

Ηλεκτρονικά Ισχύος και Μέθοδοι Οδήγησης Κινητήρων

Ανορθωτές (AC-DC)

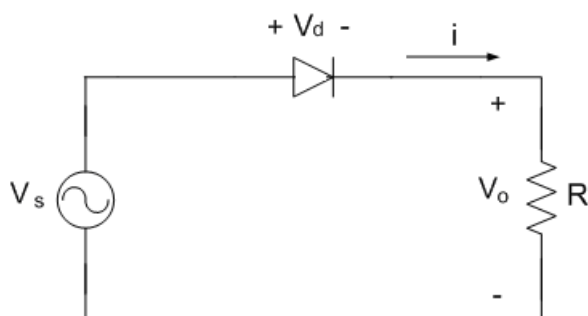
UNIVERSITY OF
WESTERN MACEDONIA



Γεώργιος Χ. Χριστοφορίδης, M.Sc., PhD
Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Μηχανικών Υπολογιστών

Ανορθωτές μισού κύματος

- Μη-ελεγχόμενη ανορθωση, ωμικό φορτίο

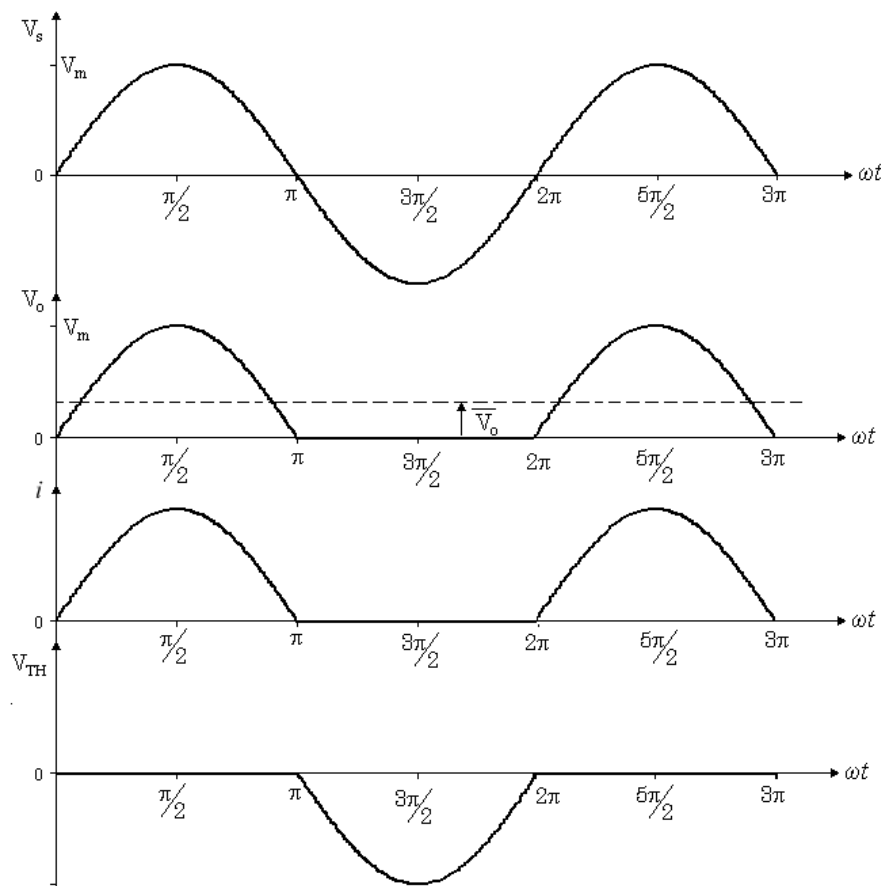


$$V_{o,av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi}$$

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = \frac{V_m}{2}$$

$$V_{Ripple} = \sqrt{V_{o,rms}^2 - V_{o,av}^2} = 0.385 V_m$$

$$I_{Ripple} = \sqrt{i_{rms}^2 - i_{av}^2} = 0.385 \frac{V_m}{R}$$

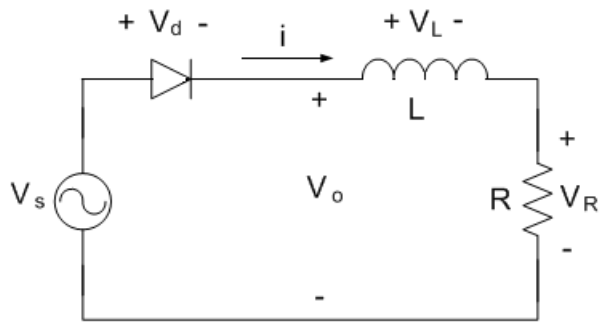


$$RF = \frac{V_{Ripple}}{V_{o,av}} = 1.21$$



Ανορθωτές μισού κύματος

- Μη-ελεγχόμενη ανορθωση, ωμικό-επαγωγικό φορτίο



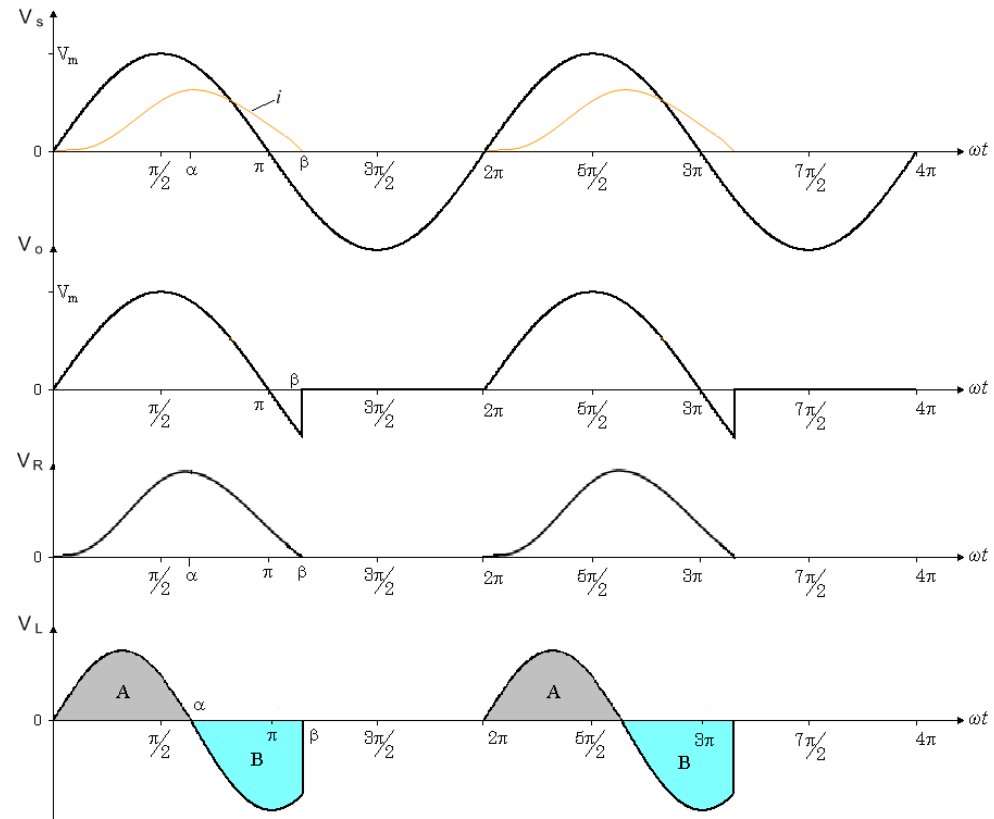
$$V_m \sin(\omega t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} i_f(t) = \left(\frac{V_m}{Z} \right) \sin(\omega t - \theta) \\ i_n(t) = A e^{-t/\tau} \end{array} \right.$$

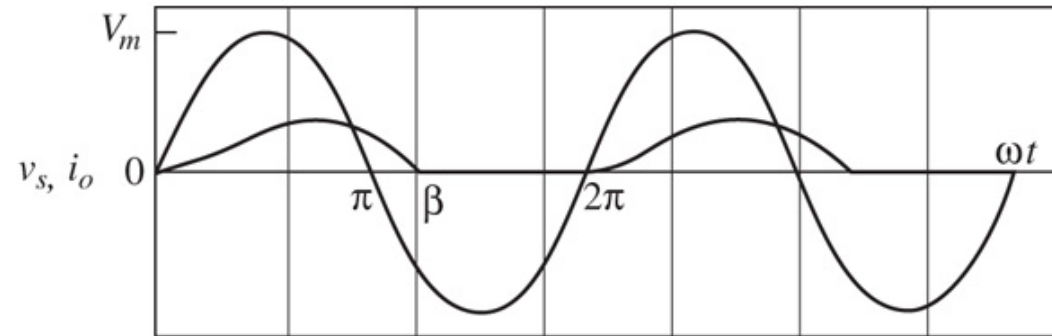
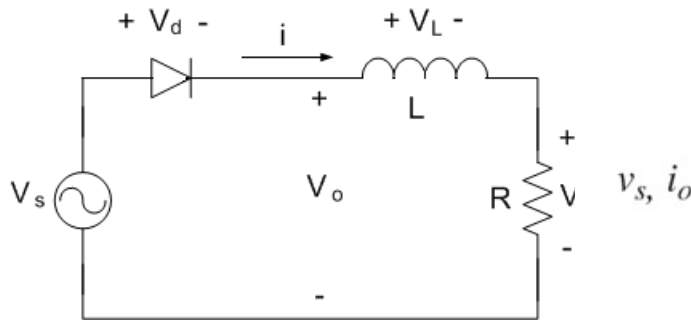
$$\text{όπου } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \text{ και } \tau = RC$$

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



Ανορθωτές μισού κύματος

- Μη-ελεγχόμενη ανορθωση, ωμικό-επαγωγικό φορτίο



$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) + \sin(\theta) e^{-\omega t / \omega \tau} \right]$$

$$\text{Γωνία σβέσης } \beta: \quad i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta) e^{-\beta / \omega \tau} \right] = 0$$

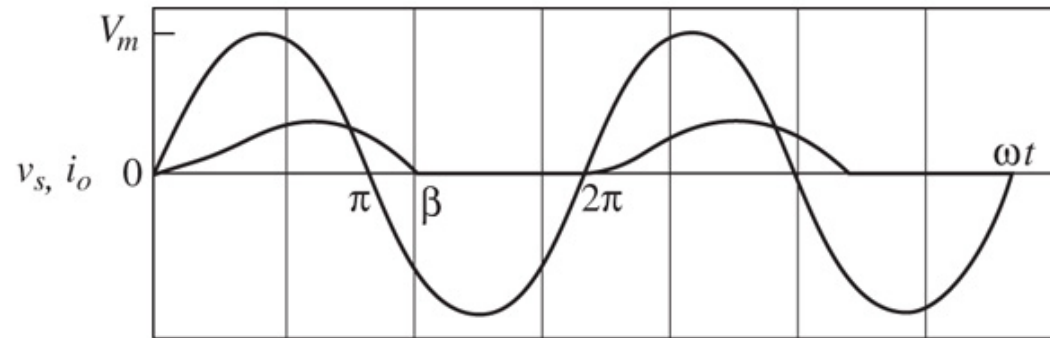
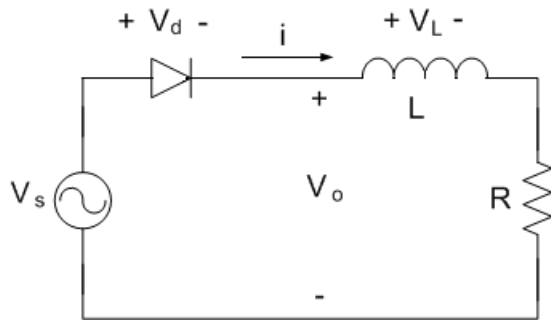
Απαιτείται επαναληπτική διαδικασία

$$i(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) + \sin(\theta) e^{-\omega t / \omega \tau} \right] & \text{για } 0 \leq \omega t \leq \beta \\ 0 & \text{για } \beta \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

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



Ανορθωτές μισού κύματος



- Αν η γωνία σβέσης είναι γνωστή, η μέση τιμή τάσης εξόδου:

$$V_{o,av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\beta} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos \beta) \quad i_{av} = \frac{V_{o,av}}{R} = \frac{V_m (1 - \cos \beta)}{2\pi R}$$

- Αντίστοιχα, η ενεργός τιμή τάσης εξόδου:

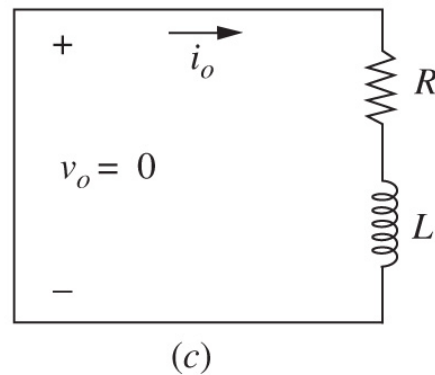
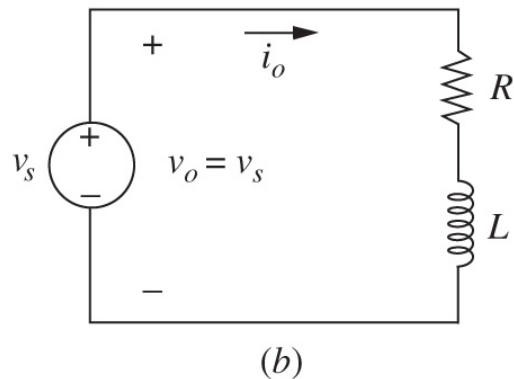
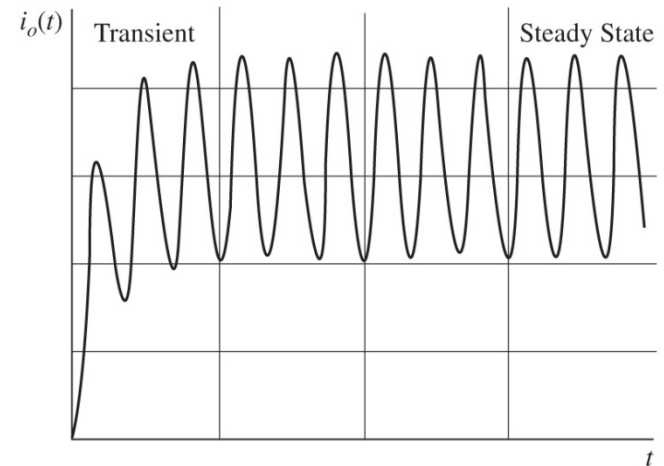
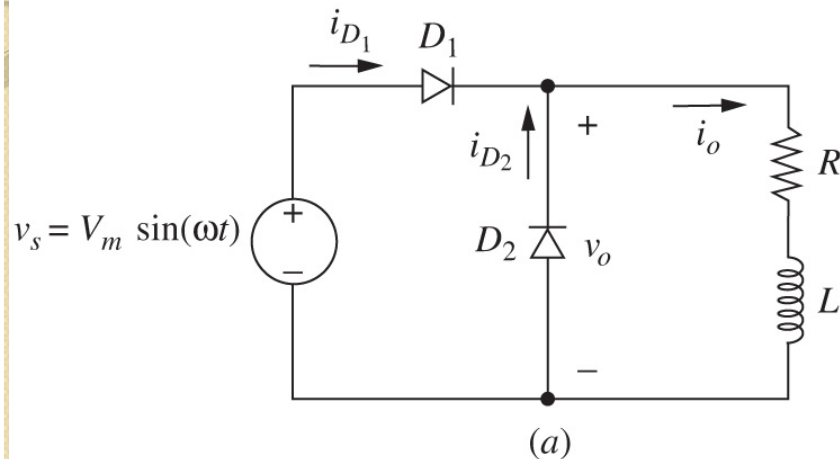
$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\beta} (V_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = V_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right)}$$

Προσοχή! Η τάση στα άκρα του φορτίου δεν είναι ημιτονοειδής, άρα ΔΕΝ μπορώ να βρω την $I_{o,rms}$ διαιρώντας με τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Χρειάζεται ανάλυση της τάσης φορτίου με σειρές Fourier, οπότε και οι αρμονικές θα είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις.



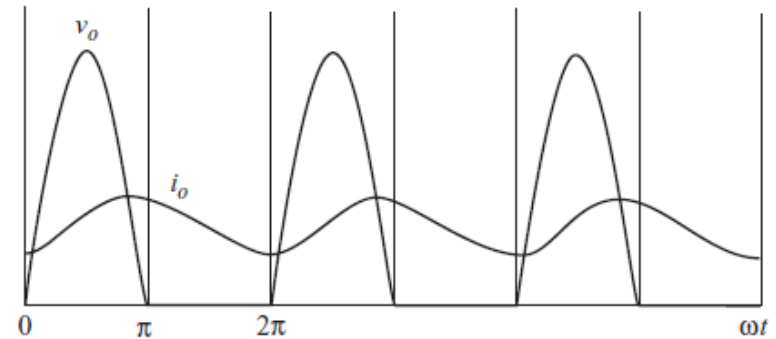
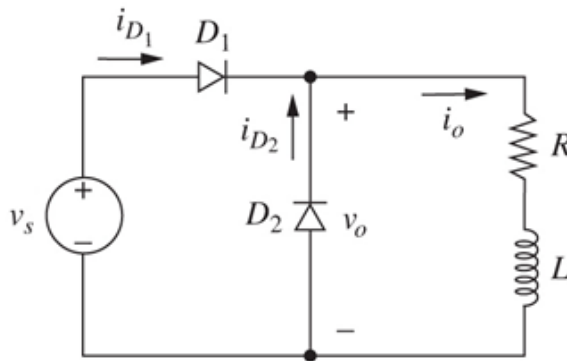
Ανορθωτές μισού κύματος

- Μη-ελεγχόμενη ανόρθωση, R-L φορτίο, με δίοδο ελευθέρας ροής



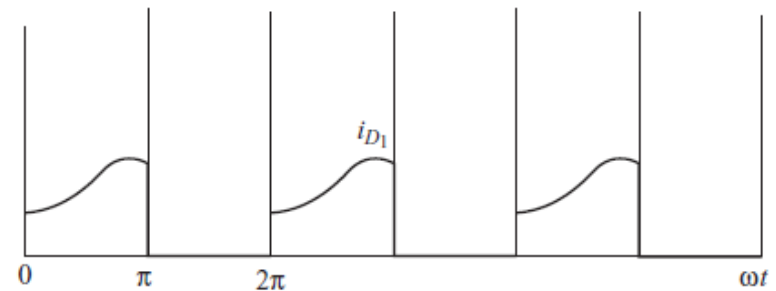
Ανορθωτές μισού κύματος

- Μη-ελεγχόμενη ανόρθωση, R-L φορτίο, με δίοδο ελευθέρας ροής



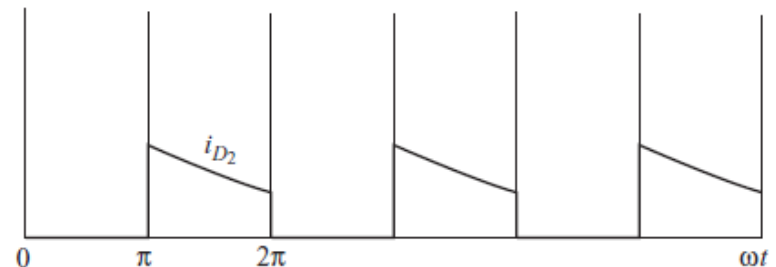
Ανάλυση Fourier τάσης εξόδου:

$$v(t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin(\omega_0 t) - \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2V_m}{(n^2 - 1)\pi} \cos(n\omega_0 t)$$



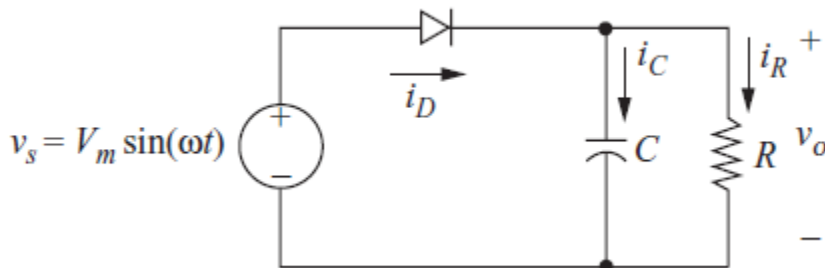
$$I_n = \frac{V_n}{Z_n}$$

όπου $Z_n = |R + jn\omega_0 L|$



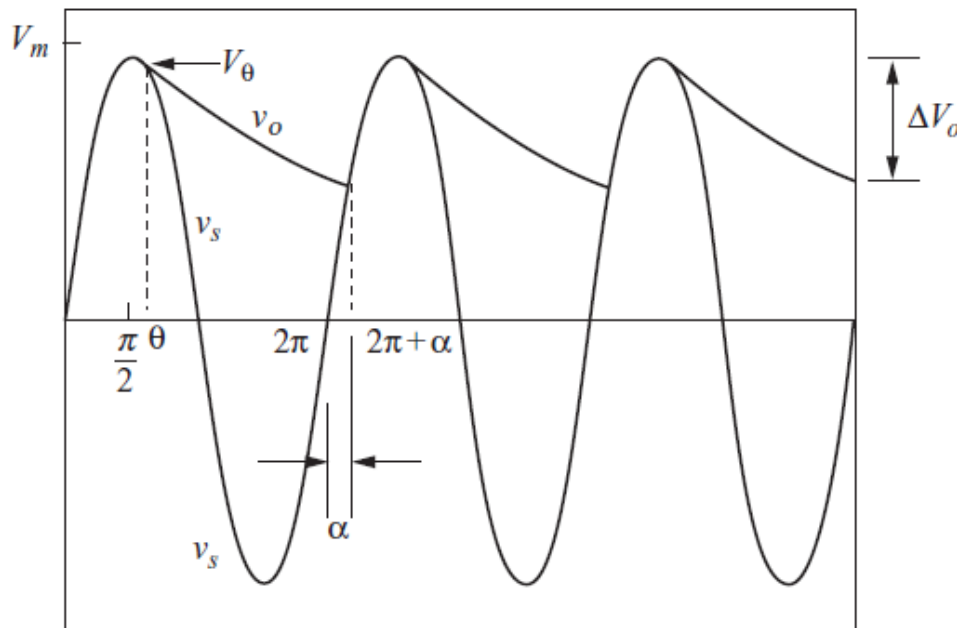
Ανορθωτές μισού κύματος

- Μη-ελεγχόμενη ανόρθωση, ωμικό φορτίο, με πυκνωτή εξομάλυνσης



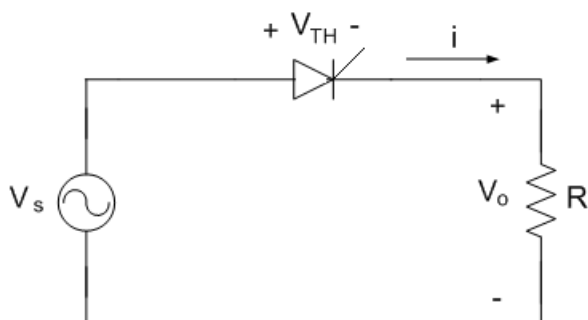
Για μικρή ΔV_o ,

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



Ανορθωτές μισού κύματος

- Ελεγχόμενη ανόρθωση, ωμικό φορτίο

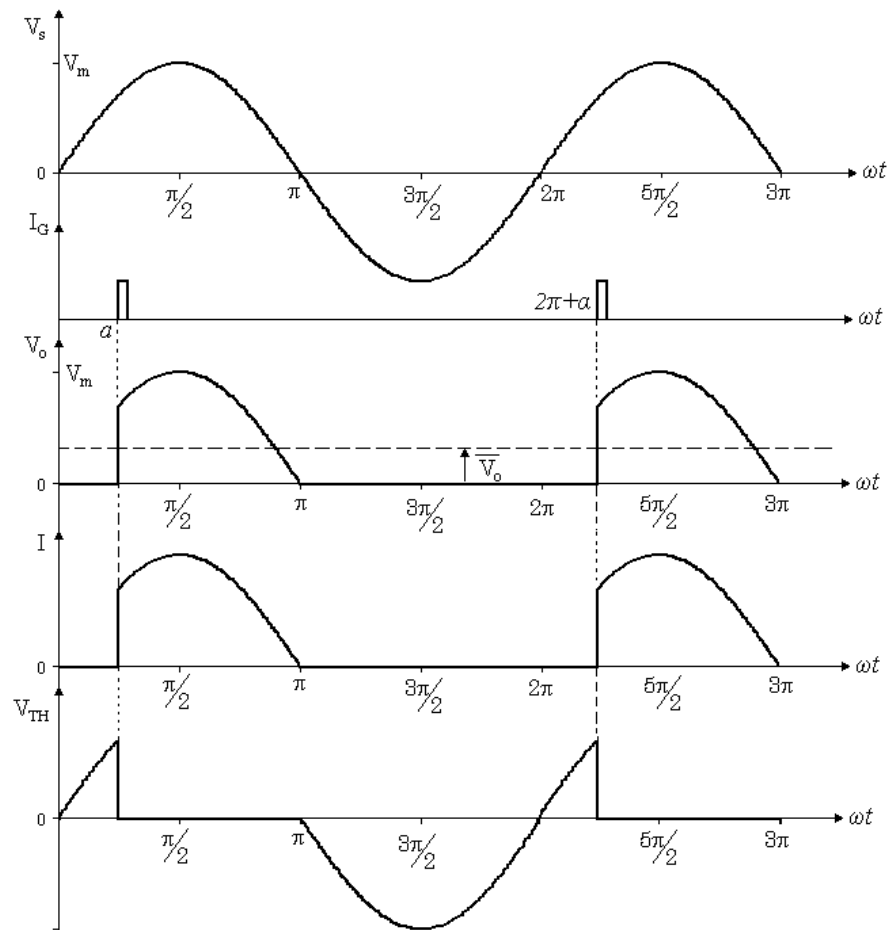


$$V_{o,av} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$i_{av} = \frac{V_{o,av}}{R} = \frac{V_m}{2\pi R} (1 + \cos \alpha)$$

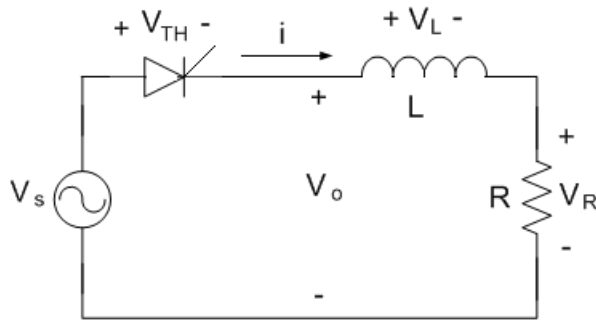
$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$i_{rms} = \frac{V_{o,rms}}{R} = \frac{V_m}{2R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$



Ανορθωτές μισού κύματος

- Ελεγχόμενη ανόρθωση, ωμικό-επαγωγικό φορτίο



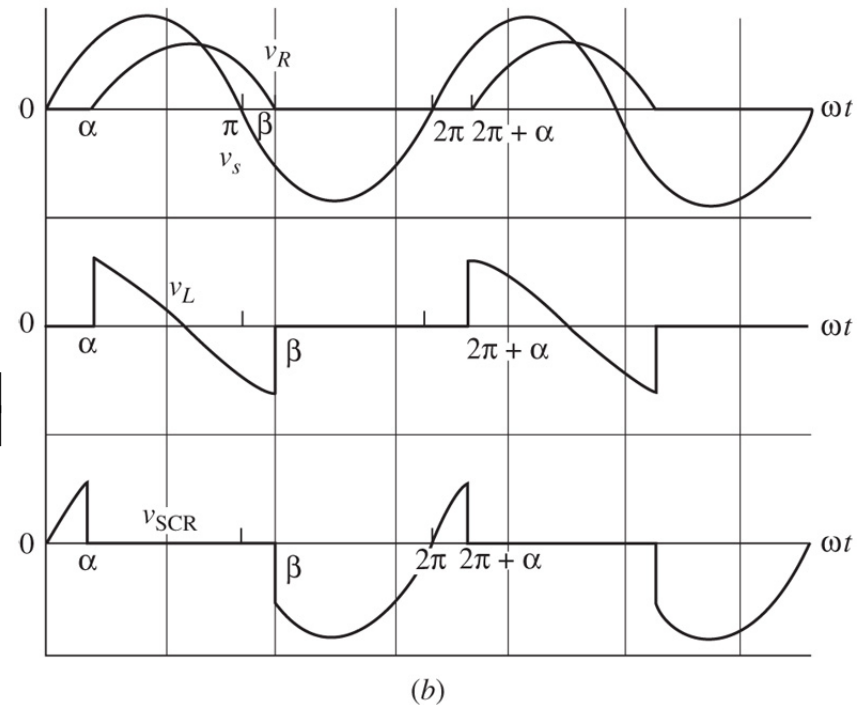
$$i(\omega t) = \left(\frac{V_m}{Z} \right) \left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(\alpha - \omega t)/\omega \tau} \right]$$

$$\text{για } \alpha \leq \omega t \leq \beta$$

$$V_{o,av} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

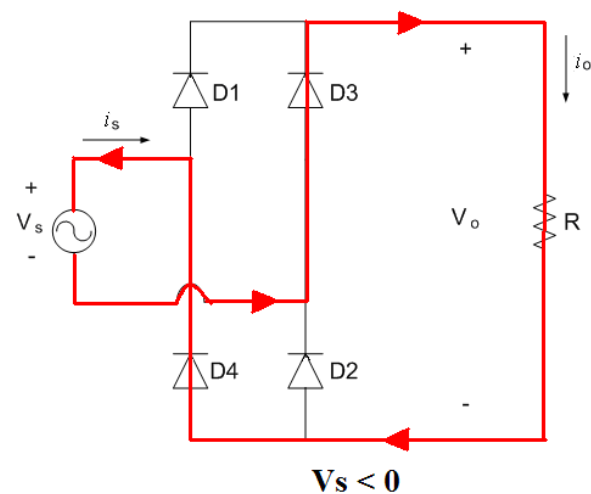
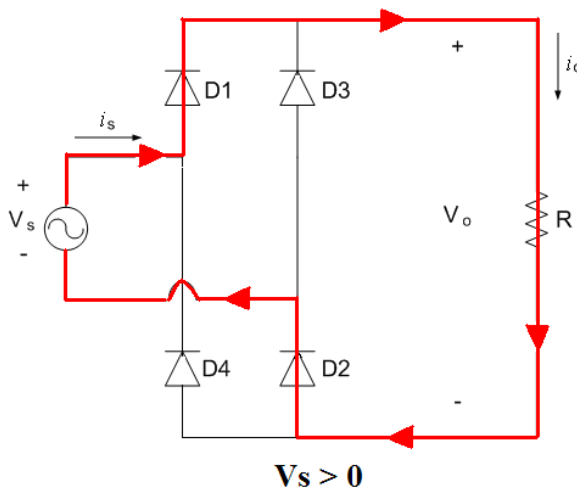
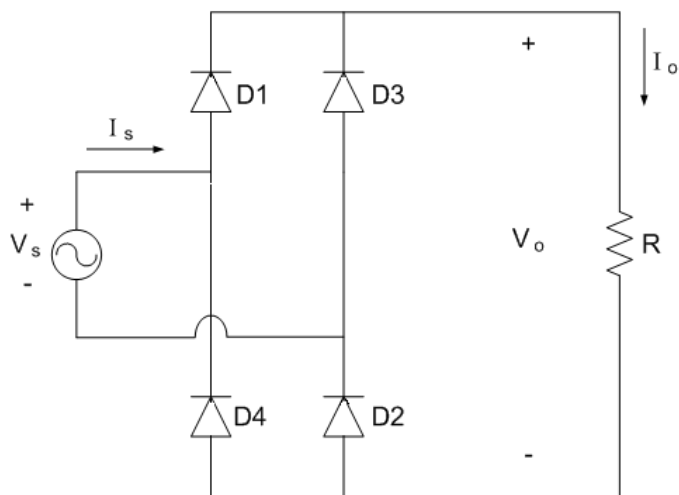
$$i_{o,av} = \frac{V_{o,av}}{R} = \frac{V_m}{2\pi R} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha) \right)}$$



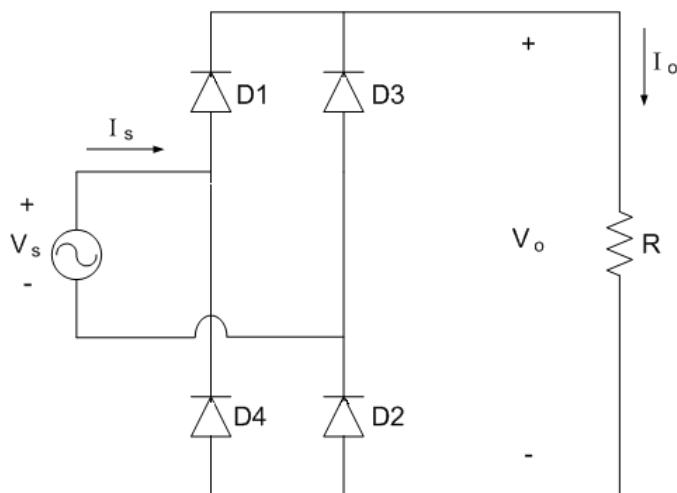
Ανορθωτές πλήρους κύματος

- Μη-ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας, ωμικό φορτίο



Ανορθωτές πλήρους κύματος

- Μη-ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας, ωμικό φορτίο

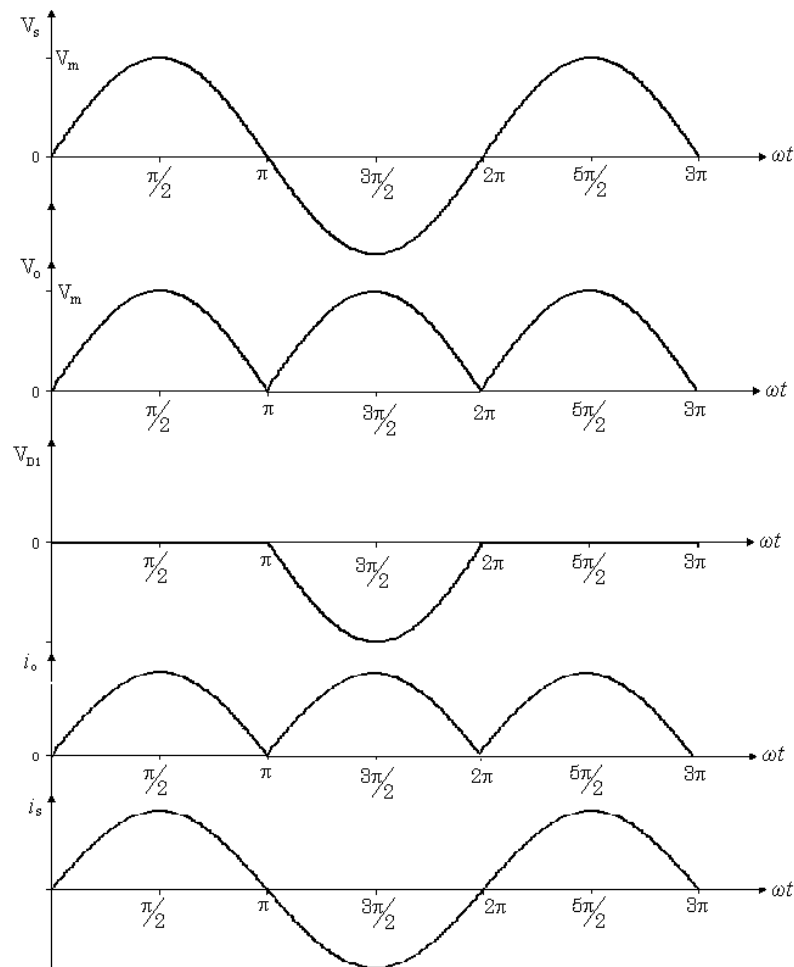


$$V_{o,av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi}$$

$$= \frac{V_m}{\pi} [-\cos \pi + \cos 0] = \frac{2V_m}{\pi}$$

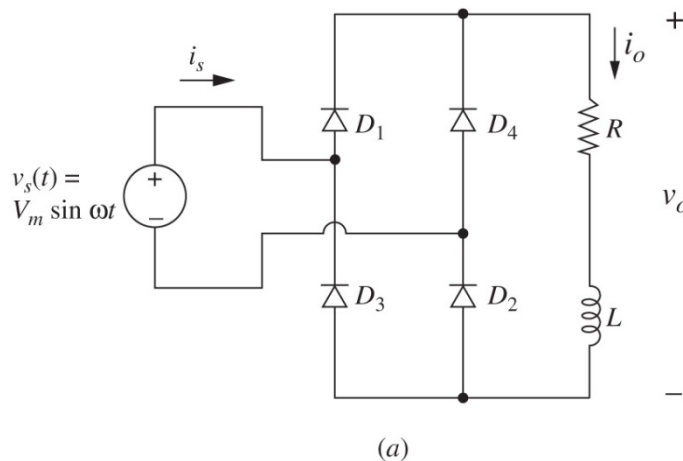
$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [V_m \sin \omega t]^2 \cdot d\omega t}$$

$$= \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \int_0^{\pi} \left[\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right] \cdot d\omega t} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$



Ανορθωτές πλήρους κύματος

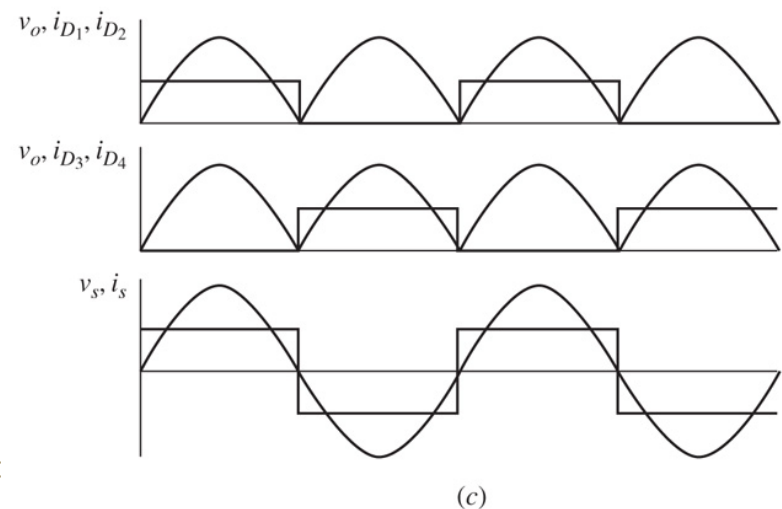
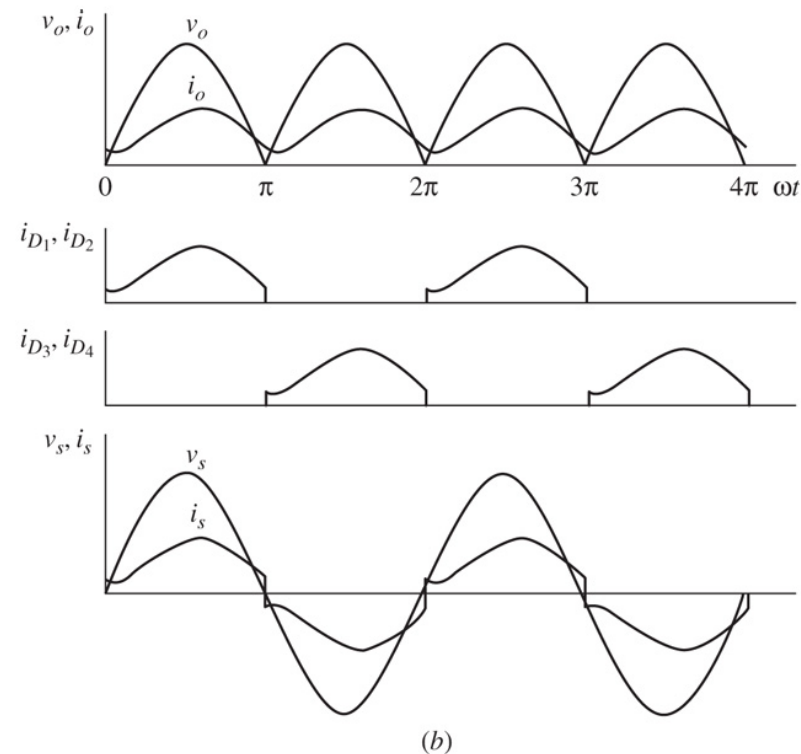
- Μη-ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας, ωμικό-επαγωγικό φορτίο



$$v_o(t) = V_o + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \pi)$$

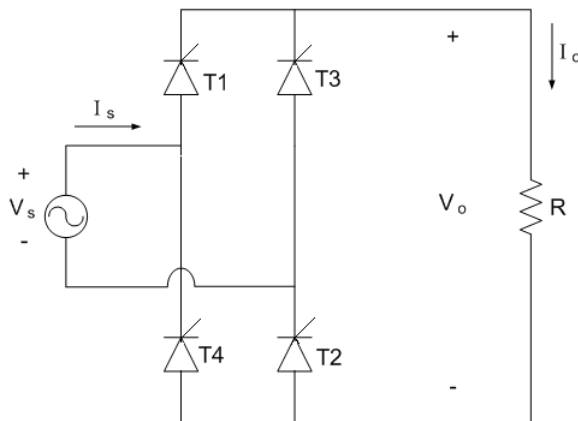
$$\text{where } V_o = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$\text{and } V_n = \frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1} \right)$$



Ανορθωτές πλήρους κύματος

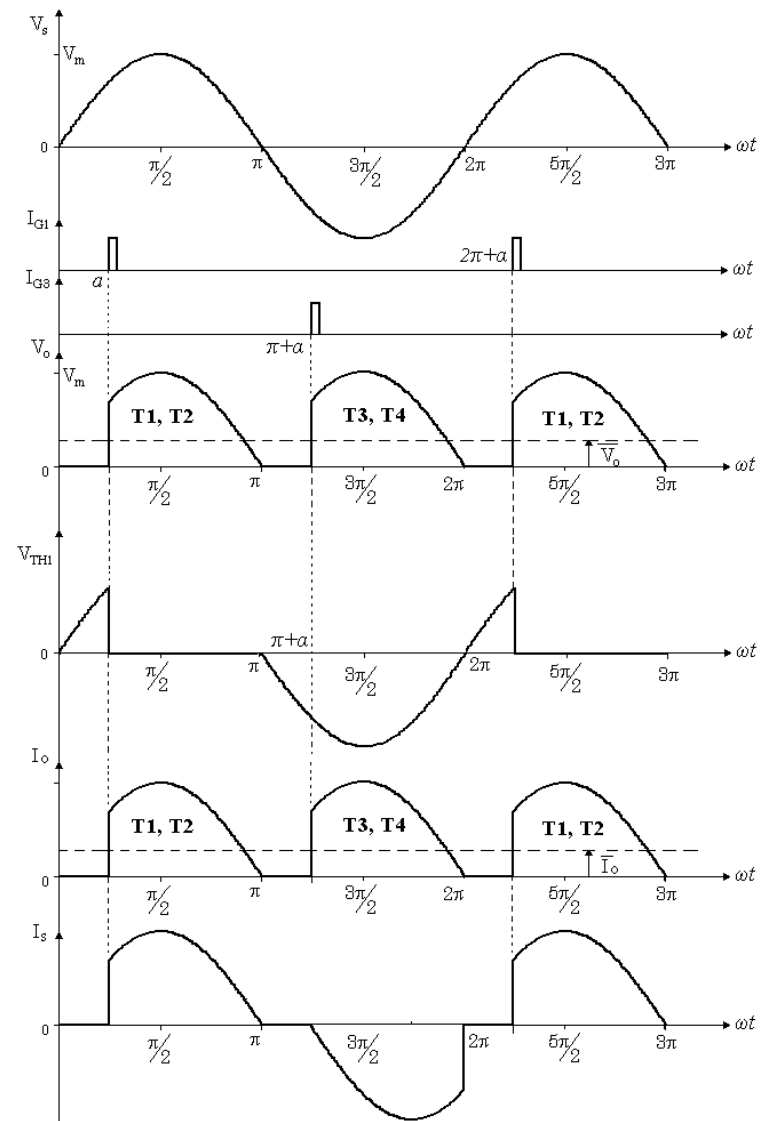
- Ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας, ωμικό φορτίο



$$V_{o,av} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

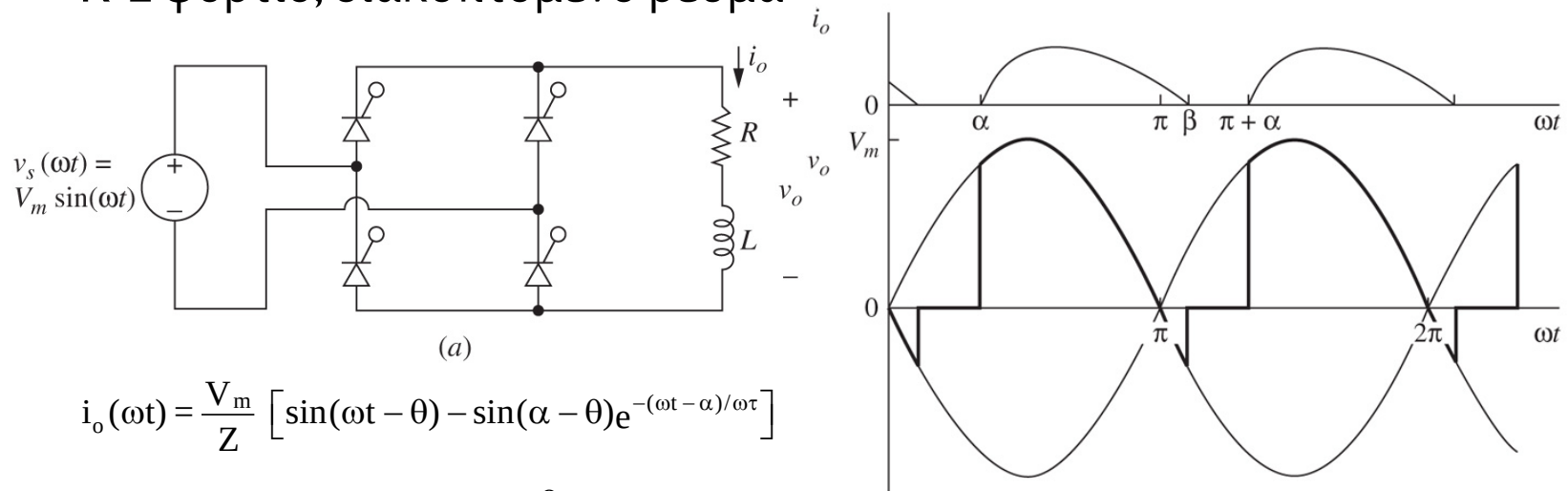
$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi}}$$

$$I_{o,rms} = \frac{V_{o,rms}}{R} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi}}$$



Ανορθωτές πλήρους κύματος

- Ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας,
R-L φορτίο, διακοπτόμενο ρεύμα



$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-(\omega t - \alpha)/\omega\tau} \right]$$

$$\text{για } \alpha \leq \omega t \leq \beta$$

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

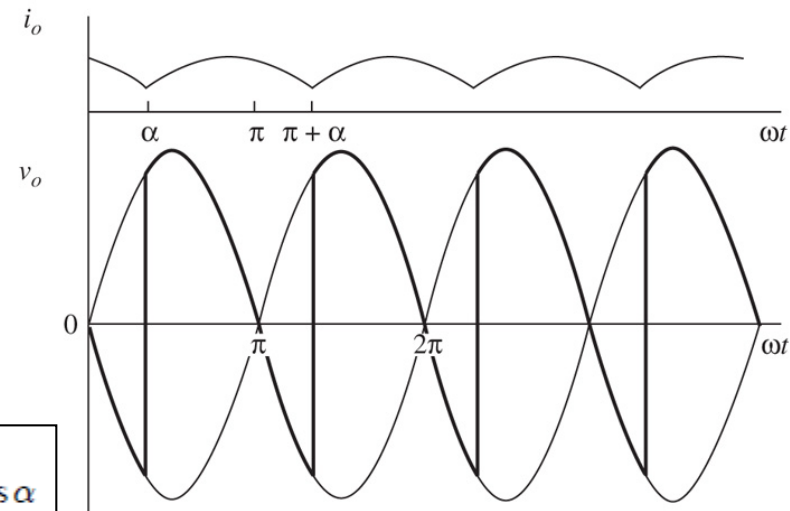
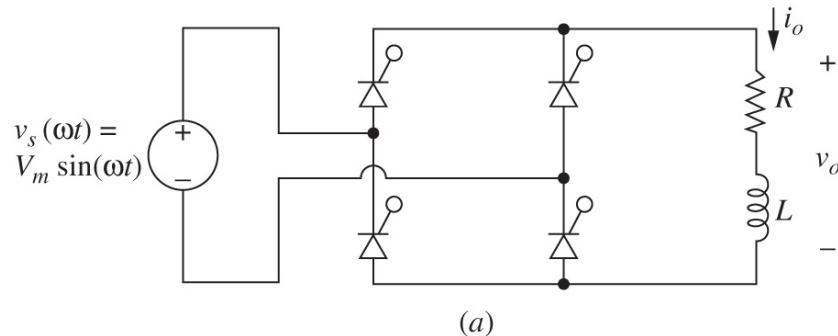
$$V_{o,av} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\beta} = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = V_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\beta - \alpha - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha) \right)}$$



Ανορθωτές πλήρους κύματος

- Ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας,
R-L φορτίο, συνεχόμενο ρεύμα



$$V_{o,av} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

Συνεχόμενο ρεύμα όταν:

$$\alpha \leq \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

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

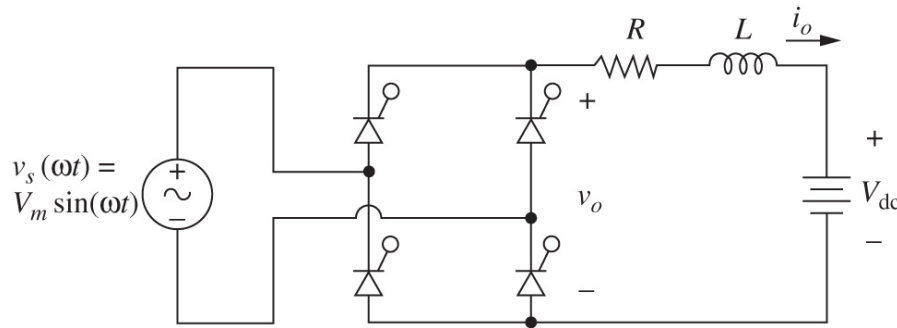
$$b_n = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

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



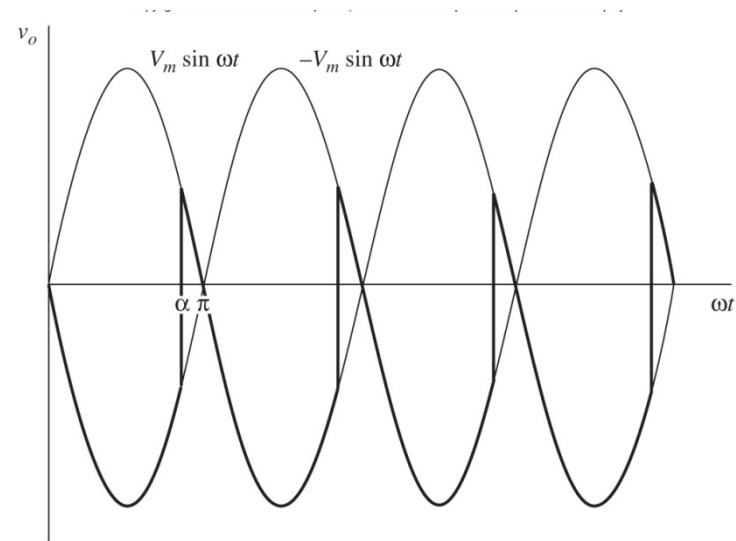
Ανορθωτές πλήρους κύματος

- Ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας, R-L φορτίο, και πηγή ισχύος



$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

$$P_{dc} = I_o V_{dc}$$



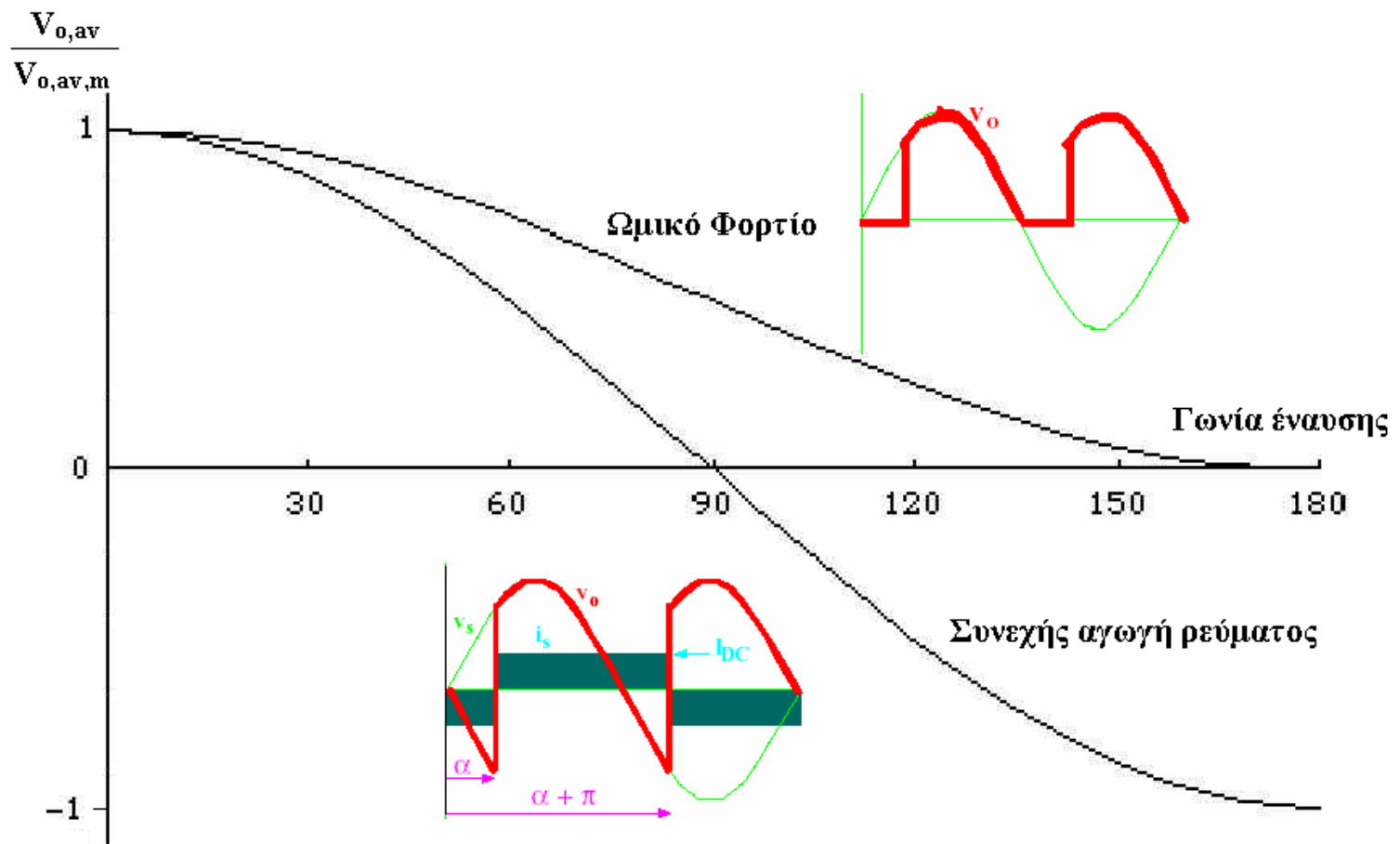
$0 < \alpha < 90^\circ \rightarrow V_o > 0$, rectifier operation

$90^\circ < \alpha < 180^\circ \rightarrow V_o < 0$, inverter operation

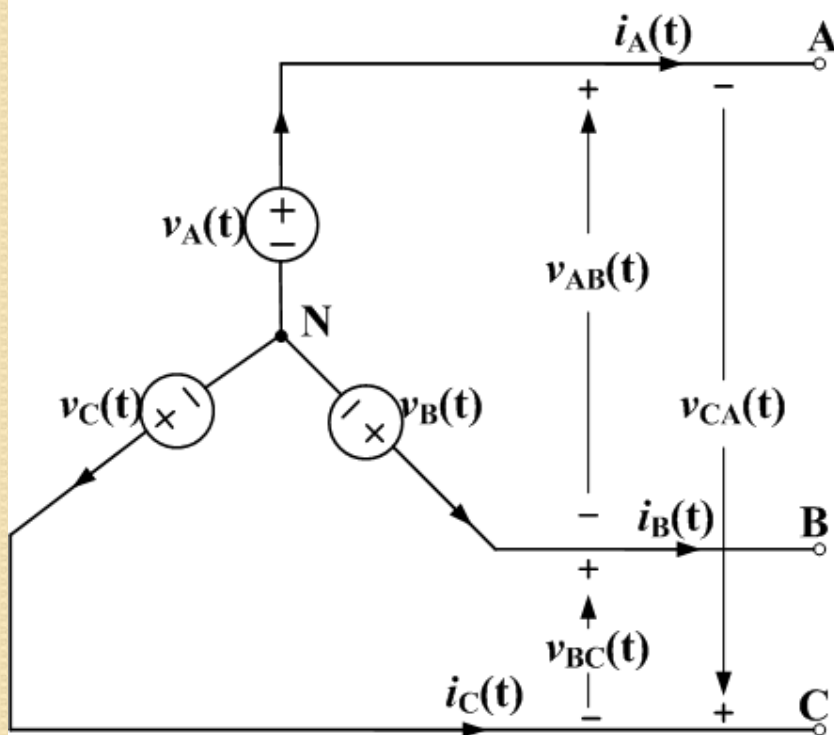


Ανορθωτές πλήρους κύματος

- Ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση γέφυρας,



Τριφασικά Κυκλώματα



☞ $v_i(t)$: Φασικές τάσεις, $i = A, B, C$.

☞ $v_{AB}(t)$, $v_{BC}(t)$, $v_{CA}(t)$: Πολικές τάσεις ή τάσεις γραμμής.

☞ A, B, C : Τα άκρα σύνδεσης της τριφασικής πηγής με το εξωτερικό κύκλωμα.

☞ N : Κοινό σημείο σύνδεσης των τριών μονοφασικών πηγών. Ονομάζεται ουδέτερος κόμβος.

Τριφασικά Κυκλώματα

➤ *Φασικές τάσεις στο πεδίο του χρόνου:*

$$v_A(t) = V_0 \cos(\omega t)$$

$$v_B(t) = V_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = V_0 \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_C(t) = V_0 \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = V_0 \cos(\omega t - 240^\circ)$$

➤ *Φασικές τάσεις στο πεδίο του χρόνου:*

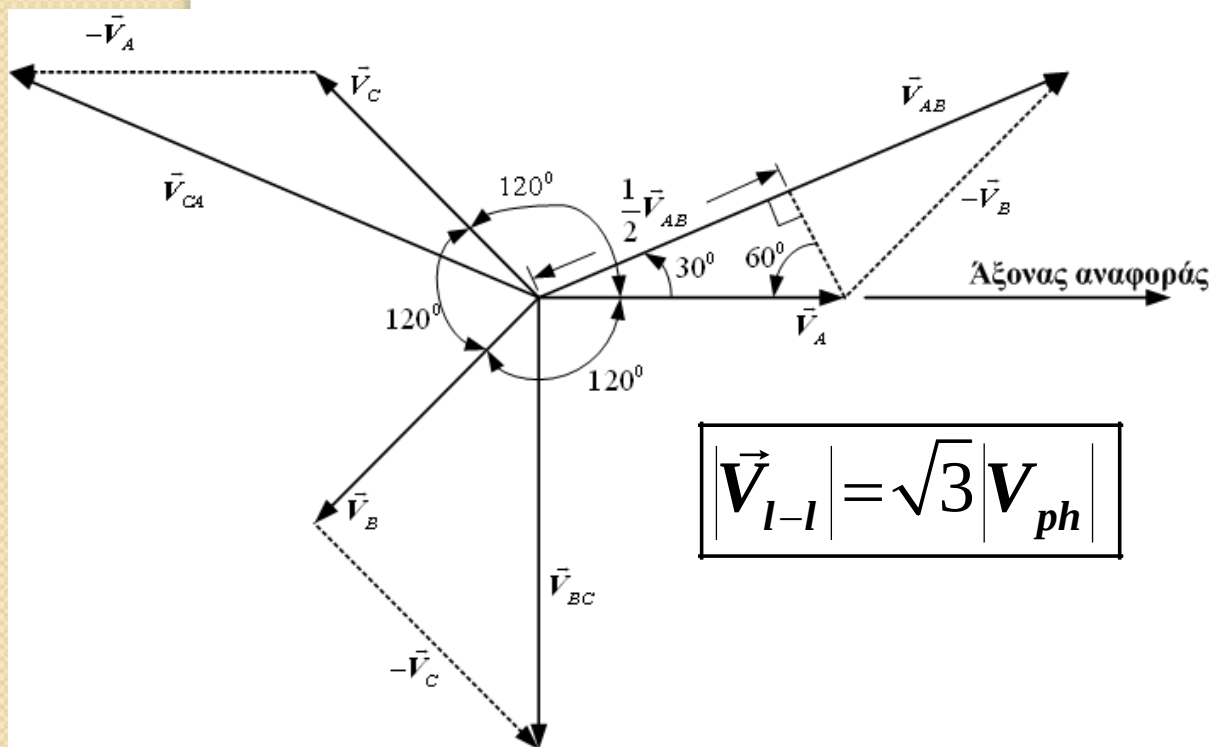
$$\vec{V}_A = V_0 \angle 0^\circ = \sqrt{2} V \angle 0^\circ$$

$$\vec{V}_B = V_0 \angle -\frac{2\pi}{3} = V_0 \angle -120^\circ = \sqrt{2} V \angle -120^\circ$$

$$\vec{V}_C = V_0 \angle -\frac{4\pi}{3} = V_0 \angle -240^\circ = \sqrt{2} \angle -240^\circ$$

Τριφασικά Κυκλώματα

- ☞ Στη συνδεσμολογία αστέρα (Υ), τα διανύσματα των πολικών τάσεων προπορεύονται από τα αντίστοιχα φασικά διανύσματα κατά 30° . Επομένως, οι πολικές τάσεις στο πεδίο της συχνότητας είναι:



$$\vec{V}_{AB} = \vec{V}_A + (-\vec{V}_B)$$

$$\boxed{\vec{V}_{AB} = \sqrt{3}V_{ph} \angle 30^\circ}$$

$$\vec{V}_{BC} = \vec{V}_B + (-\vec{V}_C)$$

$$\boxed{\vec{V}_{BC} = \sqrt{3}V_{ph} \angle -90^\circ}$$

$$\vec{V}_{CA} = \vec{V}_C + (-\vec{V}_A)$$

$$\boxed{\vec{V}_{CA} = \sqrt{3}V_{ph} \angle -210^\circ}$$

Τριφασικά Κυκλώματα

☞ Λόγω της συμμετρίας των φασικών και πολικών διανυσμάτων των ρευμάτων και των τάσεων στο πεδίο της συχνότητας των τριφασικών πηγών, ισχύει:

$$\vec{V}_A + \vec{V}_B + \vec{V}_C = 0$$

$$\vec{V}_{AB} + \vec{V}_{BC} + \vec{V}_{CA} = 0$$

$$\vec{I}_{BA} + \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{AC} = 0$$

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$$

Τριφασικό Σύστημα

η στιγμιαία τριφασική ισχύς είναι:

$$p(t) = V I [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos \varphi] + V I [\cos(2\omega t - \varphi - 240^\circ) + \cos \varphi] + V I [\cos(2\omega t - \varphi - 120^\circ) + \cos \varphi] = 3V I \cos \varphi + 0$$

$$\boxed{p(t) = P = 3V I \cos \varphi} \text{ (W)}$$

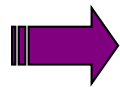
□ *Αντίστοιχα, τα μέτρα της άεργης και της φαινόμενης ισχύος στο τριφασικό σύστημα είναι:*

$$\Rightarrow \boxed{Q = 3V I \sin \varphi} \text{ (VAR)}$$

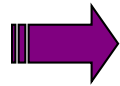
$$\Rightarrow \boxed{|\vec{S}| = S = 3V I} \text{ (VA)}$$

Ισχύς σε Τριφασικό Σύστημα

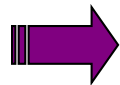
□ Οι ισχείς εκφρασμένες σε μεγέθη γραμμής είναι:



$$P = \sqrt{3} V_{l-l} I_l \cos \varphi$$



$$Q = \sqrt{3} V_{l-l} I_l \sin \varphi$$



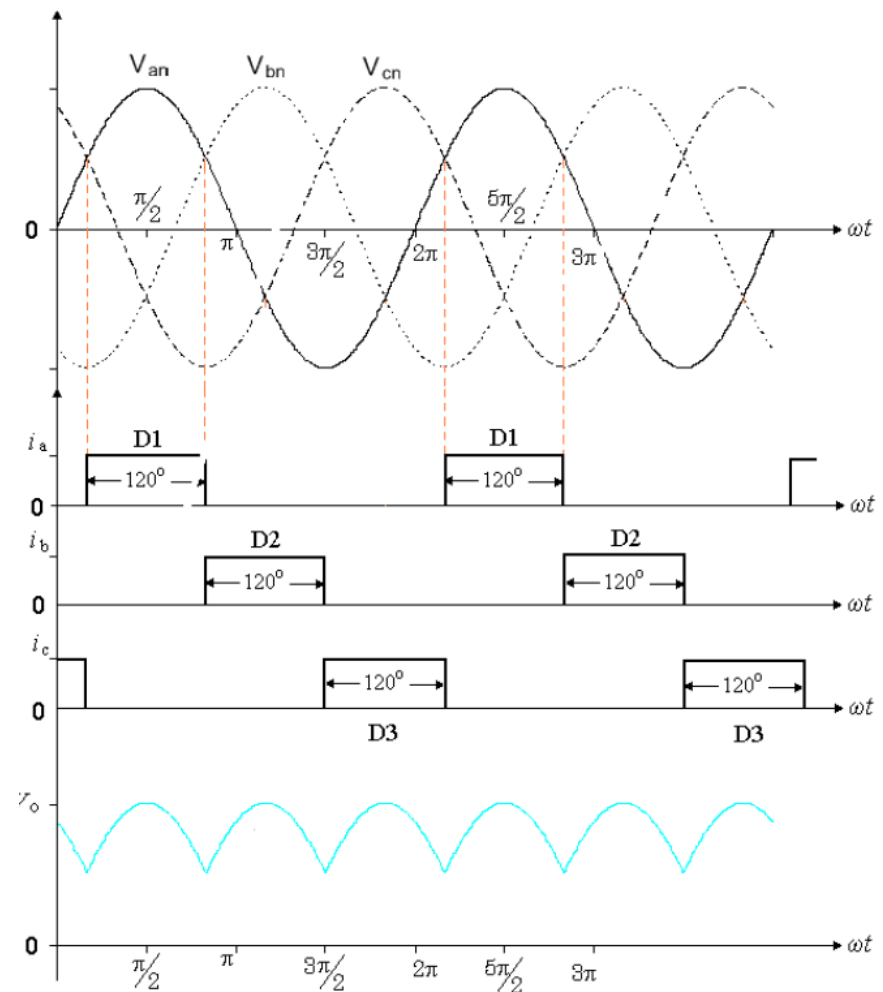
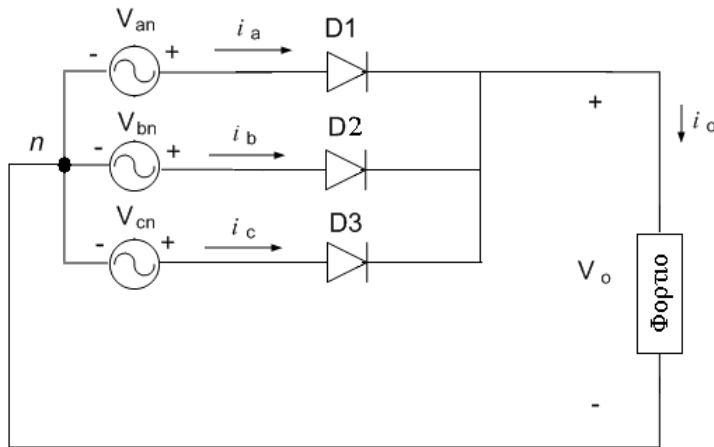
$$|\vec{S}| = S = \sqrt{3} V_{l-l} I_l$$

✓ Για συνδεσμολογία Υ είναι:

$$V_{ph} = \frac{V_{l-l}}{\sqrt{3}}, \quad I_{ph} = I_l$$

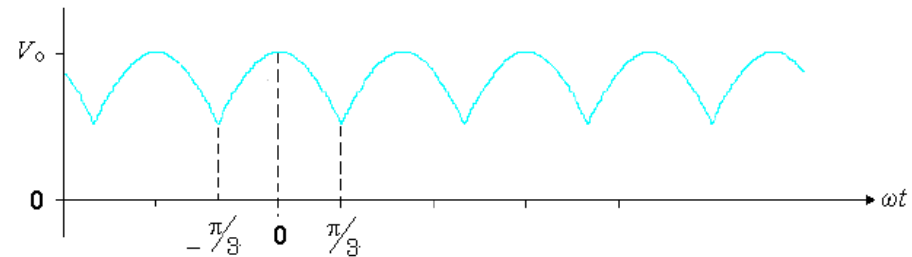
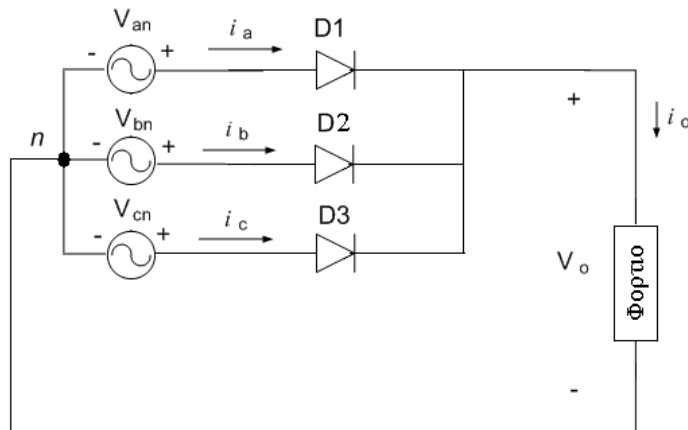
Τριφασικοί Ανορθωτές

- Μη-Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση κοινού σημείου



Τριφασικοί Ανορθωτές

- Μη-Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση κοινού σημείου



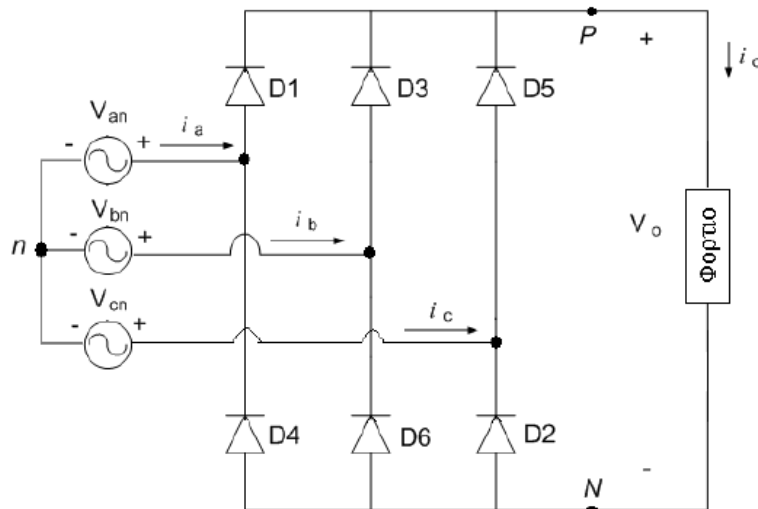
$$V_{o,av} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} V_m \cos \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{2\pi/3} [\sin \omega t]_{-\pi/3}^{\pi/3} = \frac{V_m}{2\pi/3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = 0.863 V_m$$

$$\begin{aligned} V_{o,rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} (V_m \cos \omega t)^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} (V_m^2 \cos^2 \omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{3V_m^2}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} (\cos^2 \omega t) d\omega t} = \\ &= \sqrt{\frac{3V_m^2}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{3V_m^2}{4\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} (1 + \cos 2\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{3V_m^2}{4\pi} \left[\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3} \right) + \left[\frac{1}{2} \sin 2\omega t \right]_{-\pi/3}^{\pi/3} \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{3V_m^2}{4\pi} \left[\frac{2\pi}{3} + \frac{2\sqrt{3}}{4} \right]} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}} = 0.84 V_m \end{aligned}$$

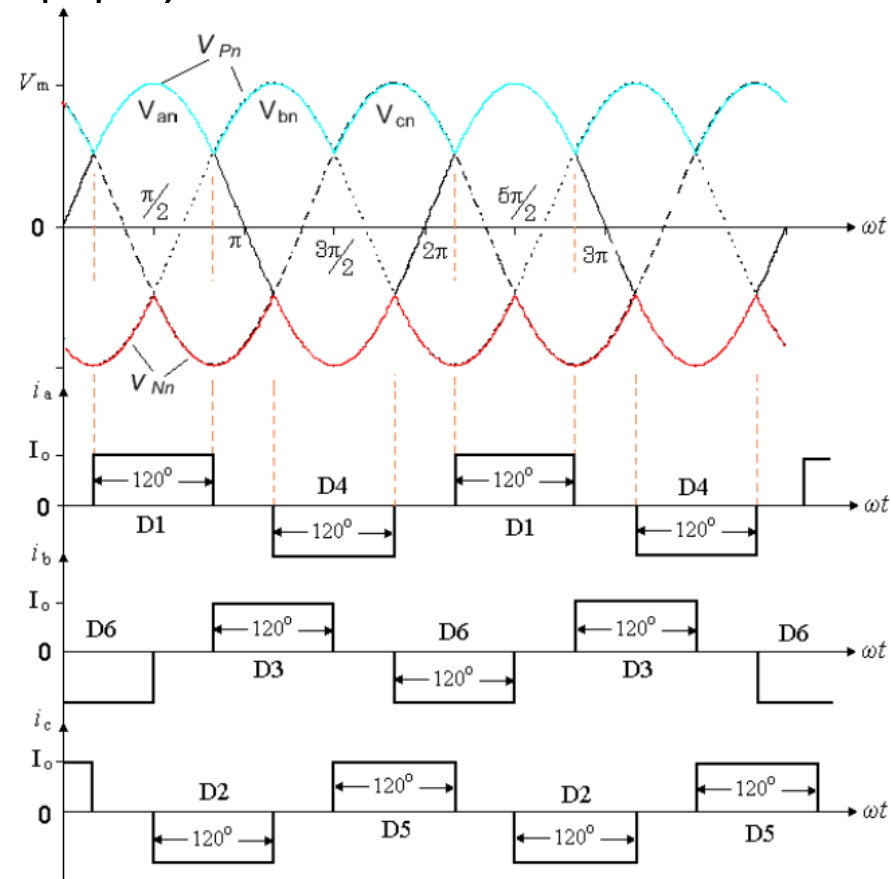


Τριφασικοί Ανορθωτές

- Μη-Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση γέφυρας

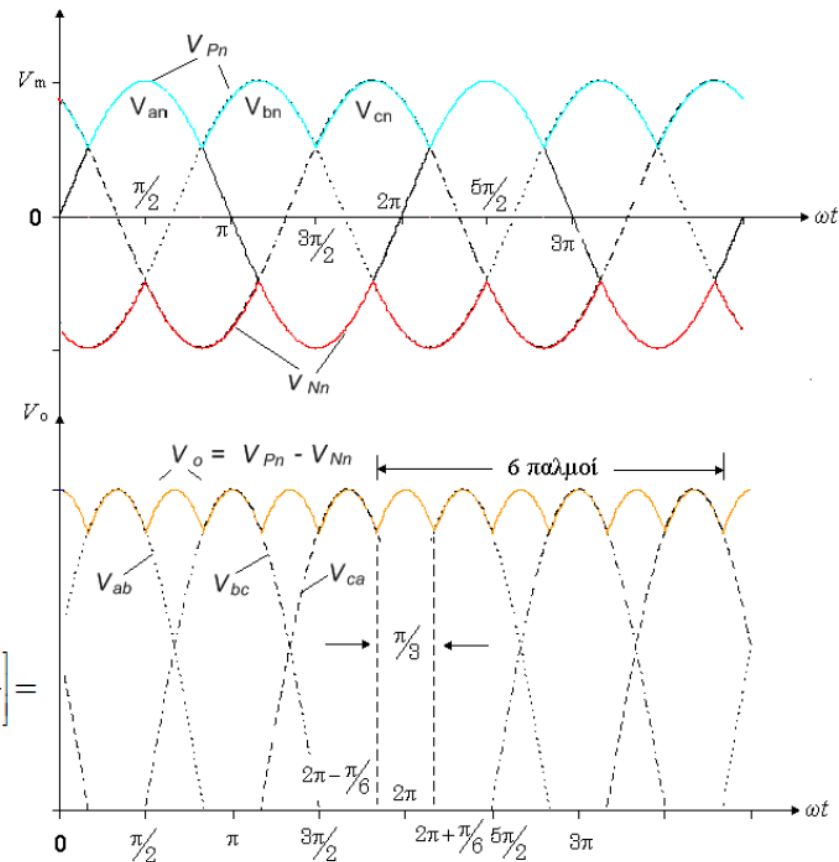
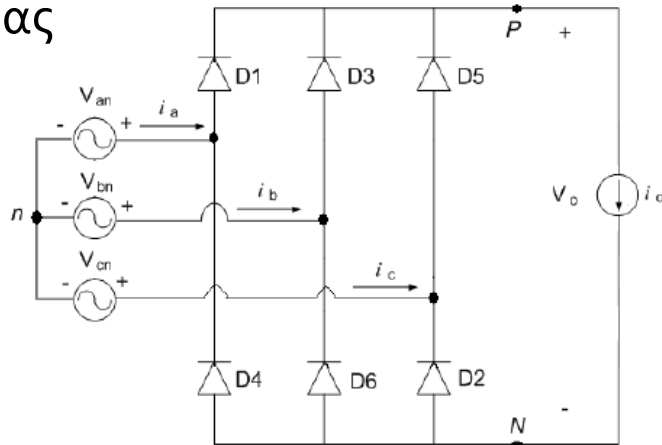


$$V_o = V_{Pn} - V_{Nn}$$



Τριφασικοί Ανορθωτές

Μη-Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση
γέφυρας



$$V_{o,av} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL} \cos \omega t \cdot d\omega t = \frac{\sqrt{2}V_{LL}}{\pi/3} [\sin \omega t]_{-\pi/6}^{\pi/6} = \frac{\sqrt{2}V_{LL}}{\pi/3} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] =$$

$$= \frac{3\sqrt{2}V_{LL}}{\pi} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}V_m}{\pi\sqrt{2}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.35V_{LL} = 1.654 V_m$$

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (\sqrt{2}V_{LL} \cos \omega t)^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (2V_{LL}^2 \cos^2 \omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{6V_{LL}^2}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (\cos^2 \omega t) d\omega t} =$$

$$= \sqrt{\frac{6V_{LL}^2}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{3V_{LL}^2}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (1 + \cos 2\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{3V_{LL}^2}{\pi} \left[\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6} + \left[\frac{1}{2} \sin 2\omega t \right]_{-\pi/6}^{\pi/6} \right]} =$$

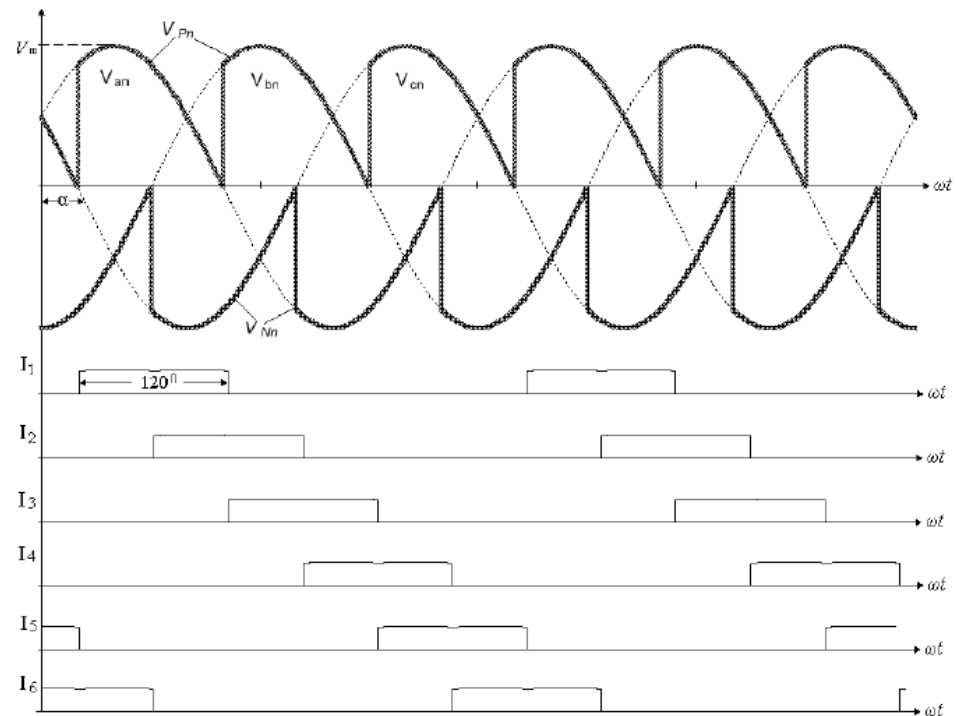
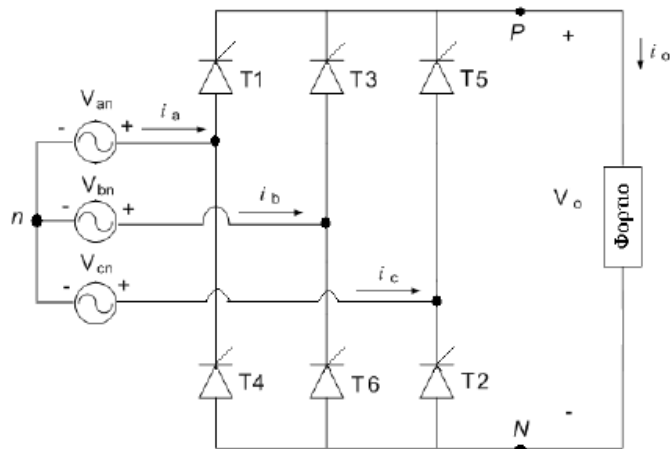
$$= \sqrt{\frac{3V_{LL}^2}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{2\sqrt{3}}{4} \right]} = V_{LL} \sqrt{1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} = V_m \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} = 1.3516 V_{LL} = 1.655 V_m$$

$$V_n = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi(n^2 - 1)} \quad n = 6, 12, 18, \dots$$



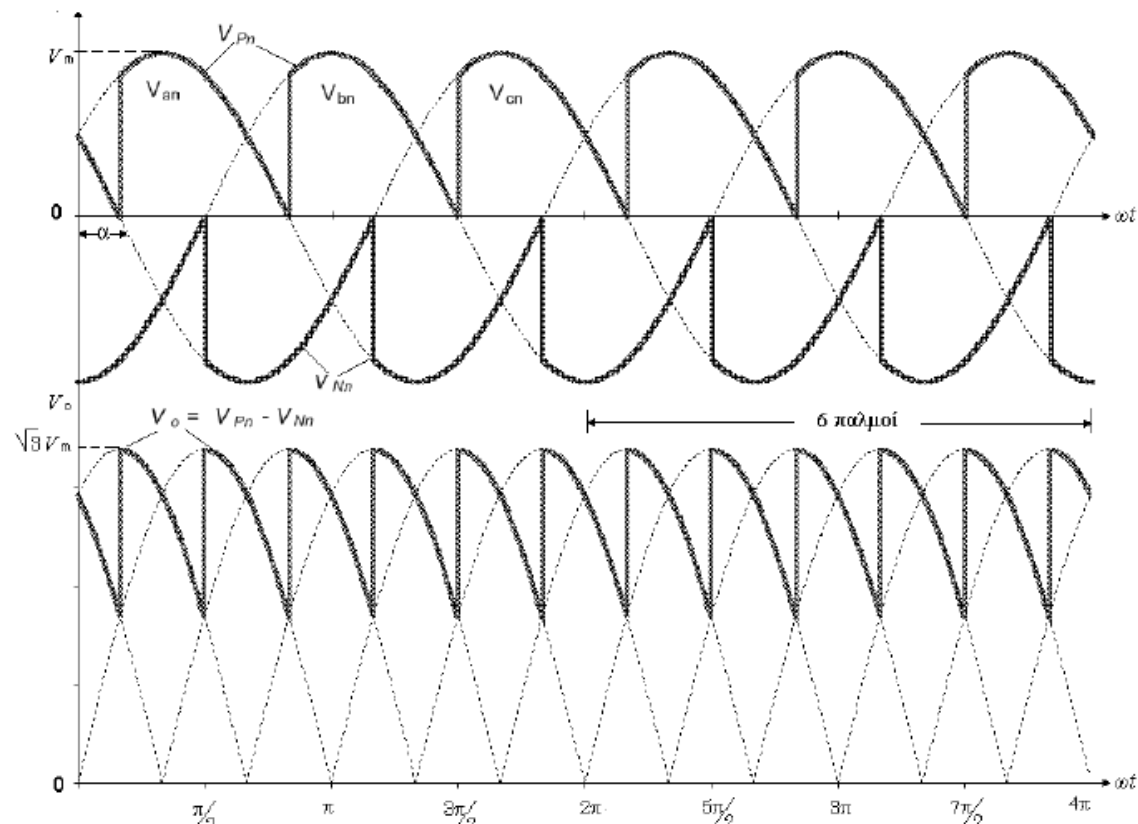
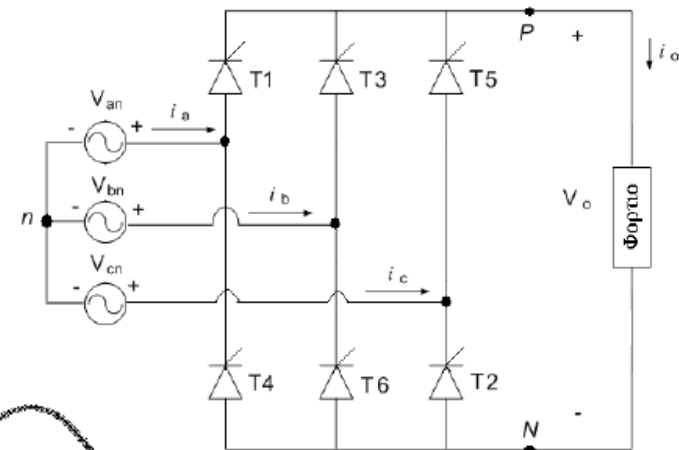
Τριφασικοί Ανορθωτές

- Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση γέφυρας

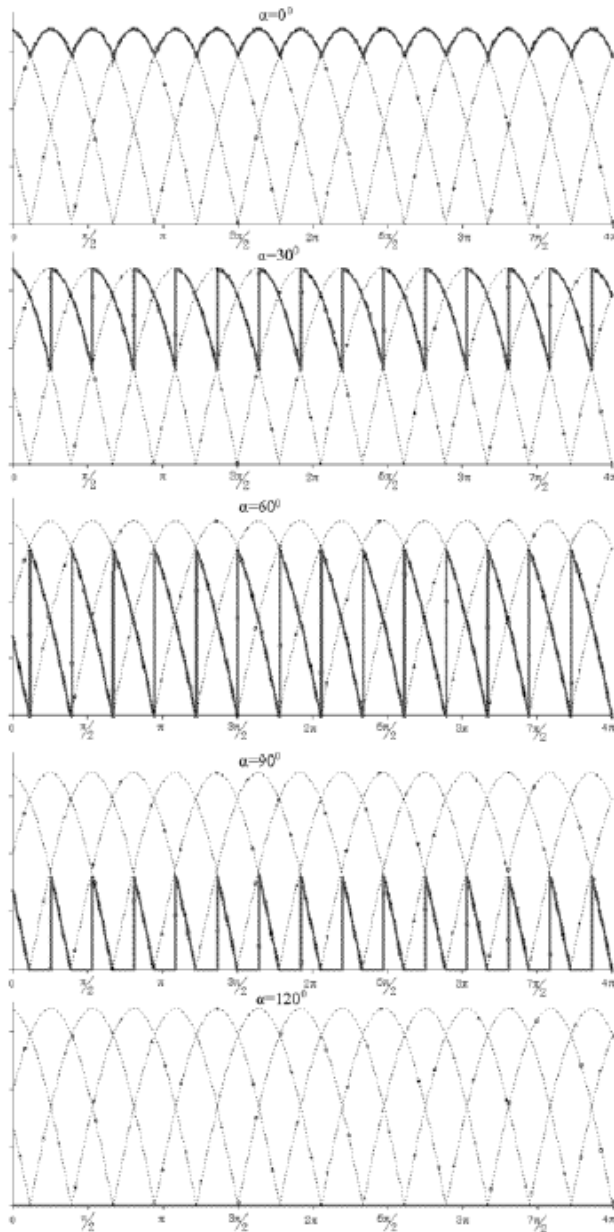


Τριφασικοί Ανορθωτές

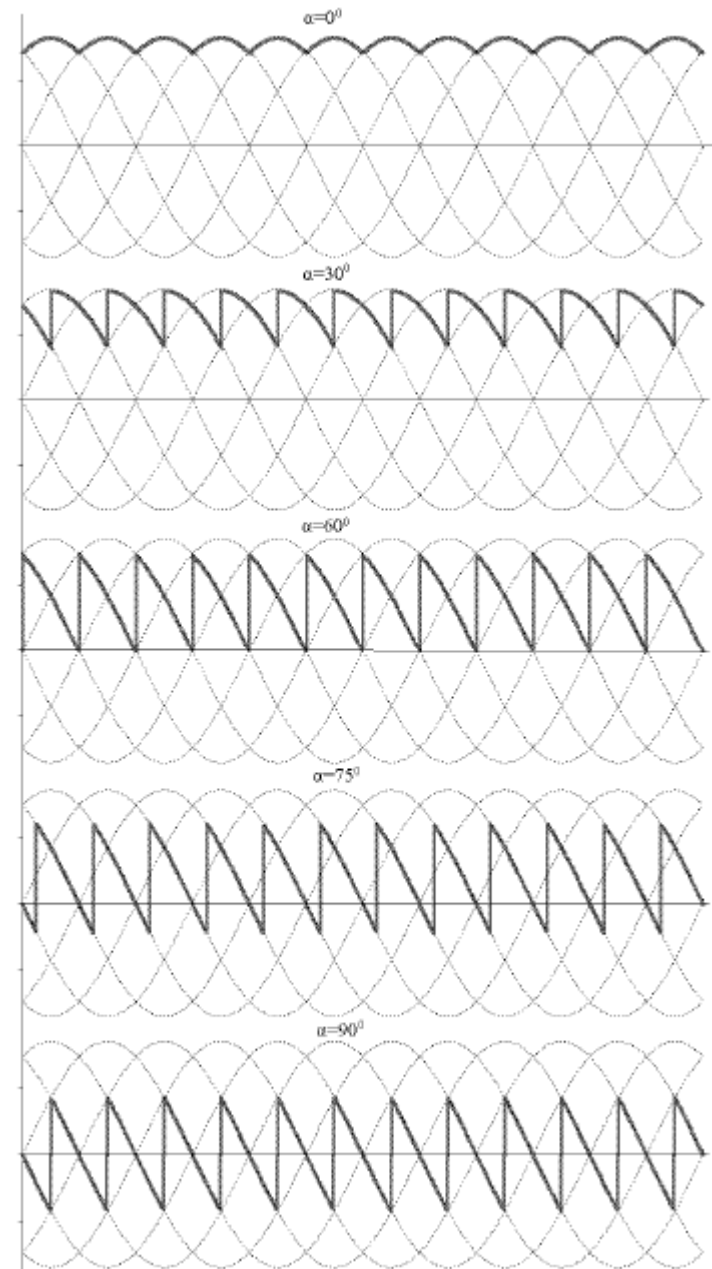
- Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση γέφυρας



Τριφασικοί Ανορθωτές



Ωμικό
φορτίο

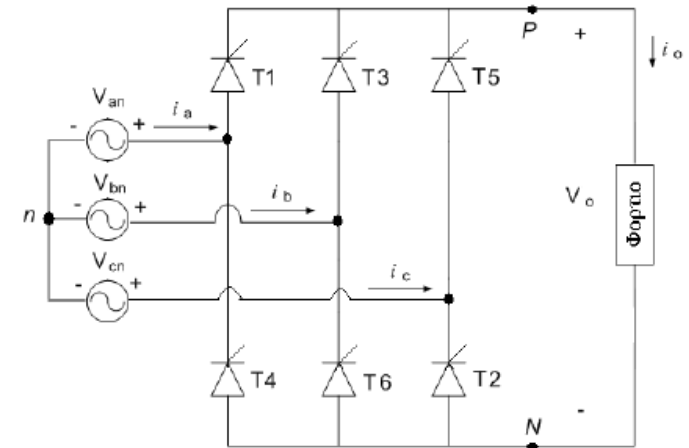


R-L
φορτίο



Τριφασικοί Ανορθωτές

- Ελεγχόμενη 3φ ανόρθωση γέφυρας



$$V_{o,av} = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \sqrt{3}V_m \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha$$

$$\begin{aligned} V_{o,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} (\sqrt{3}V_m \cos \omega t)^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} (3V_m^2 \cos^2 \omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{9V_m^2}{\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} (\cos^2 \omega t) d\omega t} = \\ &= \sqrt{\frac{9V_m^2}{\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{9V_m^2}{2\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} (1 + \cos 2\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{9V_m^2}{2\pi} \left[\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} - \alpha \right) + \left[\frac{1}{2} \sin 2\omega t \right]_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{9V_m^2}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} (\sin(\pi/3 + 2\alpha) - \sin(-\pi/3 + 2\alpha)) \right]} = \sqrt{3}V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} (2 \sin(\pi/3) \cos(2\alpha))} = \\ &= \frac{\sqrt{3}V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cos(2\alpha)} \end{aligned}$$

$$a_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{\cos[(6n+1)\alpha]}{6n+1} - \frac{\cos[(6n-1)\alpha]}{6n-1} \right]$$

- Συντελεστές Fourier:

$$b_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{\sin[(6n+1)\alpha]}{6n+1} - \frac{\sin[(6n-1)\alpha]}{6n-1} \right]$$





AC Ρυθμιστές Τάσης

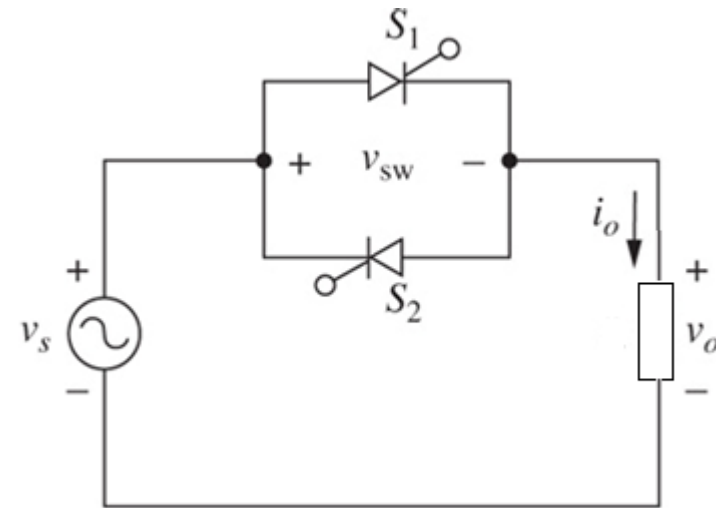
Εισαγωγή

- Ένας ρυθμιστής **AC** τάσης είναι μετατροπέας που ελέγχει τάση, ρεύμα και μέση ισχύ σ' ένα **AC** φορτίο από μια **AC** πηγή.
- Χρησιμοποιείται η τεχνική *ελέγχου φάσης* αφαιρώντας έτσι ένα μέρος της κυματομορφής της εισόδου προτού φτάσει στο φορτίο.
- Πρόκειται δηλ για έναν **AC-AC** μετατροπέα.
- Η συχνότητα παραμένει σταθερή.



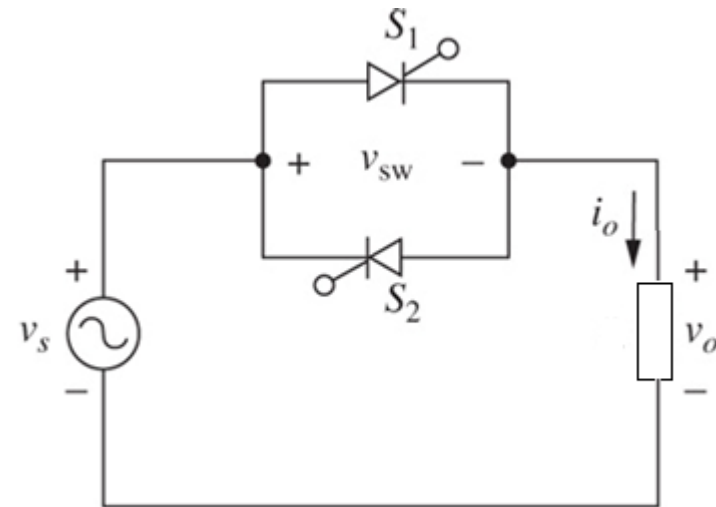
Μονοφασικός AC μετατροπέας

- Αντιπαράλληλα θυρίστορ (μπορεί και με TRIAC).
- Εάν εφαρμοσθούν κατάλληλοι παλμοί στις πύλες των thyristors, ενώ αυτά είναι ορθά πολωμένα, τότε ρέει ρεύμα στο φορτίο.
- η τάση στο φορτίο (v_o) μπορεί να μεταβάλλεται από μηδέν μέχρι σχεδόν την πλήρη τάση τροφοδοσίας (για την ακρίβεια την πλήρη τάση τροφοδοσίας πλην την πτώση τάσης στο thyristor).



Έλεγχος των thyristors

- Η λειτουργία των thyristors μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:
- **A)** Πλήρης τάση τροφοδοσίας για ένα ακέραιο αριθμό περιόδων, και στην συνέχεια η τάση μηδενίζεται για ένα άλλο ακέραιο αριθμό περιόδων.
- **B)** Η έναυση των thyristors γίνεται σε κάποια γωνία α της ημιπεριόδου που το thyristor είναι θετικά πολωμένο. Σε αυτήν την περίπτωση η κυματομορφή της τάσης του φορτίου αναφέρεται ως «ελεγχόμενη από την φάση» (phase-controlled).



Παρατηρήσεις

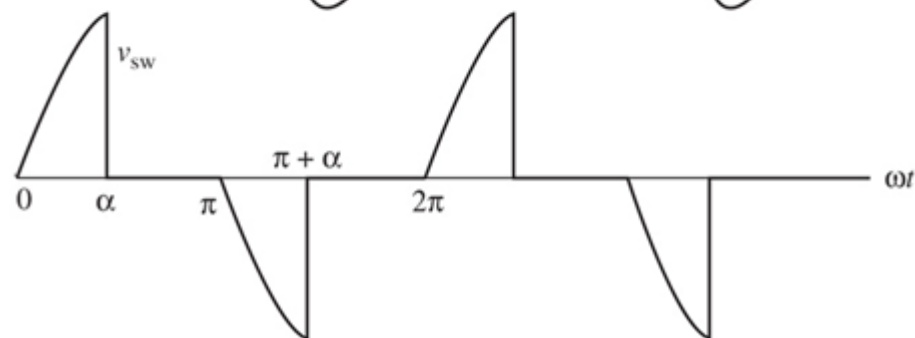
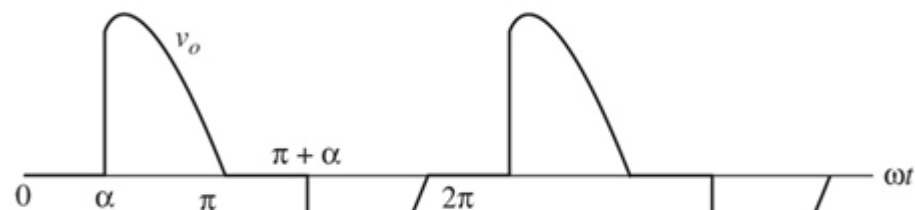
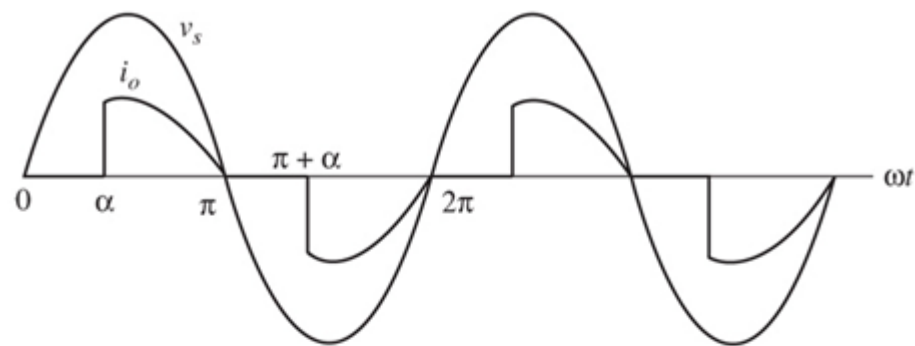
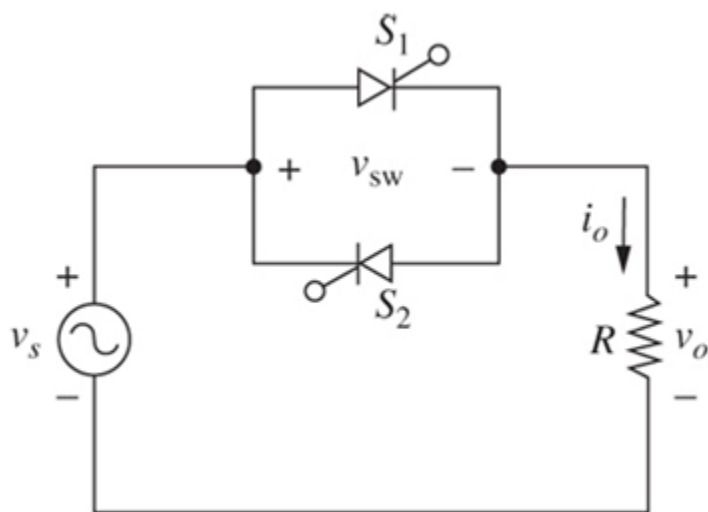
- Τα θυρίστορ δεν άγουν ταυτόχρονα.
- Για ωμικό φορτίο, η τάση φορτίου είναι ίδια με την τάση εισόδου, όταν οποιοδήποτε θυρίστορ άγει, και μηδέν όταν δεν άγει κανένα
- Το μέσο ρεύμα φορτίου και εισόδου είναι μηδέν αν έχω συμμετρική έναυση των θυρίστορ (άγουν για ίσο χρονικό διάστημα.
- Το μέσο ρεύμα κάθε θυρίστορ δεν είναι μηδέν.

Ωμικό φορτίο με συμμετρική έναυση των thyristors

- σύντομος παλμός 1-3V

$$v_s(\omega t) = V_m \sin \omega t$$

$$v_o(\omega t) = \begin{cases} V_m \sin \omega t & \alpha < \omega t < \pi \\ 0 & \alpha + \pi < \omega t < 2\pi \end{cases}$$



Ωμικό φορτίο με συμμετρική έναυση των thyristors.

RMS Τάση φορτίου:

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [V_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)}$$
$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}.$$

pf φορτίου:

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{s,rms} I_{s,rms}} = \frac{V_{o,rms}^2 / R}{V_{s,rms} (V_{o,rms} / R)}$$
$$= \frac{V_{o,rms}}{V_{s,rms}} = \frac{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}}{V_m / \sqrt{2}}$$
$$pf = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}.$$

- Μέσο ρεύμα εισόδου μηδέν.
- Για $\alpha=0 \Rightarrow PF=1$.
- Μέσο ρεύμα thyristor:

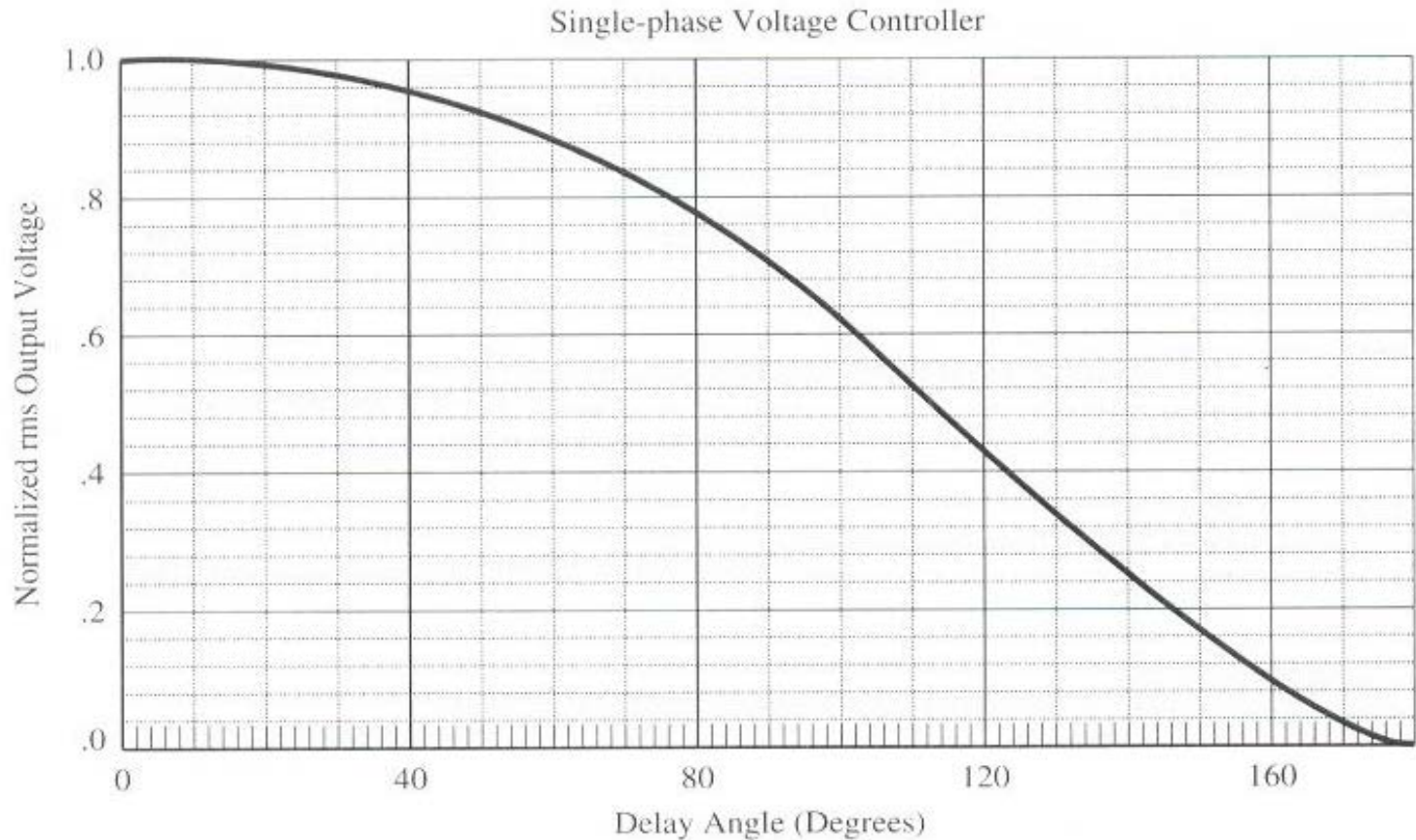
$$I_{SCR,avg} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{V_m}{R} \sin \omega t d(\omega t)$$
$$= \frac{V_m}{2\pi R} (1 + \cos \alpha).$$

- RMS ρεύμα thyristor:

$$I_{SCR,rms} = \frac{I_{o,rms}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{o,rms}}{R}$$



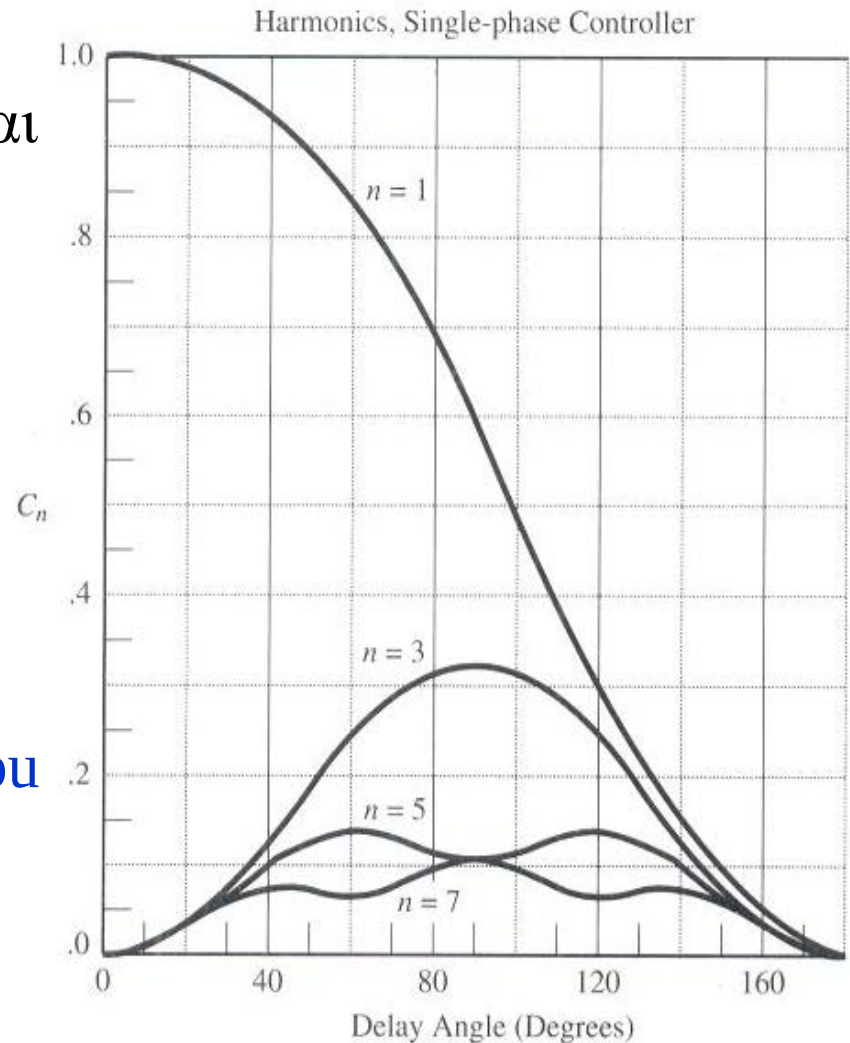
Ωμικό φορτίο με συμμετρική έναυση των thyristors



- Τάση φορτίου (σε V_{rms}) σε σχέση με τη γωνία έναυσης

Ωμικό φορτίο με συμμετρική έναυση των thyristors.

- Επειδή το ρεύμα φορτίου και εισόδου δεν είναι ημιτονοειδές => ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ.
- Λόγω συμμετρίας μισού κύματος υπάρχουν μόνο μονές αρμονικές (1^η, 3^η, 5^η κτλ)
- Αρμονικές συνιστώσες σε pu σε σχέση με τη γωνία έναυσης →



Ανάλυση αρμονικών

- $a_1 = \frac{V_m}{2\pi} (\cos 2a - 1)$
- $b_1 = \frac{V_m}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2a}{2} \right)$
- $a_n = \frac{V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)a - 1}{n+1} - \frac{\cos(n-1)a - 1}{n-1} \right] \quad n=3,5,7,\dots$
- $b_n = \frac{V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)a}{n+1} - \frac{\sin(n-1)a}{n-1} \right] \quad n=3,5,7,\dots$
- Το πλάτος της 1^{ης} αρμονικής προκύπτει:
- $C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \frac{V_m}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{(\cos 2a - 1)^2 + (2\pi - 2\alpha + \sin 2a)^2}$

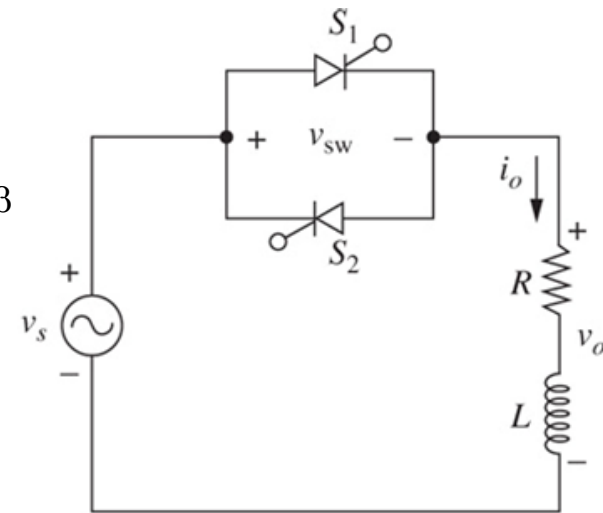


Ωμικο-επαγωγικό φορτίο

- Ρεύμα εξόδου:

$$i_o(\omega t) = \begin{cases} \left(\frac{V_m}{Z} \right) \left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(\alpha - \omega t)/\omega\tau} \right] & \text{για } \alpha \leq \omega t \leq \beta \\ 0 & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

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

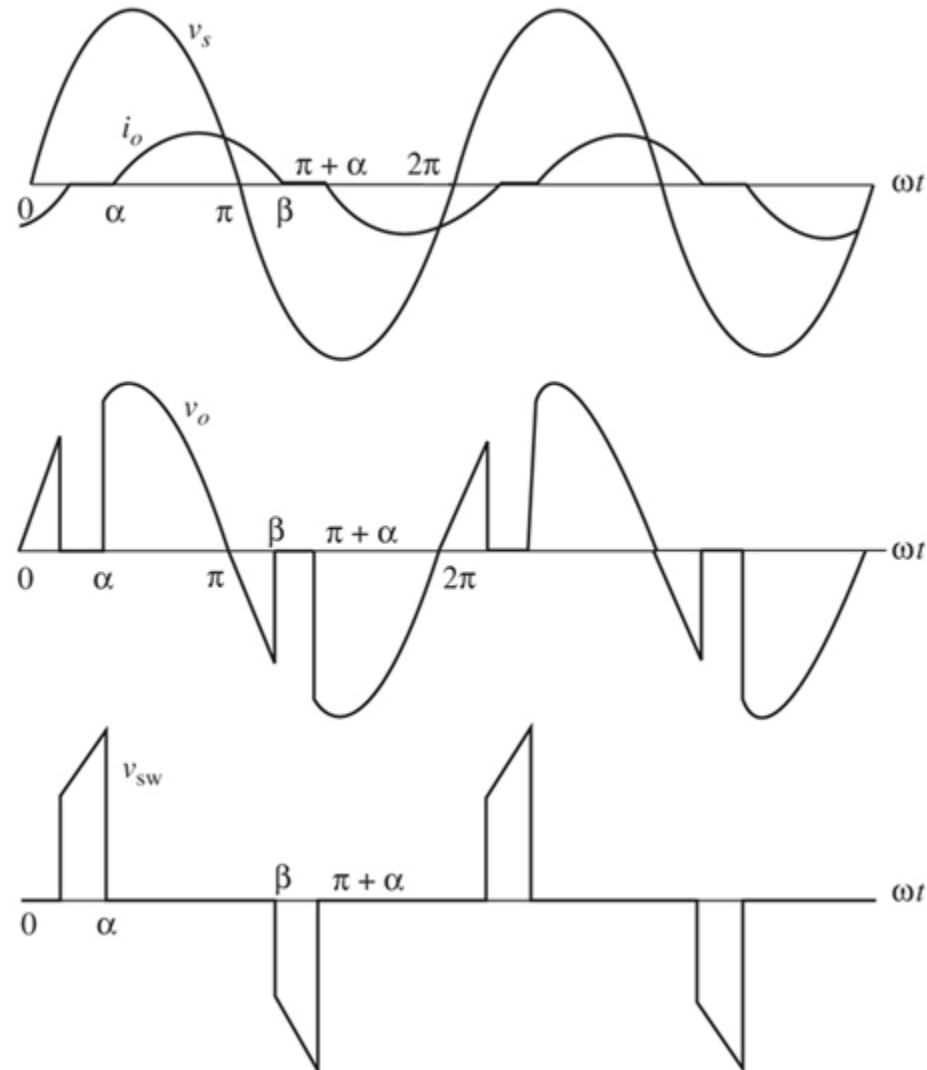


- Το S1 άγει για $\omega t = \alpha$
- Το S2 για $\omega t = \pi + \alpha$
- β είναι η γωνία σβέσης του S1 (λόγω της επαγωγής 'αργεί' να σβήσει)
- Το S2 δεν πρέπει να πάρει παλμό έναυσης πριν το ρεύμα του S1 μηδενιστεί πλήρως. Άρα, η γωνία έναυσης πρέπει $\alpha \geq \beta - \pi$



Ωμικό-επαγωγικό φορτίο - Κυματομορφές

- Η γωνία αγωγής είναι $\gamma = \beta - \alpha$
- Αν $\gamma = \pi$ ένα θυρίστορ άγει πάντα.
- Τότε η τάση και το ρεύμα φορτίου είναι καθαρά ημίτονα.
- Αυτό συμβαίνει όταν $\alpha = \vartheta$



Εφαρμογές

- Έλεγχος φωτισμού (dimming)
- Έλεγχος της τάσης των επαγωγικών κινητήρων
- Έλεγχος ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης (σε βιομηχανικές εφαρμογές)
- Έλεγχος πυκνωτών για ρύθμιση άεργης ισχύος σε γραμμές μεταφοράς.
- Γενικώς σε εφαρμογές στις οποίες έλεγχος της τάσης φορτίου με σχετικά υψηλή συχνότητα.



Έλεγχος επαγωγικών κινητήρων

- Έλεγχος μεταβάλλοντας την τάση ή/και τη συχνότητα.
- Η ροπή του κινητήρα ~ τετραγώνου τάσης.
- Χαμηλή απόδοση σε μικρές ταχύτητες.
- Χρήση σε μικρούς κινητήρες ή όταν η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες διαρκεί λίγο.

