성분의 실효값

V_{rms} : 출력전압의 실효값

- 파형률 : Form Factor(FF) = $\frac{V_{rms}}{V_{dc}}$ → 클수록 리플이 크다. Ideal : FF=1

표 3-1 각 다이오드 정류회로의 RF와 FF (전원전압 220V 시)

다이오드 정류방식	V_o [V]	$\langle u_o \rangle$ [V]	V_{ac} [V]	RF	FF
단상반파 (저항부하)	155.6	99.0	120.00	1.213	1.572
단상반파 (R-L부하)	99.0	99.0	0.00	0.000	1.000
단상전파 (저항부하)	220.0	198.0	95.90	0.484	1.111
단상전파 (R-L부하)	198.0	198.0	0.00	0.000	1.000
3상반파 (저항부하)	261.6	257.3	47.24	0.184	1.017
3상반파 (R-L부하)	257.3	257.4	0.00	0.000	1.000
3상전파 (저항부하)	297.4	297.1	13.35	0.045	1.001

■ Report : 연습문제 3-7, 3-9