

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

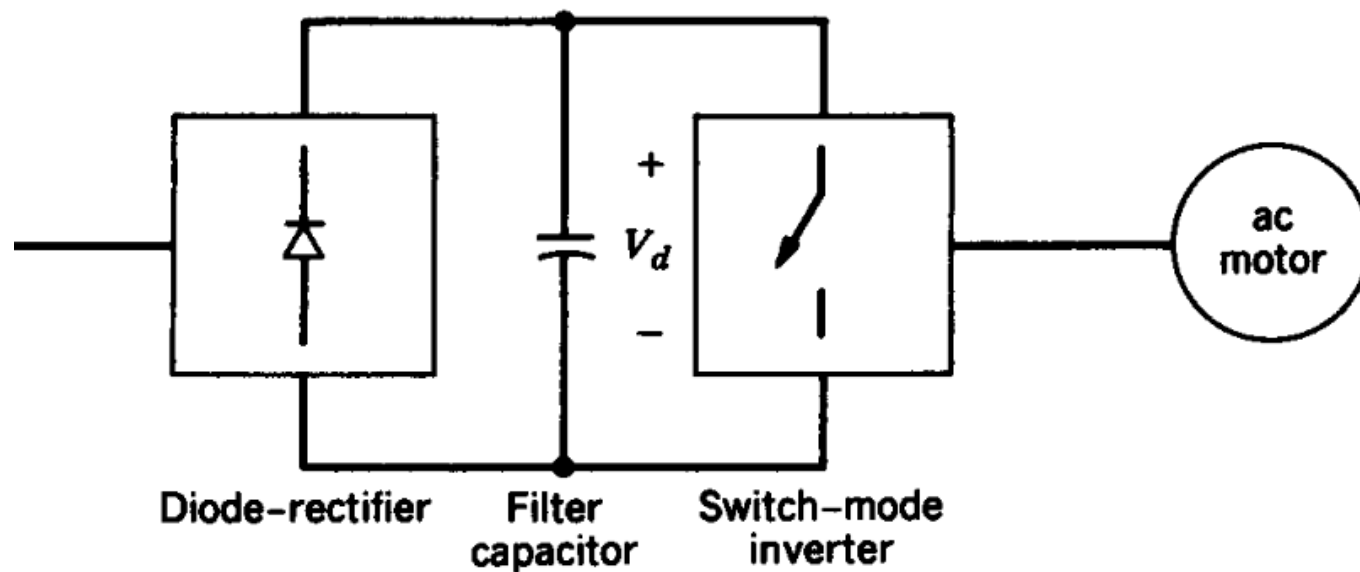
نام درس: الکترونیک صنعتی

جلسه ۱۸: مبدل‌های DC/AC (اینورترها)

ارائه دهنده: علی دستفان

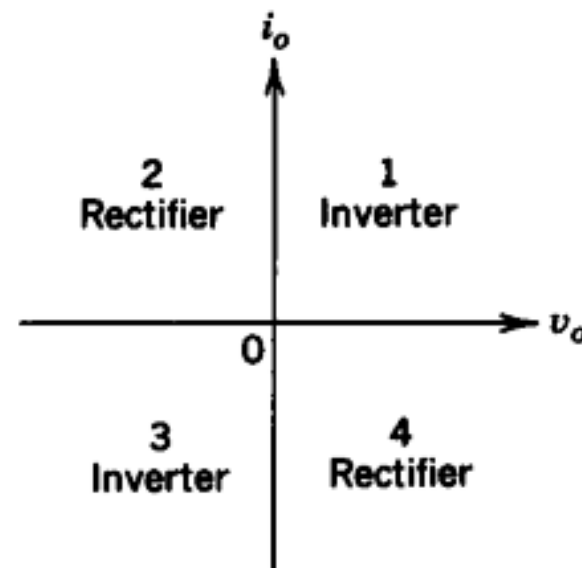
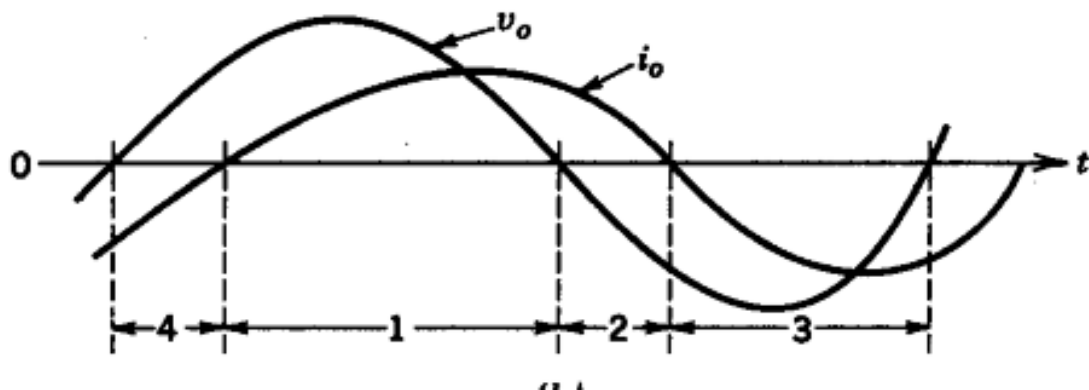
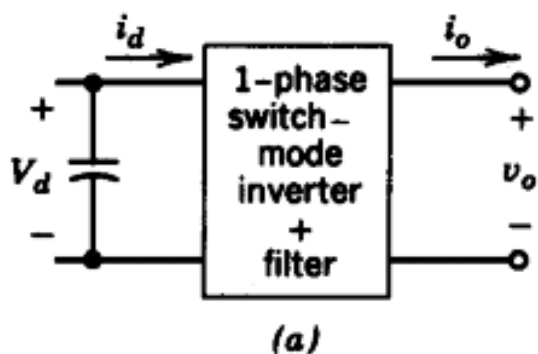
دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

مقدمه



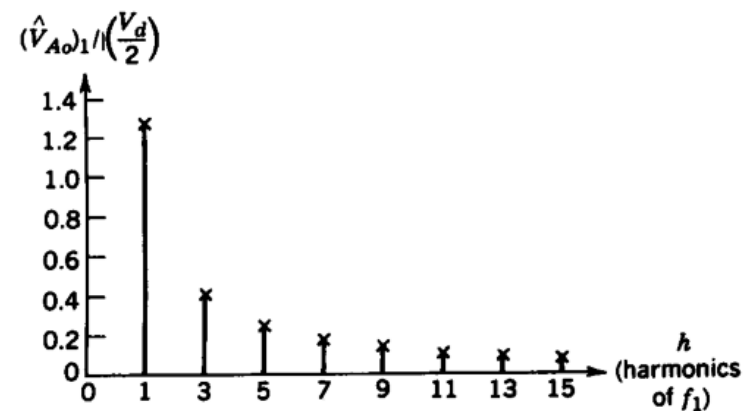
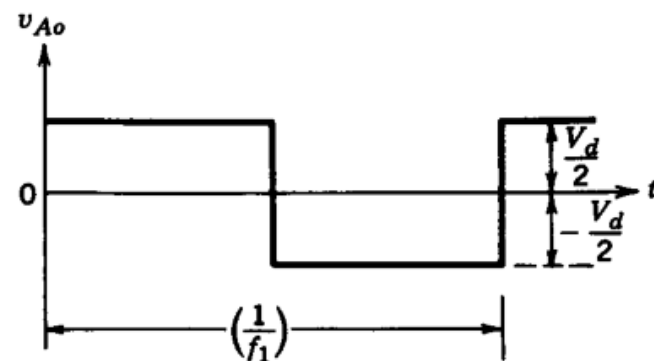
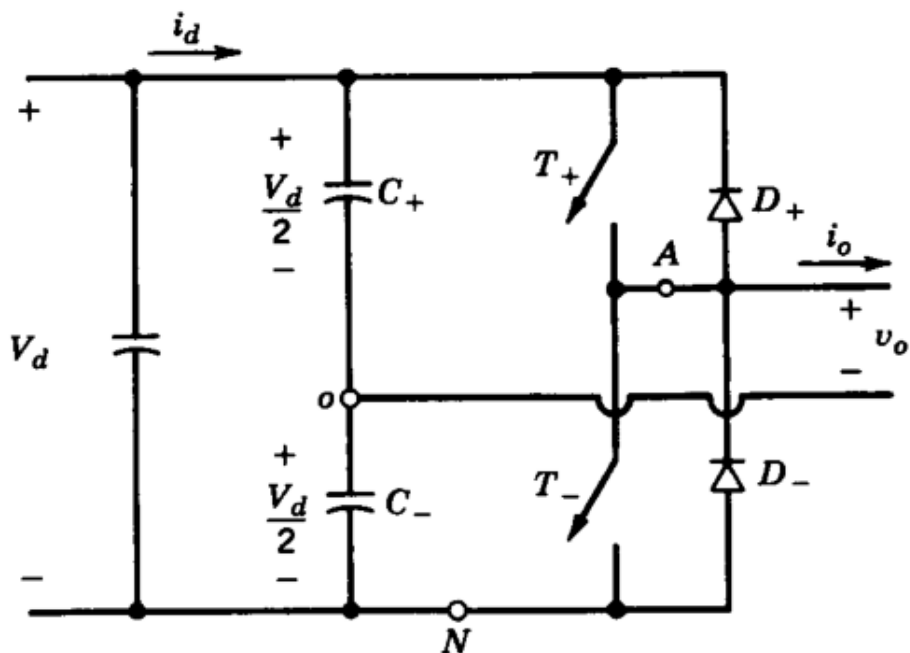
دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

نواحی کارکرد



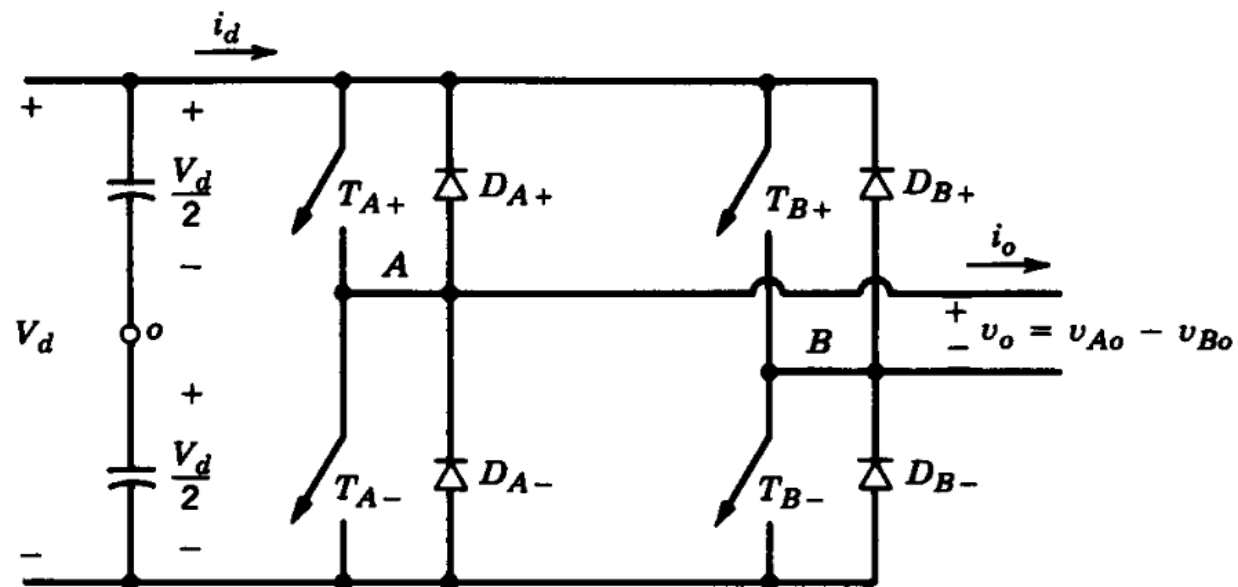
دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

اینورتر نیم پل



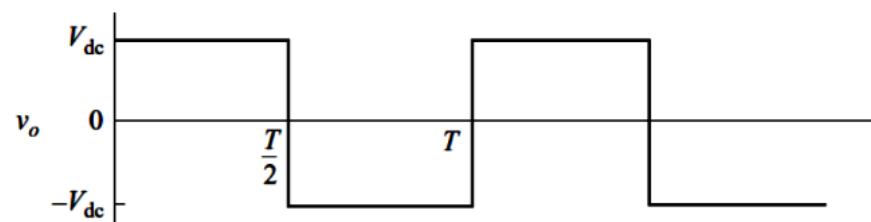
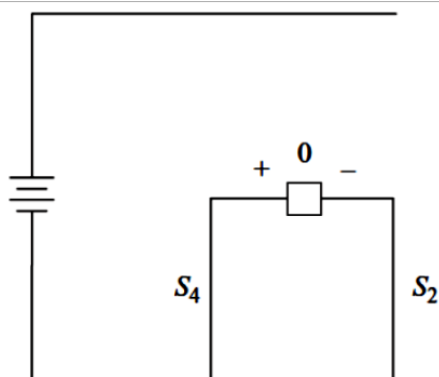
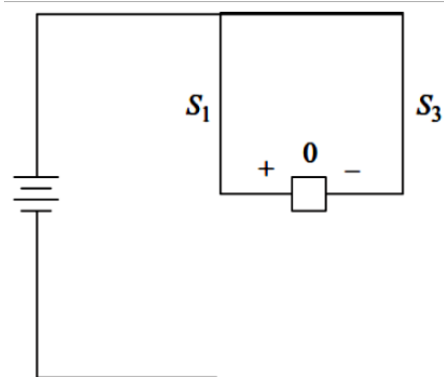
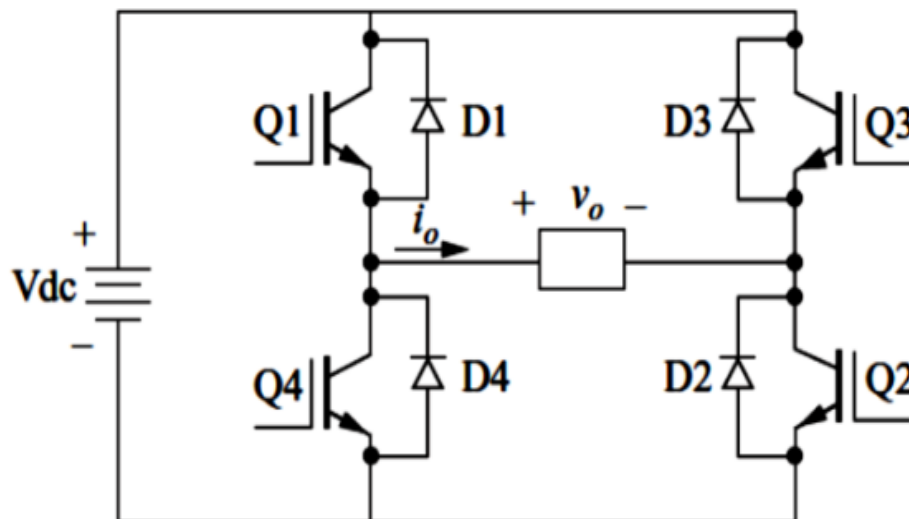
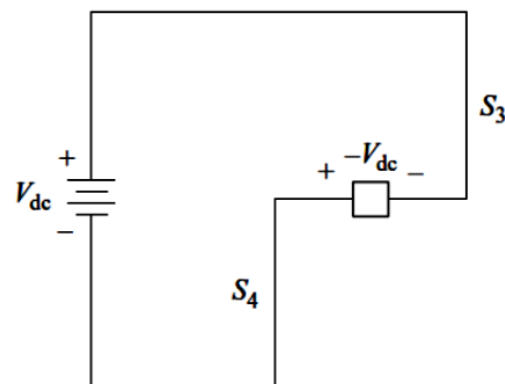
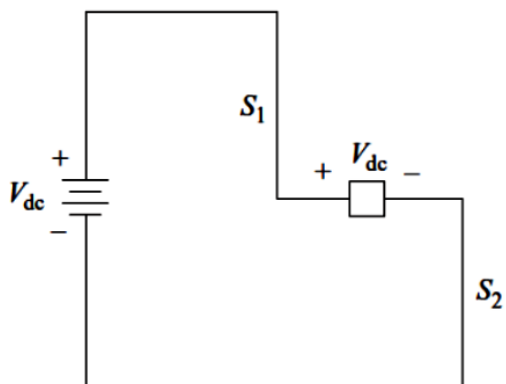
دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

اینورتر تمام پل



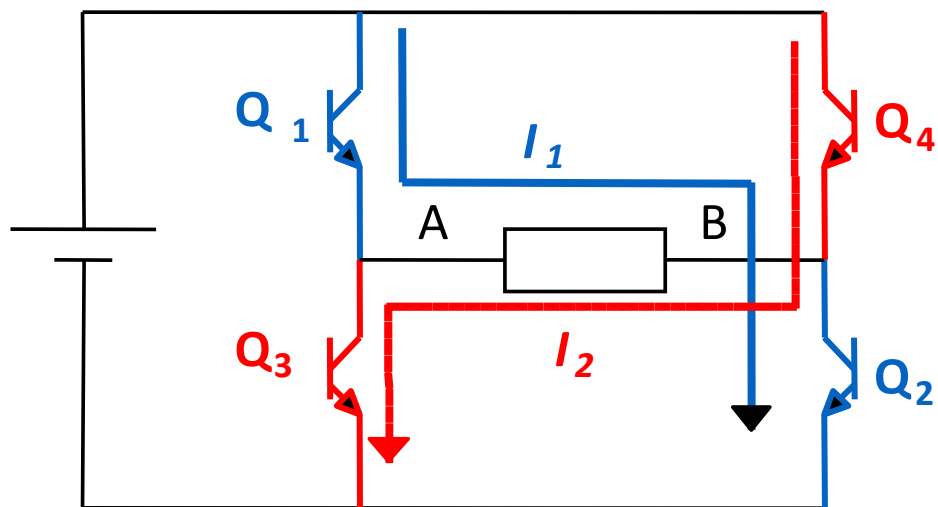
دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی برق

اینورتر تمام پل

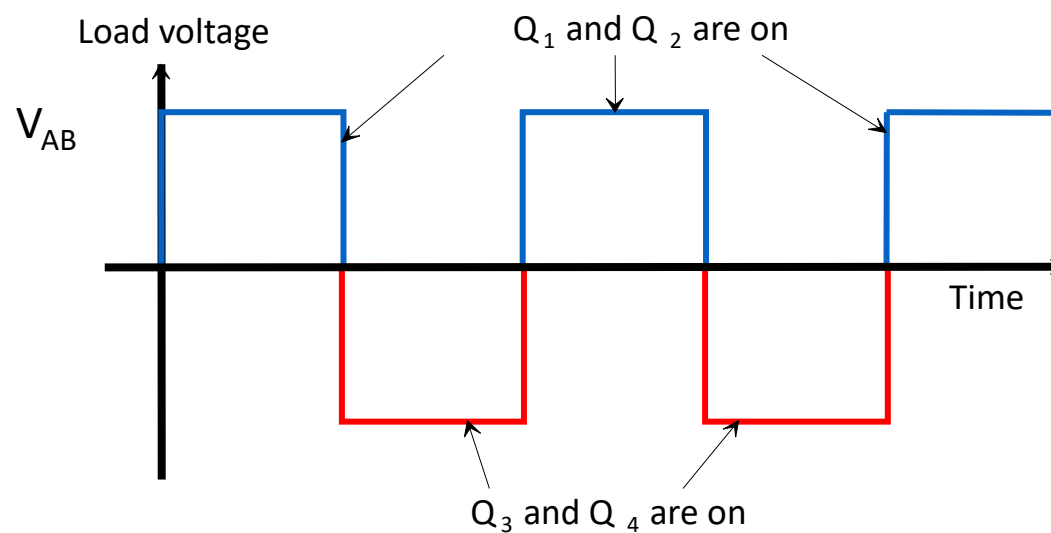


دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

اینورتر تمام پل



$$v_o(t) = \sum_{n \text{ odd}} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin n\omega_0 t$$



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

روابط

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n)$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2 R$$

$$i_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2}$$

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}{V_{1,rms}^2}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}}$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n}$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

بار RL

$$i_o(t) = i_f(t) + i_n(t)$$

$$= \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-t/\tau} \quad \text{for} \quad 0 \leq t \leq T/2$$

$$i_o(t) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^{-(t-T/2)/\tau} \quad \text{for} \quad T/2 \leq t \leq T$$

$$i_o(0) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^0 = I_{\min}$$

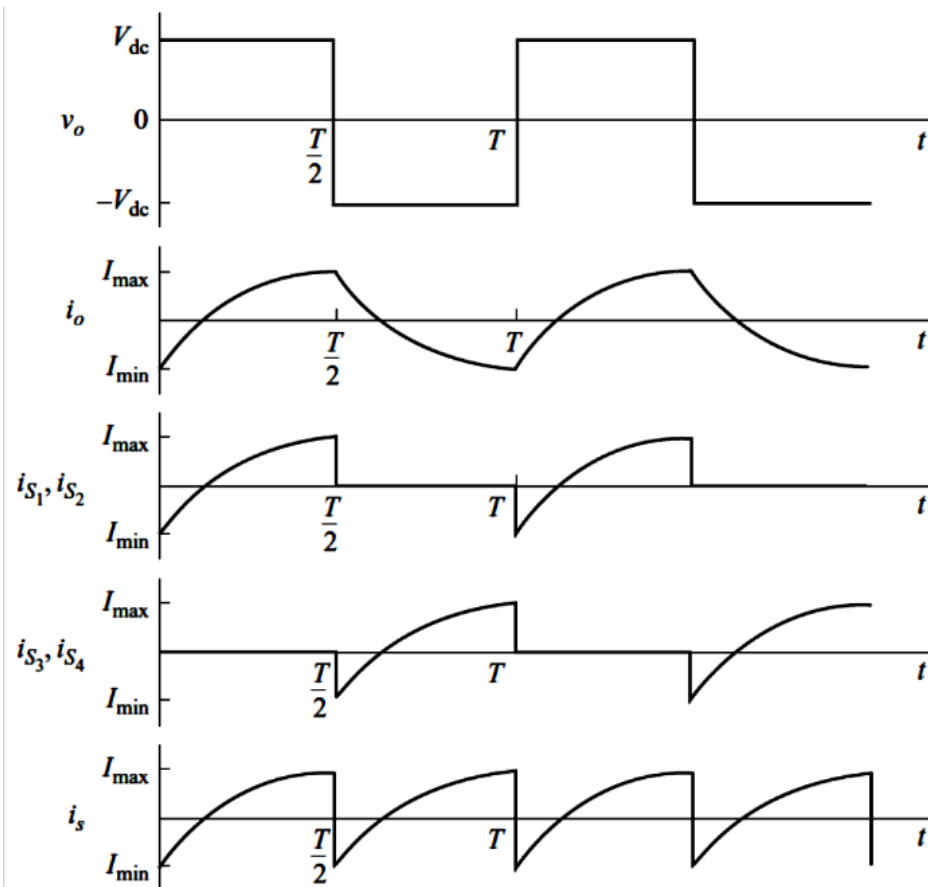
$$A = I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R}$$

$$i_o(T/2) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^0 = I_{\max}$$

$$B = I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R}$$

$$i_o(t) = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-t/\tau} & \text{در } 0 < t < \frac{T}{2} \\ \frac{-V_{dc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-(t-T/2)/\tau} & \text{در } \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

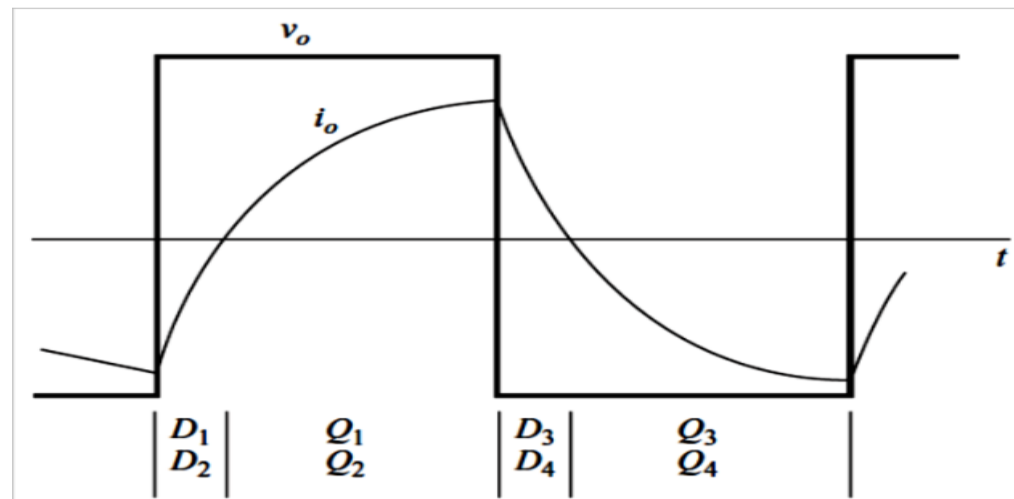
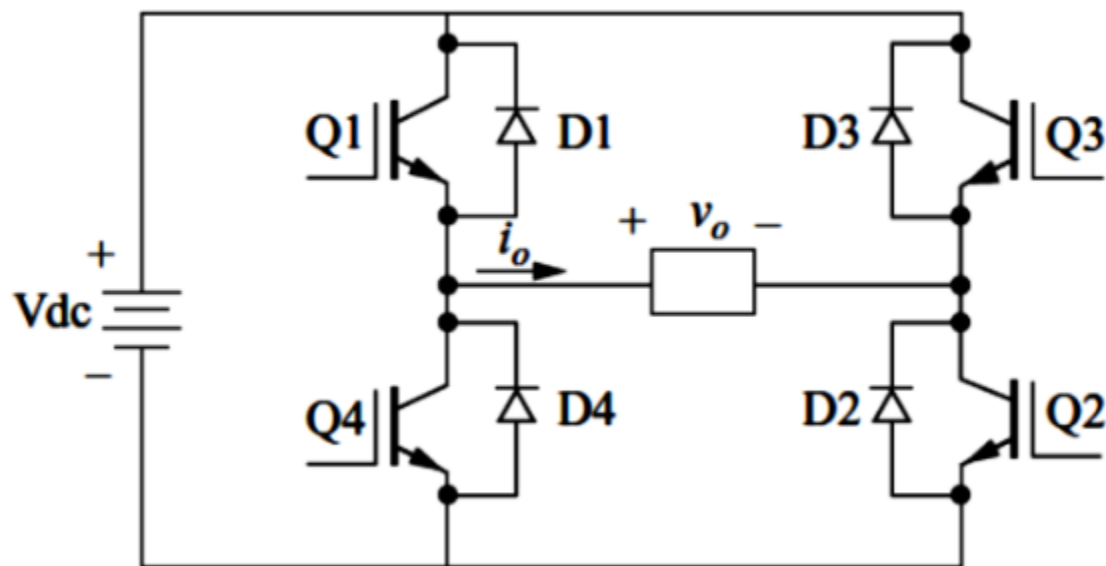


$$i(T/2) = I_{\max} = \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-(T/2\tau)}$$

$$I_{\max} = -I_{\min} = \frac{V_{dc}}{R} \left(\frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}} \right)$$

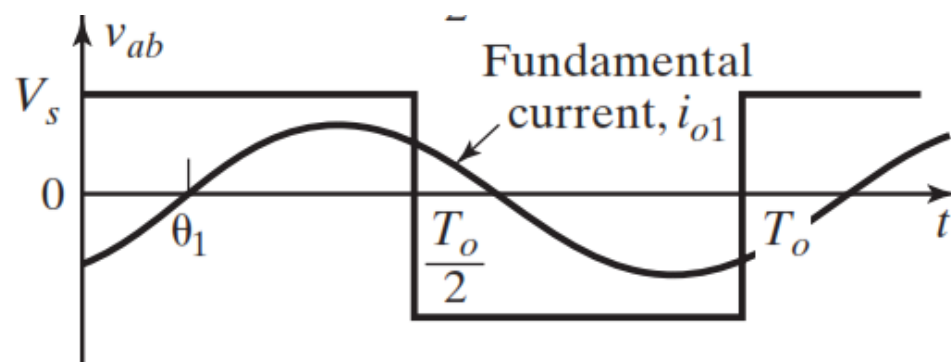
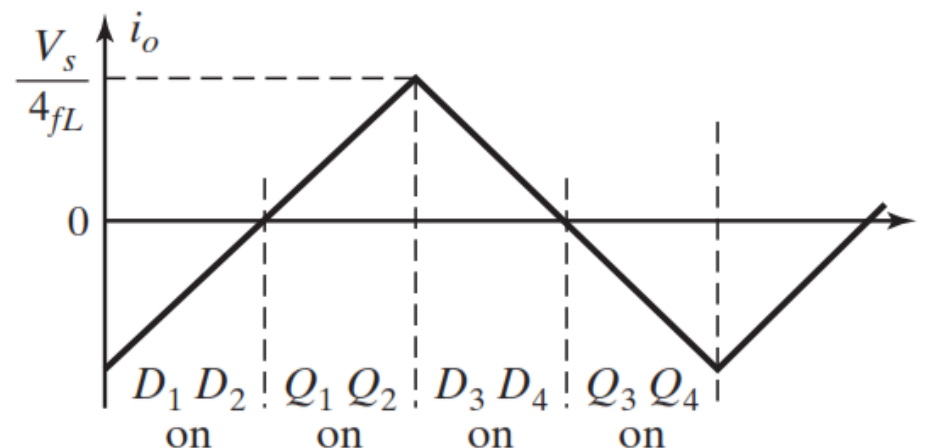
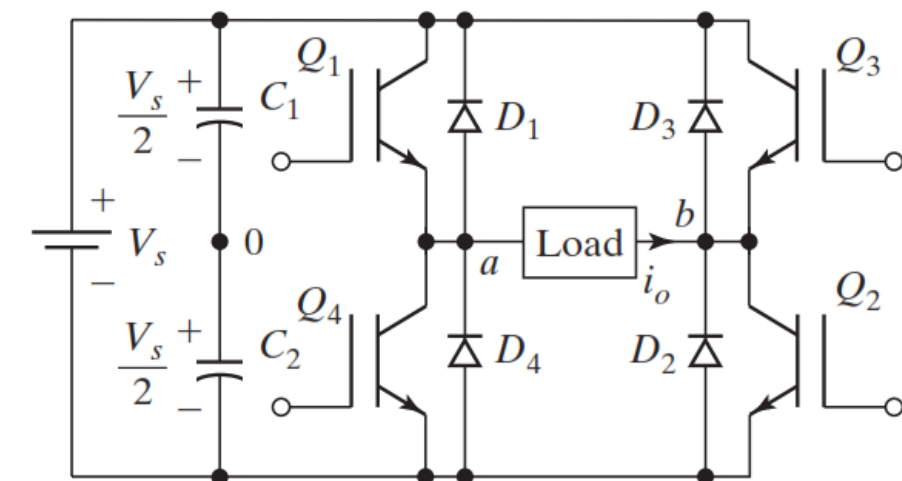
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-t/\tau} \right]^2 dt}$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

اینورتر پل تک فاز



$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t$$

$$V_{o1} = \frac{4V_s}{\sqrt{2}\pi} = 0.90V_s \quad V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi}$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

اینورتر پل تک فاز

| | | | | | | |
|--|---|-----|---------------------|---------------------|-----------------|--|
| S_1 and S_2 are on and S_4 and S_3 are off | 1 | 10 | $V_S/2$ | $-V_S/2$ | V_S | S_1 and S_2 if $i_o > 0$ D_1 and D_2 if $i_o < 0$ |
| S_4 and S_3 are on and S_1 and S_2 are off | 2 | 01 | $-V_S/2$ | $V_S/2$ | $-V_S$ | D_4 and D_3 if $i_o > 0$ S_4 and S_3 if $i_o < 0$ |
| S_1 and S_3 are on and S_4 and S_2 are off | 3 | 11 | $V_S/2$ | $V_S/2$ | 0 | S_1 and D_3 if $i_o > 0$ D_1 and S_3 if $i_o < 0$ |
| S_4 and S_2 are on and S_1 and S_3 are off | 4 | 00 | $-V_S/2$ | $-V_S/2$ | 0 | D_4 and S_2 if $i_o > 0$ S_4 and D_2 if $i_o < 0$ |
| S_1, S_2, S_3 , and S_4 are all off | 5 | off | $-V_S/2$ $V_S/2$ | $V_S/2$ $-V_S/2$ | $-V_S$ V_S | D_4 and D_3 if $i_o > 0$ D_1 and D_2 if $i_o < 0$ |

$$i_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_S}{n\pi \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \quad P_n = I_{n,rms}^2 R = \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2 R$$

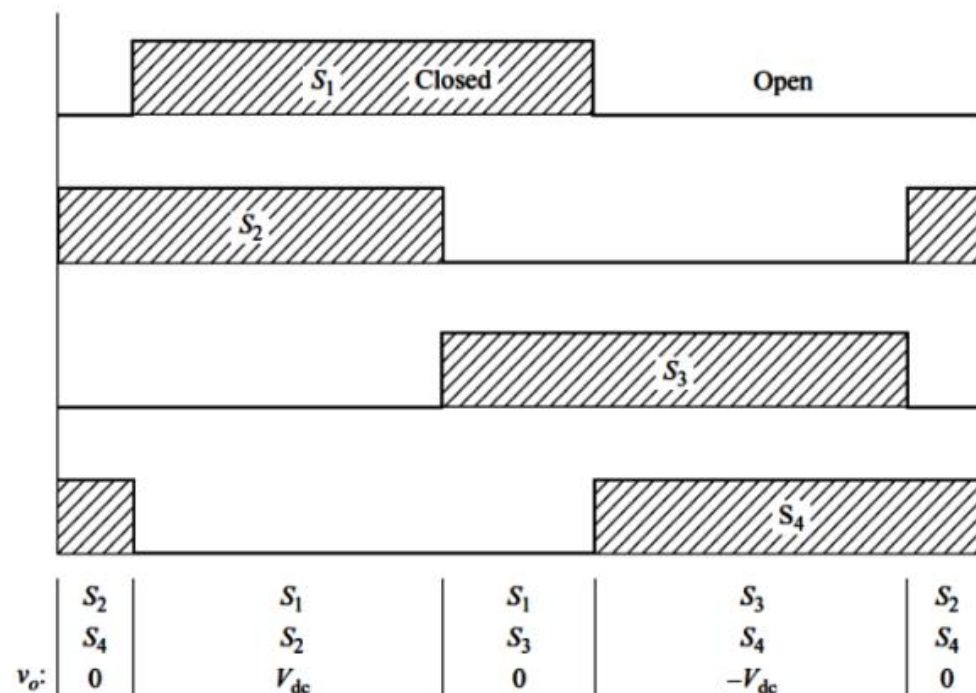
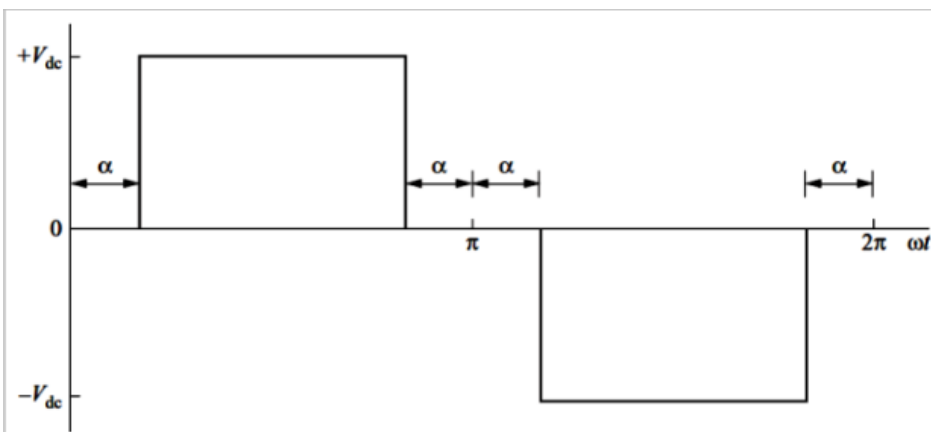
$$THD_V = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{dc}^2 - (4V_{dc}/\sqrt{2}\pi)^2}}{4V_{dc}/\sqrt{2}\pi} = 0.483 = 48.3\% \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms})^2}}{I_{1,rms}}$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

کنترل دامنه و هارمونیک با تغییر عرض پالس مربعی

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{dc}^2 d(\omega t)} = V_{dc} \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi}}$$

$$V_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{dc} \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha)$$



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

کنترل دامنه و هارمونیک با تغییر عرض پالس مربعی

$$V_1 = \left(\frac{4V_{dc}}{\pi} \right) \cos \alpha$$

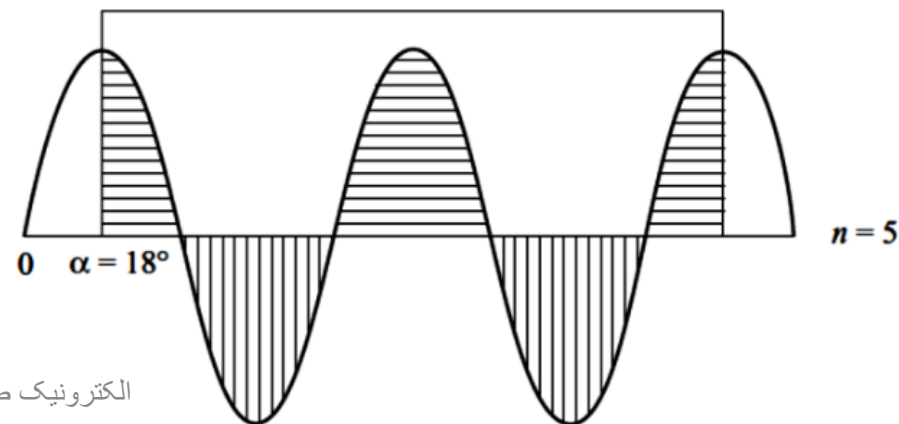
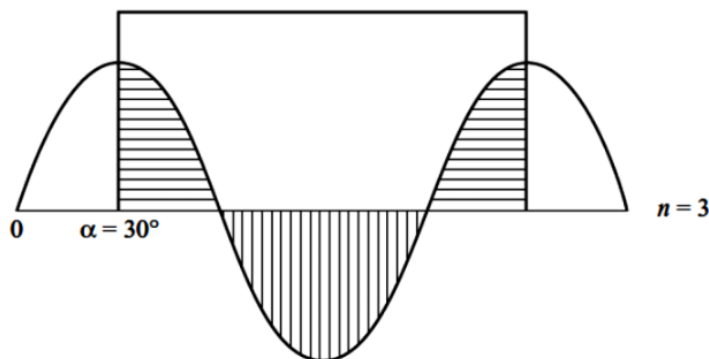
دامنه فرکانس اصلی ($n=1$) با تنظیم α قابل کنترل است

$$\alpha = \frac{90^\circ}{n}$$

هارمونیک‌ها نیز می‌توانند با انتخاب مقادیر α حذف شوند به گونه‌ای که

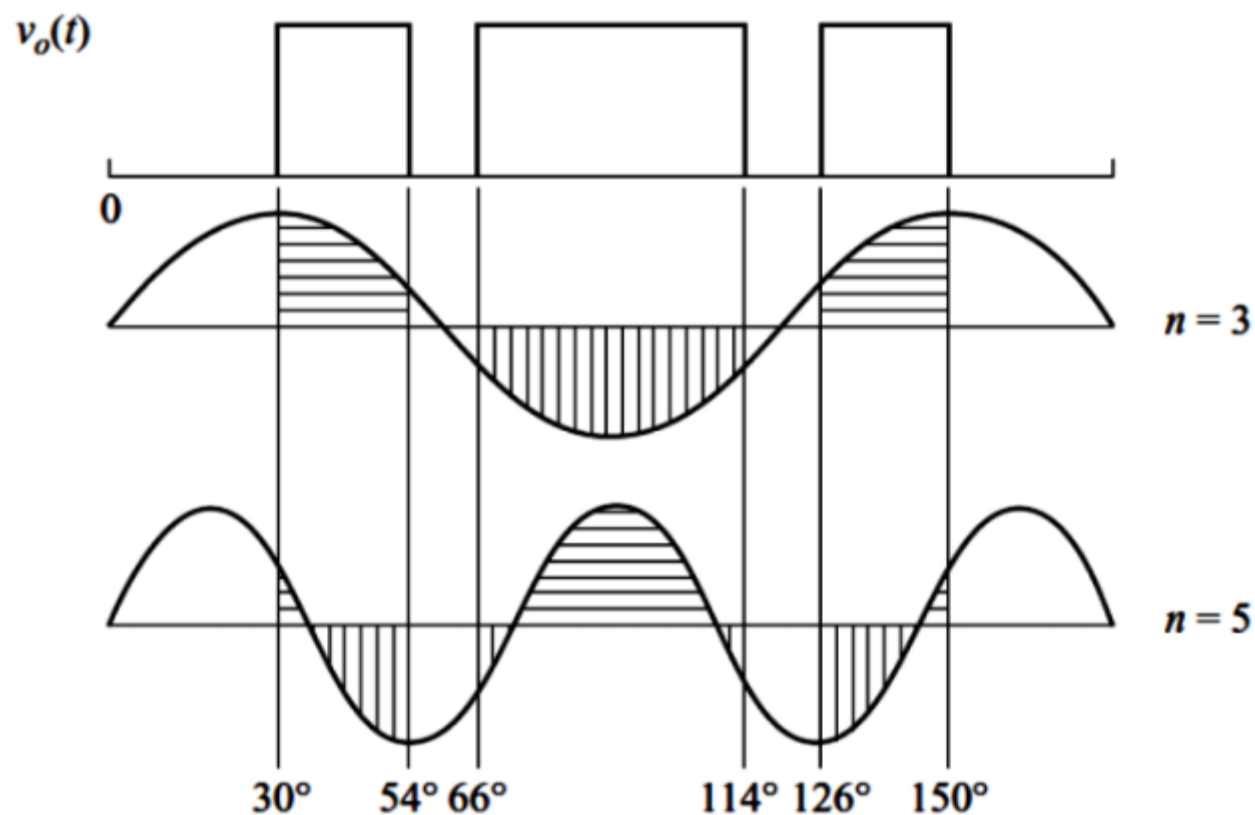
انتخاب $\alpha = 30^\circ$ برای حذف هارمونیک سوم، دامنه فرکانس اصلی خروجی

انتخاب $V_1 = (4V_{dc} / \pi) \cos 30^\circ = 1.1 V_{dc}$ ثابت می‌گردد و قابلیت کنترل آن از دست می‌رود.



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

حذف چند هارمونیک در ولتاژ خروجی



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

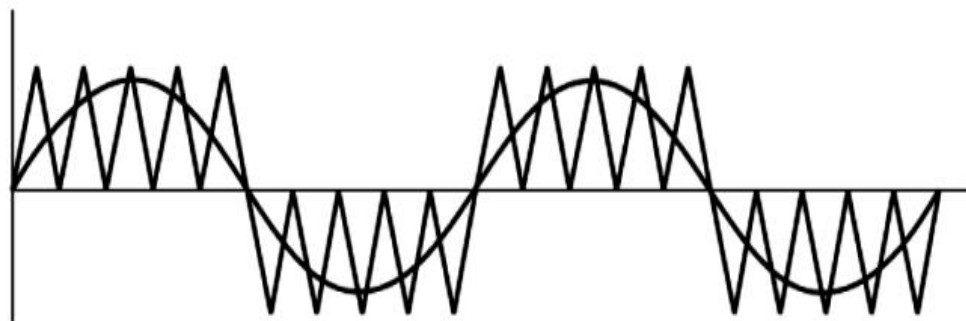
مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

$$m_a = \frac{V_{m,reference}}{V_{m,carrier}} = \frac{V_{m,sine}}{V_{m,tri}}$$

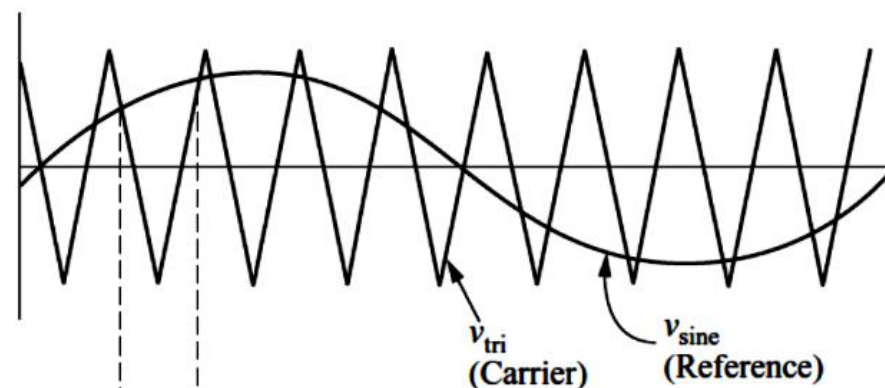
نسبت مدولاسیون دامنه m_a

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{tri}}{f_{sine}}$$

نسبت مدولاسیون فرکانس m_f



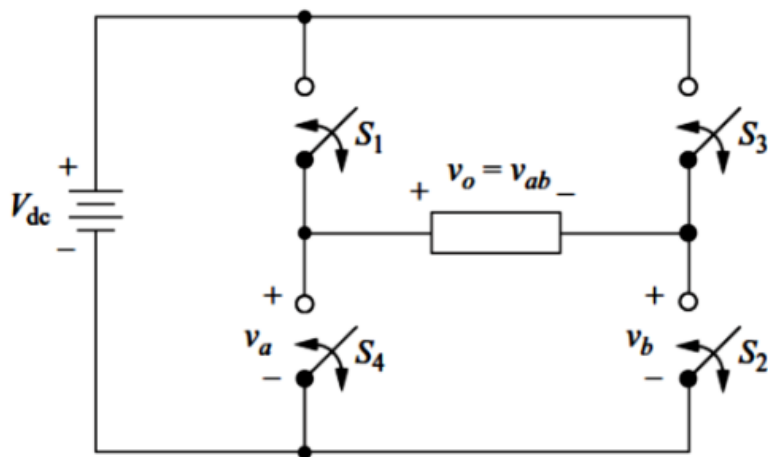
PWM تک قطبی



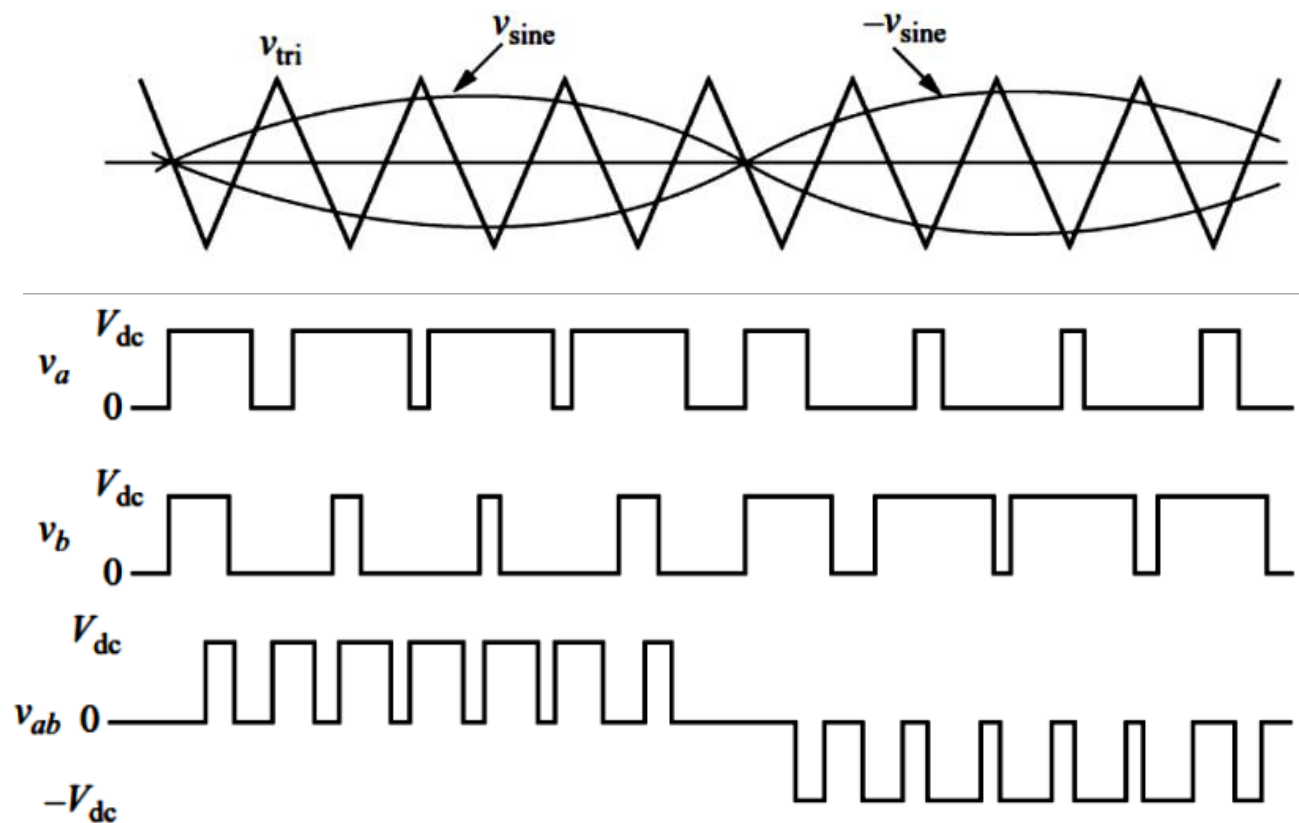
مدولاسیون عرض پالس دو قطبی

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

PWM تک قطبی



S_1 is on when $v_{\sin} > v_{tri}$
 S_2 is on when $-v_{\sin} < v_{tri}$
 S_3 is on when $-v_{\sin} > v_{tri}$
 S_4 is on when $v_{\sin} < v_{tri}$



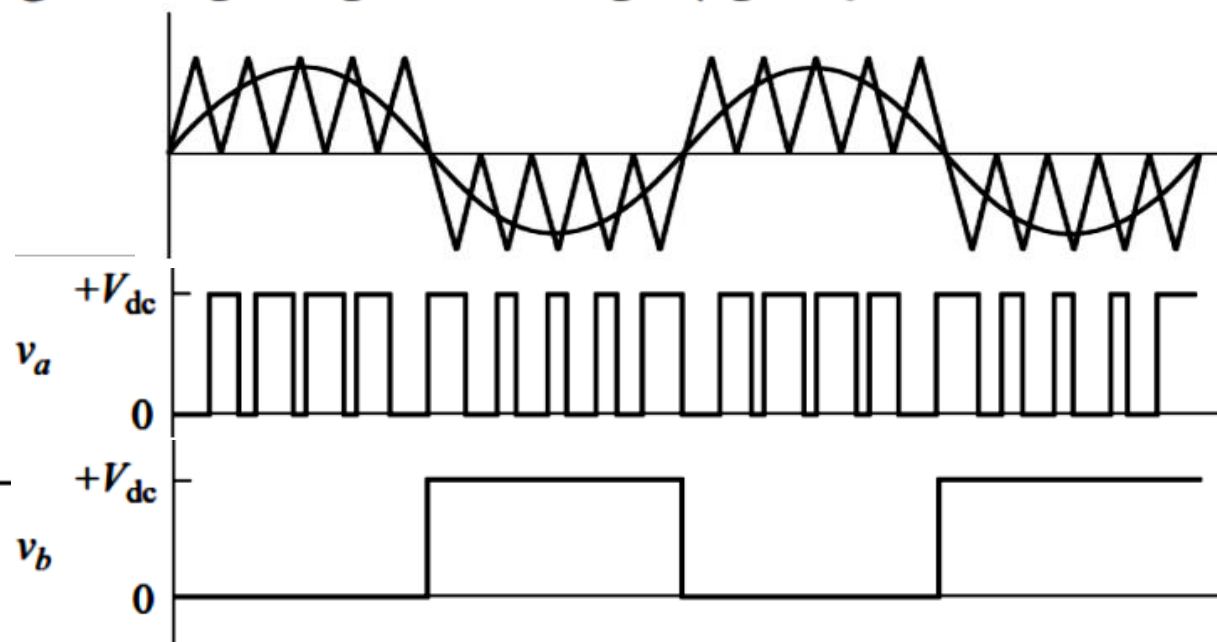
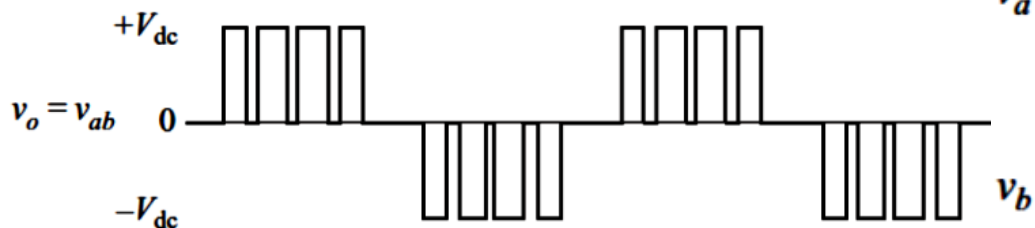
دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

PWM تک قطبی

در یک روش کلیدزنی تک قطبی دیگر، فقط یک جفت از کلیدها در فرکانس حامل کار می-کنند در حالیکه جفت دیگر در فرکانس مرجع عمل می-کنند، بنابراین دو کلید در فرکانس بالا و

دو کلید در فرکانس پایین دارد. در این روش کلیدزنی:

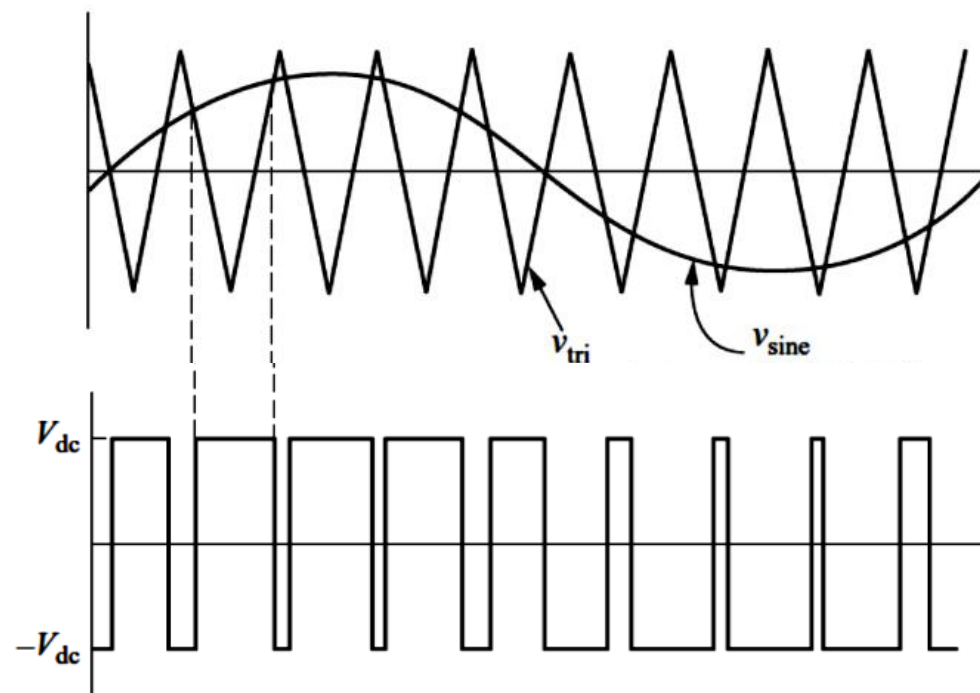
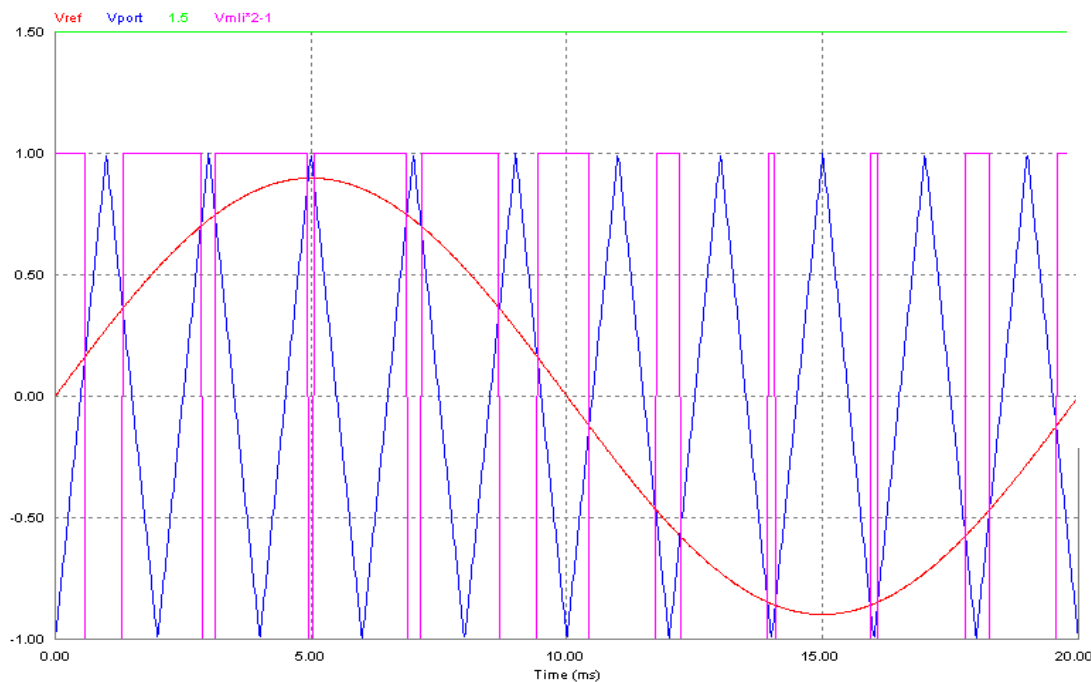
S_1 is on when $v_{\text{sine}} > v_{\text{tri}}$ (high frequency)
 S_4 is on when $v_{\text{sine}} < v_{\text{tri}}$ (high frequency)
 S_2 is on when $v_{\text{sine}} > 0$ (low frequency)
 S_3 is on when $v_{\text{sine}} < 0$ (low frequency)



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

PWM دو قطبی

S_1 and S_2 are on when $v_{\sin} > v_{tri}$ ($v_o = +V_{dc}$)
 S_3 and S_4 are on when $v_{\sin} < v_{tri}$ ($v_o = -V_{dc}$)



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

هارمونیکها در PWM دو قطبی

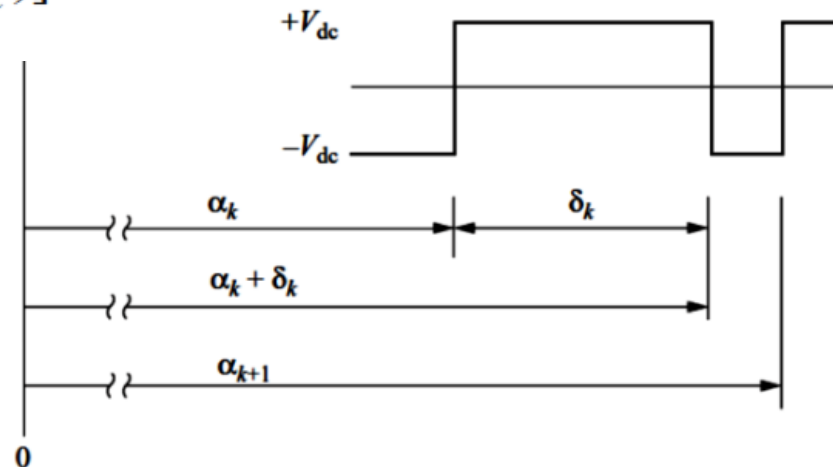
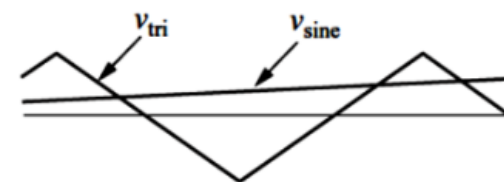
$$V_{nk} = \frac{2}{\pi} \int_0^T v(t) \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

$$= \frac{2}{\pi} \left[\int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \delta_k} V_{dc} \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{\alpha_k + \delta_k}^{\alpha_{k+1}} -(V_{dc}) \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right]$$

$$V_{nk} = \frac{2V_{dc}}{n\pi} [\cos n\alpha_k + \cos n\alpha_{k+1} - 2 \cos n(\alpha_k + \delta_k)]$$

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_0 t)$$

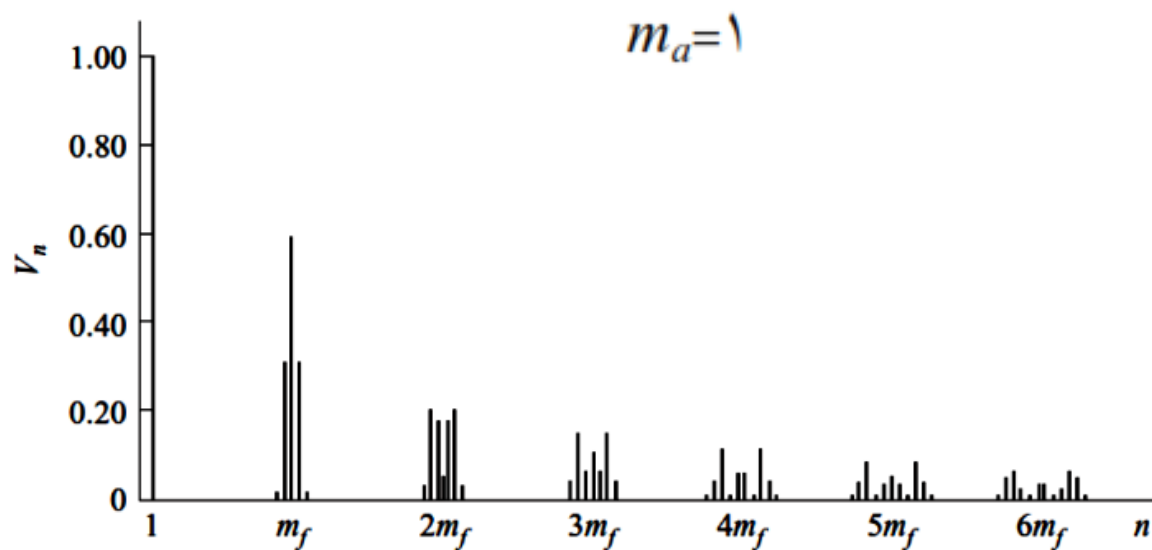
$$V_n = \sum_{k=1}^p V_{nk}$$



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

هارمونیکها در PWM دو قطبی

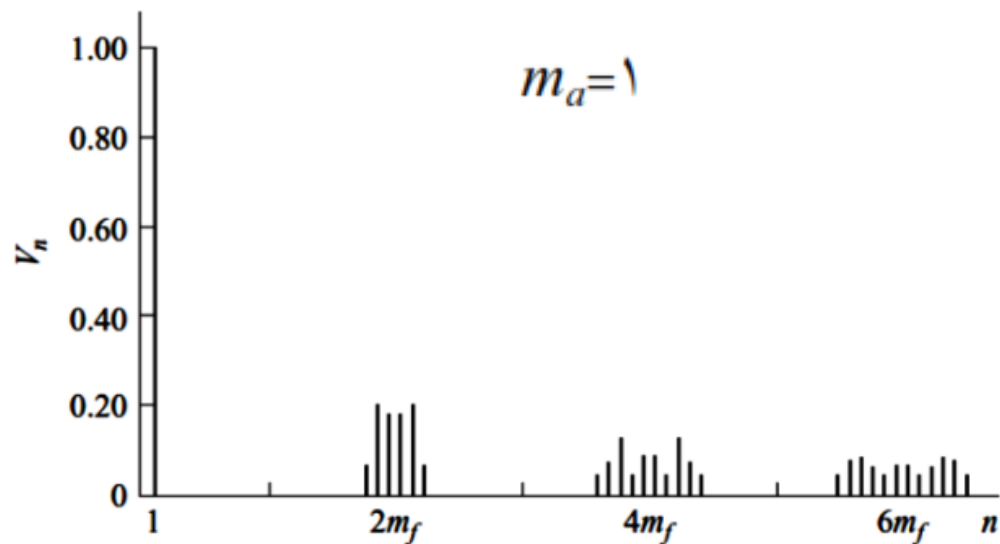
| n | $M_a=1$ | ۰,۹ | ۰,۸ | ۰,۷ | ۰,۶ | ۰,۵ | ۰,۴ | ۰,۳ | ۰,۲ | ۰,۱ |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ۱ | ۱,۰۰ | ۰,۹۰ | ۰,۸۰ | ۰,۷۰ | ۰,۶۰ | ۰,۵۰ | ۰,۴۰ | ۰,۳۰ | ۰,۲۰ | ۰,۱۰ |
| m_f | ۰,۶۰ | ۰,۷۱ | ۰,۸۲ | ۰,۹۲ | ۱,۰۱ | ۰,۰۸ | ۱,۱۵ | ۱,۲۰ | ۱,۲۴ | ۱,۲۷ |
| $m_f \pm ۲$ | ۰,۳۲ | ۰,۲۷ | ۰,۲۲ | ۰,۱۷ | ۰,۱۳ | ۰,۰۹ | ۰,۰۶ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۰ |



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

هارمونیکها در PWM تک قطبی

| n | $M_a=1$ | ۰,۹ | ۰,۸ | ۰,۷ | ۰,۶ | ۰,۵ | ۰,۴ | ۰,۳ | ۰,۲ | ۰,۱ |
|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ۱ | ۱,۰۰ | ۰,۹۰ | ۰,۸۰ | ۰,۷۰ | ۰,۶۰ | ۰,۵۰ | ۰,۴۰ | ۰,۳۰ | ۰,۲۰ | ۰,۱۰ |
| $2m_f \pm 1$ | ۰,۱۸ | ۰,۲۵ | ۰,۳۱ | ۰,۳۵ | ۰,۳۷ | ۰,۳۶ | ۰,۳۳ | ۰,۲۷ | ۰,۱۹ | ۰,۱۰ |
| $2m_f \pm 3$ | ۰,۲۱ | ۰,۱۸ | ۰,۱۴ | ۰,۱۰ | ۰,۰۷ | ۰,۰۴ | ۰,۰۲ | ۰,۰۱ | ۰,۰۰ | ۰,۰۰ |



دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

مثال ۱

از یک اینورتر تمام پل برای تولید یک ولتاژ ۶۰ هرتزی در دو سر یک بار RL سری با استفاده از PWM دوقطبی استفاده شده است. ورودی DC، $100V$ ، نسبت مدولاسیون دامنه m_a ، 0.8 و نسبت مدولاسیون فرکانس m_f ، ۲۱ می باشد $[f_{tri} = (21)(60) = 1260 \text{ Hz}]$. بار دارای مقاومت $R = 10 \Omega$ و اندوکتانس سری $L = 20 \text{ mH}$ می باشد. مطلوب است: الف) دامنه مولفه 60 Hz ولتاژ خروجی و جریان بار، ب) توان جذب شده توسط مقاومت بار و ج) THD جریان بار.

$$V_1 = m_a V_{dc} = (0.8)(100) = 80V \quad I_1 = \frac{80}{\sqrt{10^2 + [(1)(2\pi 60)(0.02)]^2}} = 6.39 \text{ A} \quad (\text{الف})$$

نسبت مدولاسیون فرکانس m_f ، ۲۱ می باشد $[f_{tri} = (21)(60) = 1260 \text{ Hz}]$.

ب) با $m_f = 21$ هارمونیک های اول در ۲۳ و ۱۹ و $n = 21$ می باشند. $V_{21} = (0.82)(100) = 82 \text{ V}$

$$V_{19} = V_{23} = (0.22)(100) = 22 \text{ V}$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

مثال ۱ (ادامه)

$$P_n = (I_{n,rms})^2 R = \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2 R$$

$$P = \sum P_n \approx 204.0 + 0.1 + 1.3 + 0.1 = 205.5 \text{ W}$$

(ج) THD جریان بار

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \approx \frac{\sqrt{(0.11)^2 + (0.36)^2 + (0.09)^2}}{4.52} = 0.087 = 8.7\%$$

| n | f_n (Hz) | V_n (V) | Z_n (Ω) | I_n (A) | $I_{n,rms}$ (A) | P_n (W) |
|-----|------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------|
| ۱ | ۶۰ | ۸۰٫۰ | ۱۲٫۵ | ۶٫۳۹ | ۴٫۵۲ | ۲۰۴٫۰ |
| ۱۹ | ۱۱۴۰ | ۲۲٫۰ | ۱۴۳٫۶ | ۰٫۱۵ | ۰٫۱۱ | ۰٫۱ |
| ۲۱ | ۱۲۶۰ | ۸۱٫۸ | ۱۵۸٫۷ | ۰٫۵۲ | ۰٫۳۶ | ۱٫۳ |
| ۲۳ | ۱۳۸۰ | ۲۲٫۰ | ۱۷۳٫۷ | ۰٫۱۳ | ۰٫۰۹ | ۰٫۱ |

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

مثال ۲

یک اینورتر PWM دوقطبی را طراحی کنید که از یک منبع DC ۱۵۰ ولتی، یک خروجی با ولتاژ RMS، ۷۵ V و ۶۰ Hz تولید کند. بار از ترکیب RL سری با $R = ۱۲ \Omega$ و $L = ۶۰ \text{ mH}$ می باشد. فرکانس کلیدزنی را به گونه ای انتخاب کنید که THD جریان کمتر از ۱۰ درصد شود.

$$m_a = \frac{V_1}{V_{dc}} = \frac{75\sqrt{2}}{150} = 0.707 \quad I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = \frac{75\sqrt{2}}{\sqrt{12^2 + [(2\pi 60)(0.06)]^2}} = 4.14 \text{ A}$$

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms})^2} < 0.1 I_{1,rms} = 0.1 \left(\frac{4.14}{\sqrt{2}} \right) = 0.293 \text{ A}$$

با یک تقریب در نظر بگیرید که محتوای هارمونیک جریان بار همان هارمونیک غالب در

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms})^2} \approx I_{mf,rms} = \frac{I_{mf}}{\sqrt{2}}$$

فرکانس حامل است،

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

مثال ۲ (ادامه)

بنابراین دامنه هارمونیک جریان در فرکانس حامل به این صورت تخمین زده می شود

$$I_{mf} < (0.1)(4.14) = 0.414 \text{ A}$$

جدول ۸-۳ نشان می دهد که هارمونیک ولتاژ نرمالیزه شده برای $n=m_f$ و $m_a=0.7$ و 0.92 می -

باشد. بنابراین دامنه ولتاژ برای $n=m_f$ به صورت زیر است:

$$V_{mf} = 0.92V_{dc} = (0.92)(150) = 138 \text{ V}$$

پس حداقل امپدانس بار در فرکانس حامل به صورت زیر بدست می آید:

$$Z_{mf} = \frac{V_{mf}}{I_{mf}} = \frac{138}{0.414} = 333 \text{ } \Omega$$

بنابراین امپدانس در فرکانس حامل باید خیلی بزرگتر از بار مقاومتی $12 \text{ } \Omega$ باشد. در نظر

بگیرید که امپدانس در فرکانس حامل به طور کامل راکتانس سلفی باشد:

$$Z_{mf} \approx \omega L = m_f \omega_0 L$$

دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکده مهندسی برق

مثال ۲ (ادامه)

برای اینکه امپدانس بار بزرگتر از 333Ω باشد، داریم:

$$m_f \omega_0 L > 333$$
$$m_f > \frac{333}{(377)(0.06)} = 14.7$$

با انتخاب m_f به طوریکه حداقل ۱۵ باشد، خواسته‌های طراحی به صورت تقریبی برآورده می‌شود. اما به هر حال تخمین محتوای هارمونیک که در محاسبات استفاده شد کمتر از مقدار واقعی می‌باشد، بنابراین انتخاب یک فرکانس حامل بالاتر محتاطانه‌تر خواهد بود. فرض کنید که $m_f = 17$ باشد که عدد صحیح فرد بعدی می‌باشد. حال فرکانس موج حامل به این صورت خواهد بود:

$$f_{tri} = m_f f_{ref} = (17)(60) = 1020 \text{ Hz}$$