



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ηλεκτρονικά Ισχύος II

Ενότητα 2: Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε
Εναλλασσόμενη Τάση

(DC-AC Converters ή Inverters)

Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής

Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

- Παρουσίαση και επεξήγηση βασικών τοπολογιών των μετατροπέων συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση
- Παρουσίαση μεθόδων παλμοδότησης σε μονοφασικούς και τριφασικούς αντιστροφείς
- Μελέτη του αρμονικού περιεχομένου τάσεων και ρευμάτων των αντιστροφέων



Περιεχόμενα ενότητας

- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε μονοφασική εναλλασσόμενη τάση με τρανζίστορ ισχύος (Half-bridge, Full-bridge).
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε μονοφασική εναλλασσόμενη τάση με θυρίστορ
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε τριφασική εναλλασσόμενη τάση με τρανζίστορ ισχύος
- Μέθοδοι παλμοδότησης αντιστροφών (SPWM, HIPWM κλπ)
- Ρύθμιση στροφών τριφασικής ασύγχρονης μηχανής



Διάλεξη 11η

Μονοφασικοί και τριφασικοί μετατροπείς Σ.Τ.-Ε.Τ. (Single and Three Phase Inverters)



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΙΙ

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ
(DC-AC Converters ή INVERTERS)

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ και ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΤ-ΕΤ

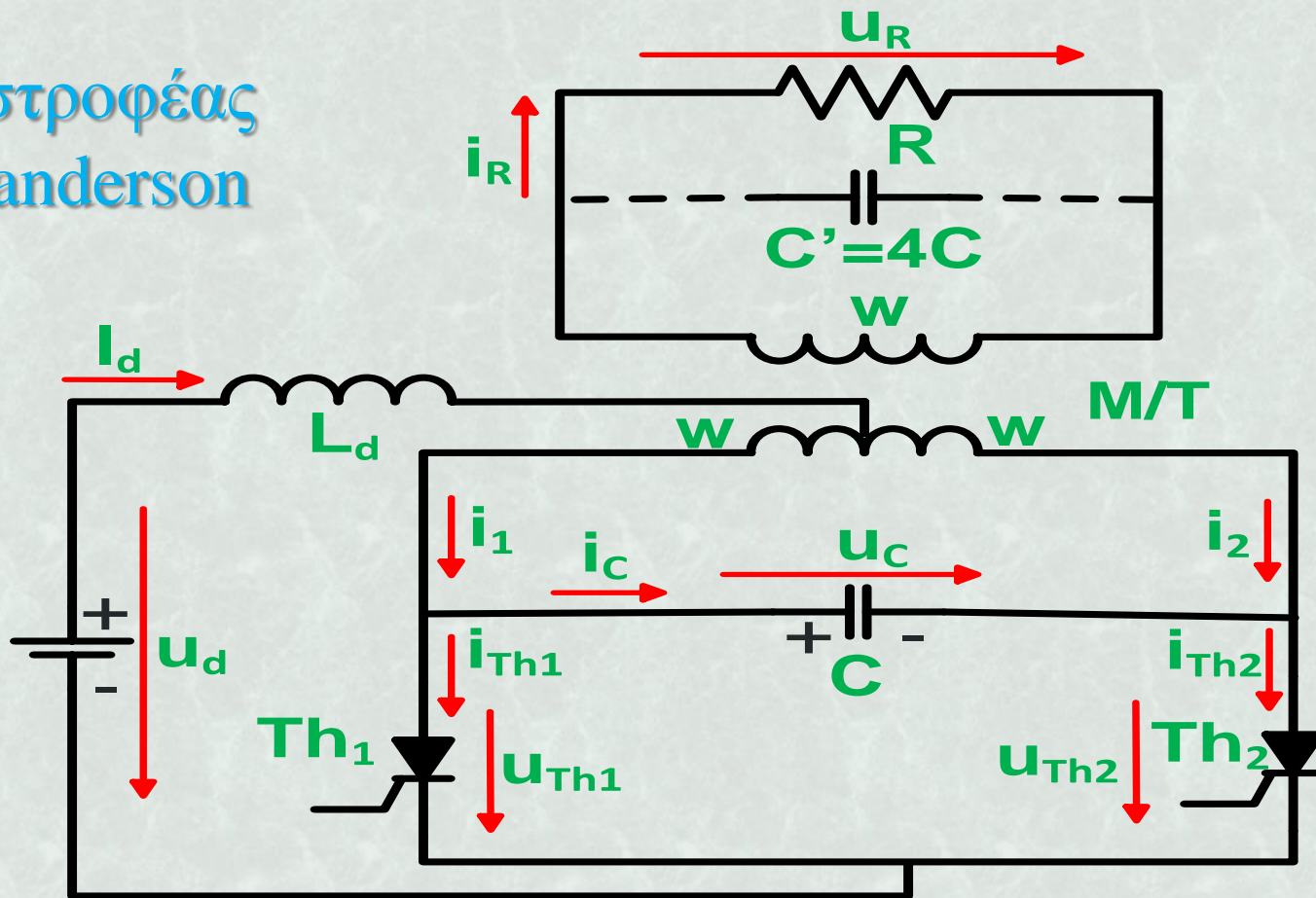
(Single and Three Phase Inverters)



ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Αντιστροφέας
Alexanderson



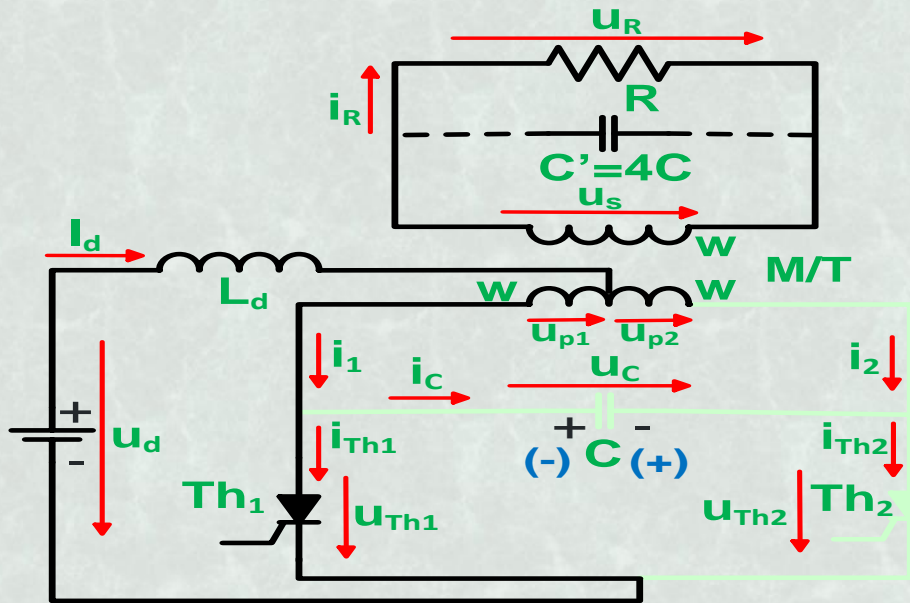
Κυκλωματικό διάγραμμα – Αντιστροφέας Ρεύματος

Ιδιαίτερο γνώρισμα των αντιστροφέων με θυρίστορ είναι η αναγκαιότητα ύπαρξης κυκλώματος **εξαναγκασμένης σβέσης**.



ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ALEXANDERSON

ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ



Διάστημα αγωγής Th_1

- ✎ Θεωρούμε τα thyristor ιδανικά.
- ✎ Θεωρούμε το M/T ιδανικό.
- ✎ Το κύκλωμα μετάβασης δεν περιέχει επαγωγιμότητες.
- ✎ Η αυτεπαγωγιμότητα του πηνίου εξομάλυνσης L_d θεωρείται πολύ μεγάλης τιμής (άπειρη):
 - ✎ Το ρεύμα I_d θεωρείται σταθερό.

- ✎ Κάποια χρονική στιγμή έχει τεθεί σε αγωγή το thyristor Th_1 .
- ✎ Στις κυματομορφές και την ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε ότι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος R-C είναι πολύ μικρότερη από την ημιπερίοδο λειτουργίας.

- ✎ Συνεπώς, αφού παρέλθει το μεταβατικό φαινόμενο θα έχουμε:

$$u_{p1} = u_{p2} = -U_d \Rightarrow u_C = u_p = -2 \cdot U_d$$

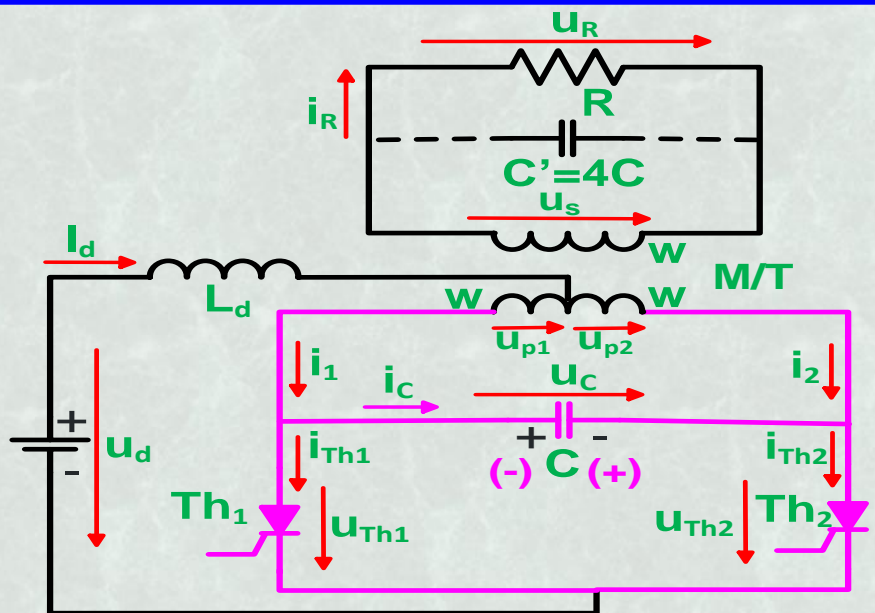
$$i_1 = i_{Th1} = I_d, \quad i_C = 0, \quad i_2 = 0, \quad i_{Th2} = 0$$

$$u_s = u_R = \left[\frac{w_s}{w_p} \right] \cdot u_p = \left[\frac{w}{2 \cdot w} \right] \cdot [-2 \cdot U_d] = -U_d$$





$$i_R = \frac{u_s}{R} = -\frac{U_d}{R}$$

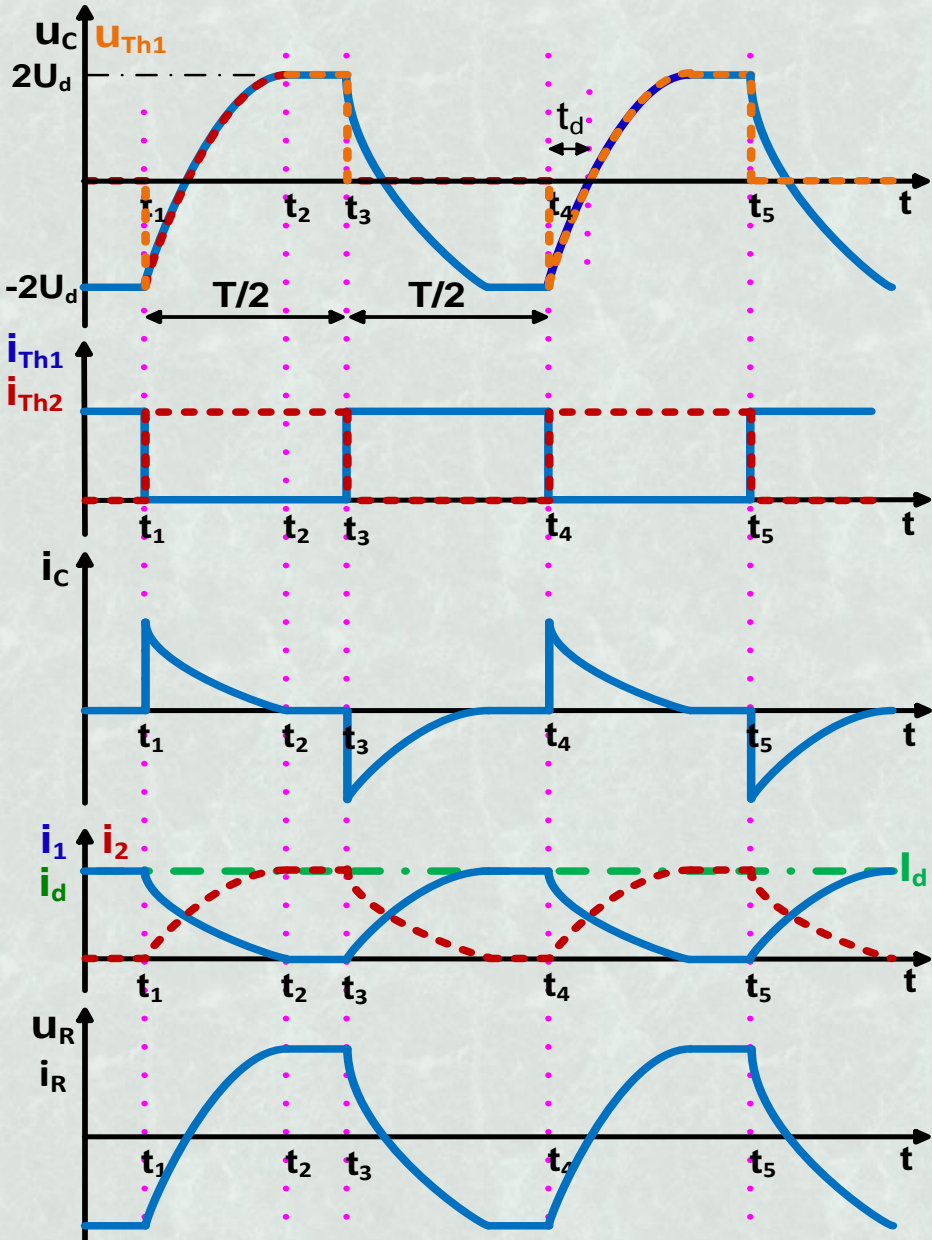
- ✎ Άρα η πολικότητα της τάσης του πυκνωτή C είναι αρνητική σε σχέση με την αναφορά.

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ALEXANDERSON



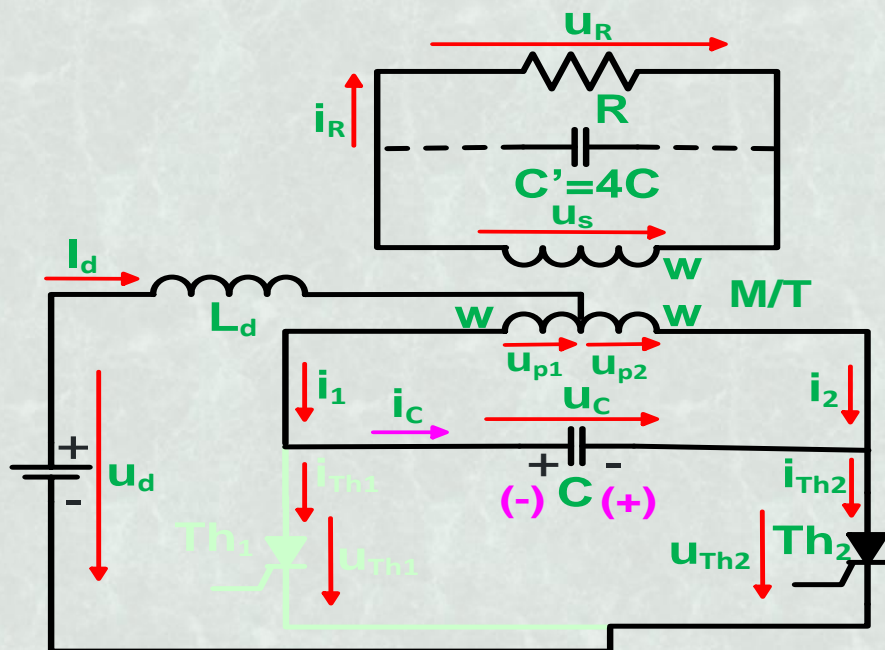
Χρονικό διάστημα $t_1 \leq t \leq t_2$

-  Τη χρονική στιγμή t_1 δίνουμε παλμό έναυσης στο θυρίστορ Th_2 .
-  Η τάση του πυκνωτή C εφαρμόζεται πάνω στο θυρίστορ Th_1 και το πολώνει ανάστροφα.
-  Θεωρούμε ότι το θυρίστορ Th_1 σβήνει ακαριαία.
-  Το ρεύμα I_d μεταβαίνει από το θυρίστορ Th_1 στο θυρίστορ Th_2 .



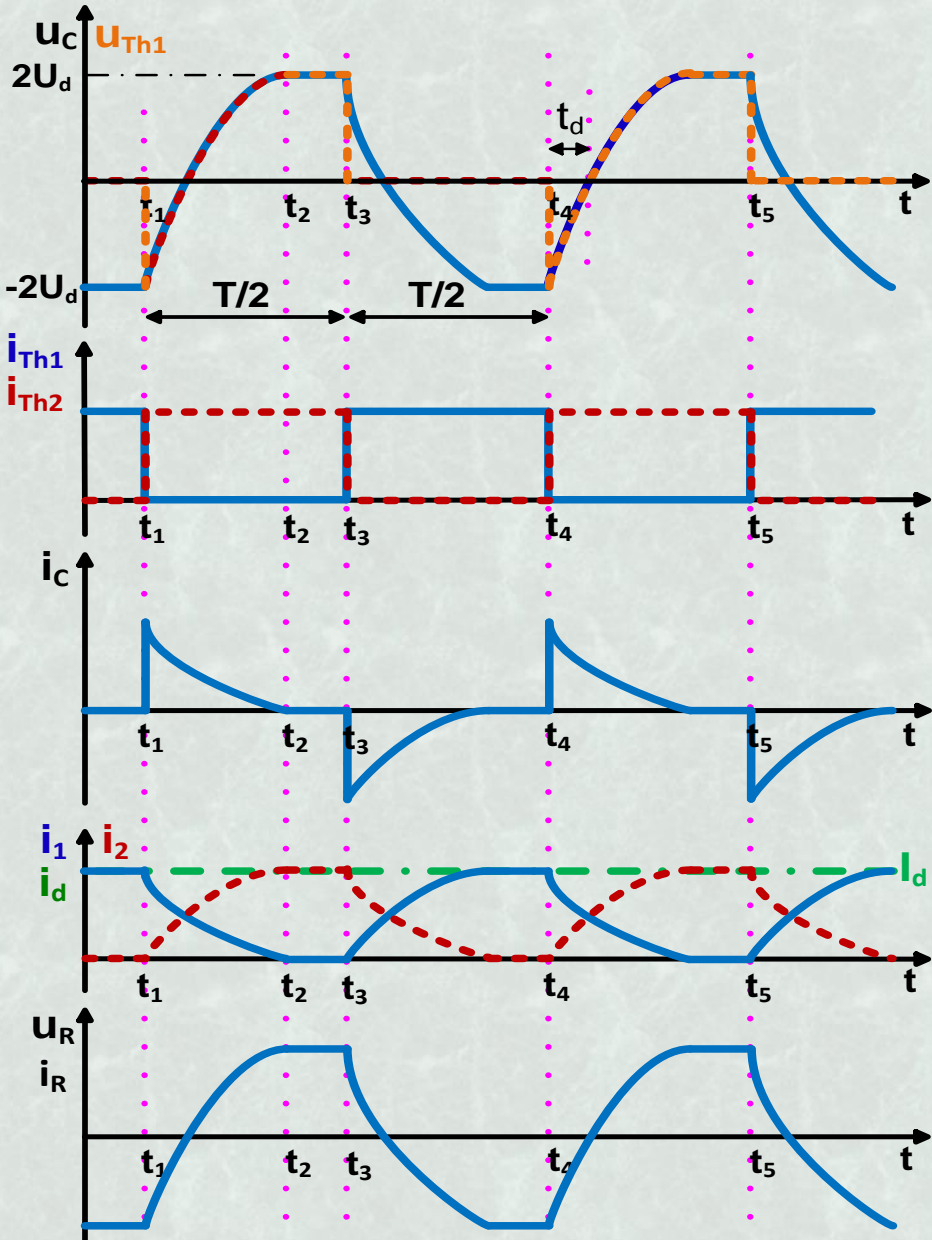
Κυματομορφές για ωμικό φορτίο

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ALEXANDERSON



Χρονικό διάστημα $t_1 \leq t \leq t_2$

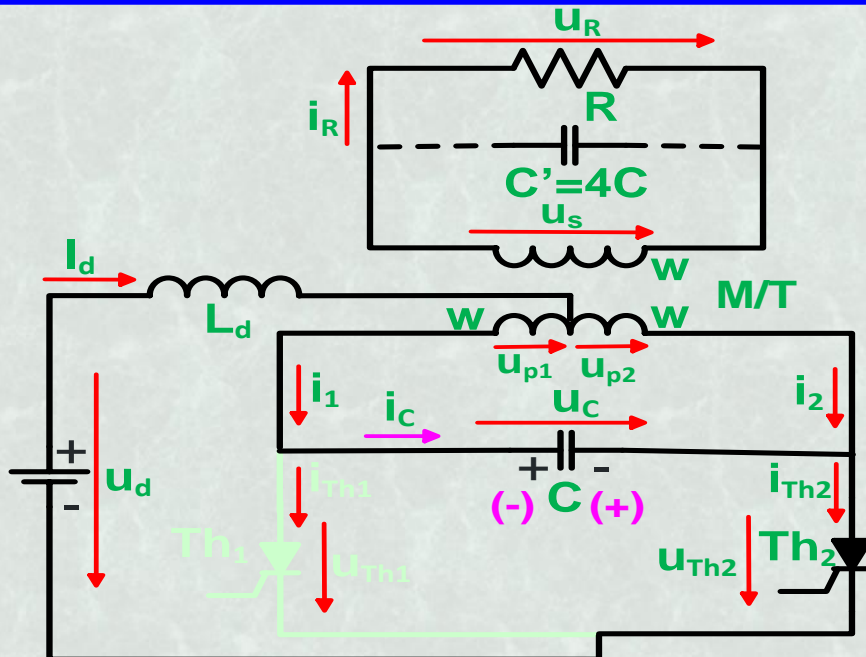
- Το ρεύμα i_{Th2} στο thyristor Th_2 είναι σταθερό και ίσο με I_d .
- Ο πυκνωτής C εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης φορτίου, η οποία φαίνεται από το πρωτεύον ως παράλληλη με τον C και με τιμή $4 \cdot R$.
- Το ρεύμα i_c του C φθίνει εκθετικά.
- Το ρεύμα i_2 αυξάνεται εκθετικά, αφού $i_c + i_2 = i_{Th2} = I_d$. Επίσης $i_1 = i_c$.







Κυματομορφές για ωμικό φορτίο



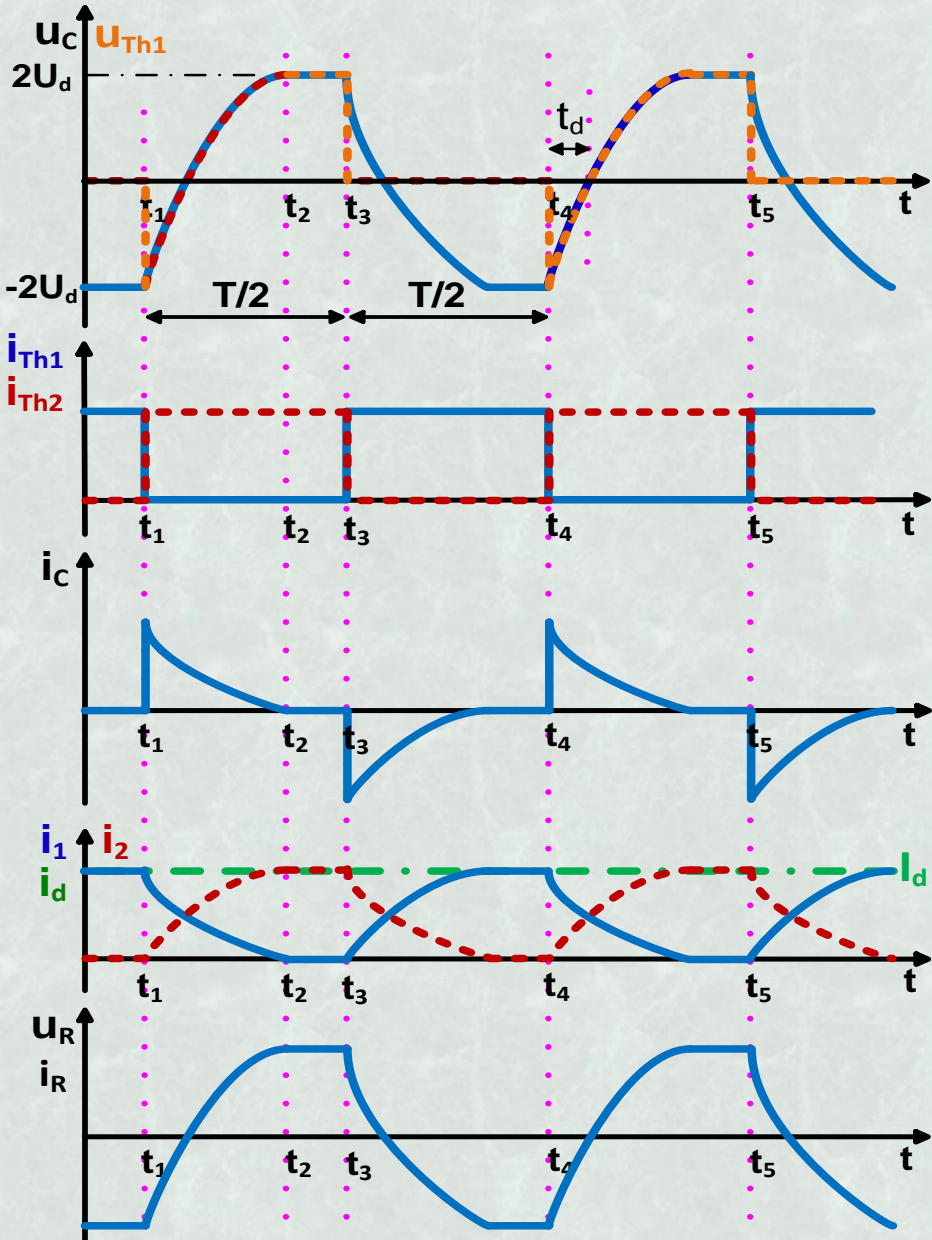
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ALEXANDERSON



Χρονικό διάστημα $t_2 \leq t \leq t_3$

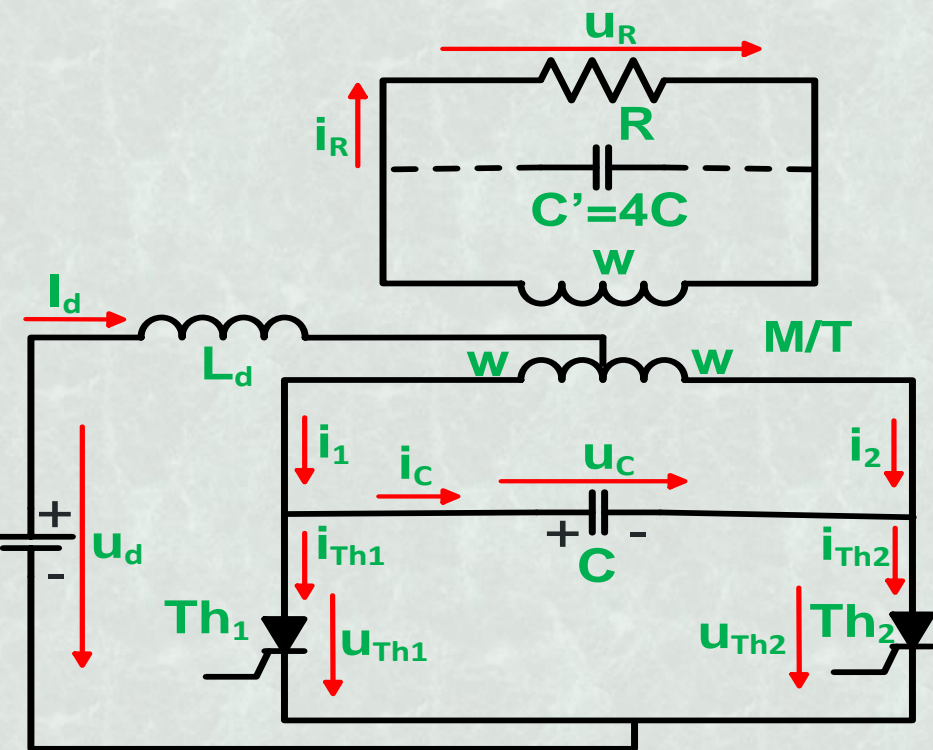
-  Θεωρούμε $(3-4) \cdot \tau < (T/2)$, $\tau = 4 \cdot R \cdot C$.
-  Τη χρονική στιγμή t_2 ολοκληρώνεται το μεταβατικό φαινόμενο. Μετά, η τάση u_c στον πυκνωτή C παραμένει σταθερά και το i_c μηδενίζεται.
-  Τη χρονική στιγμή t_3 παλμοδοτείται το thyristor Th_1 .
-  Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται.

 Θα πρέπει $t_d > t_F$.



Κυματομορφές για ωμικό φορτίο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

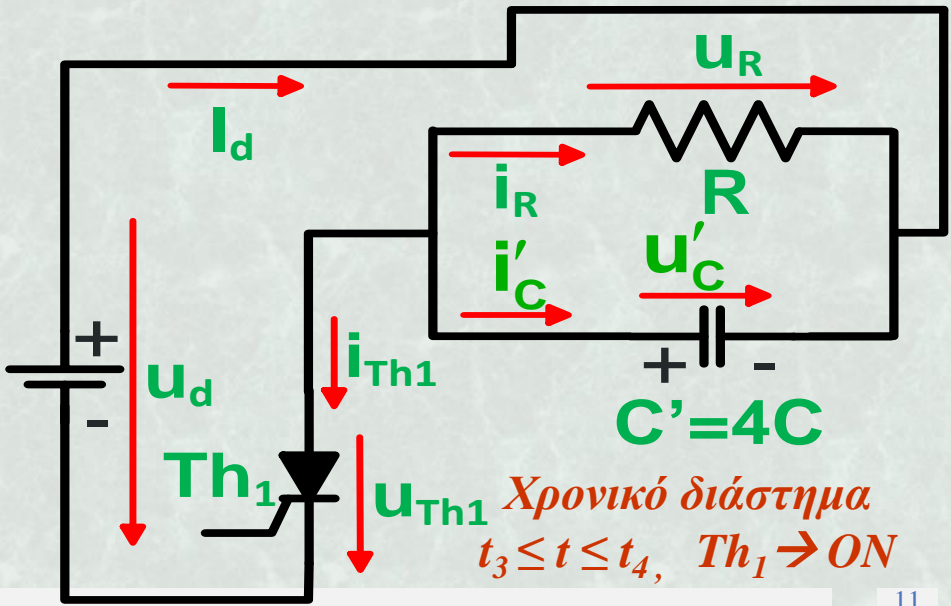
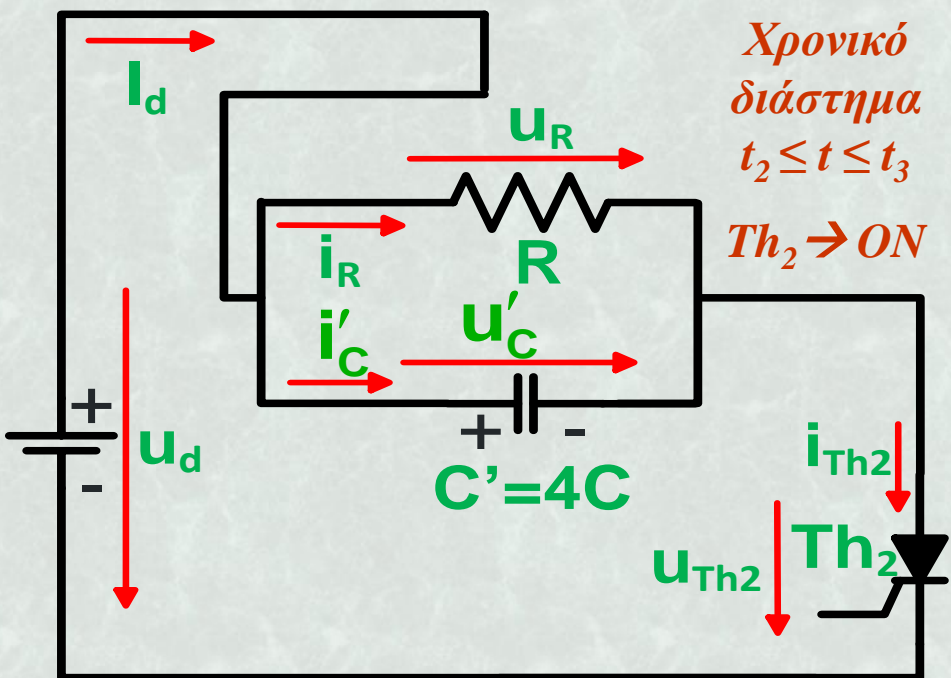


Χρονικό διάστημα $t_2 \leq t \leq t_3$

$$i_R + i'_C = I_d \Rightarrow \frac{u'_C}{R} + C' \cdot \frac{du'_C}{dt} = I_d$$

ΛΥΣΗ:

$$u'_C = R \cdot I_d + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = R \cdot C' = 4 \cdot R \cdot C$$



ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Συνθήκη υπολογισμού της σταθεράς A : $u'_C(t_1) = -u'_C(t_1 + \frac{T}{2})$

$$\Rightarrow A = -\frac{2 \cdot R \cdot I_d}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \quad \text{Συνεπώς : } u'_C(t) = R \cdot I_d \cdot \left(1 - \frac{2}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Η τιμή του I_d εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας U_d και την τιμή του R .

Μπορεί να υπολογισθεί από ισολογισμό ισχύος: $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_R^2(t) \cdot R \cdot dt = U_d \cdot I_d$

$$\text{Αλλά: } i_R(t) = I_d - i'_C = I_d - C \cdot \frac{du'_C(t)}{dt} = I_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \right)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση ισολογισμού ισχύος καταλήγουμε στη σχέση:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \cdot \frac{1}{1 - \frac{4 \cdot \tau}{T} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}{\left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}\right)^2}} = \frac{U_d}{R} \cdot \frac{1}{1 - \frac{4 \cdot \tau}{T} \cdot \tanh\left(\frac{T}{4 \cdot \tau}\right)}$$



ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Συνεπώς:

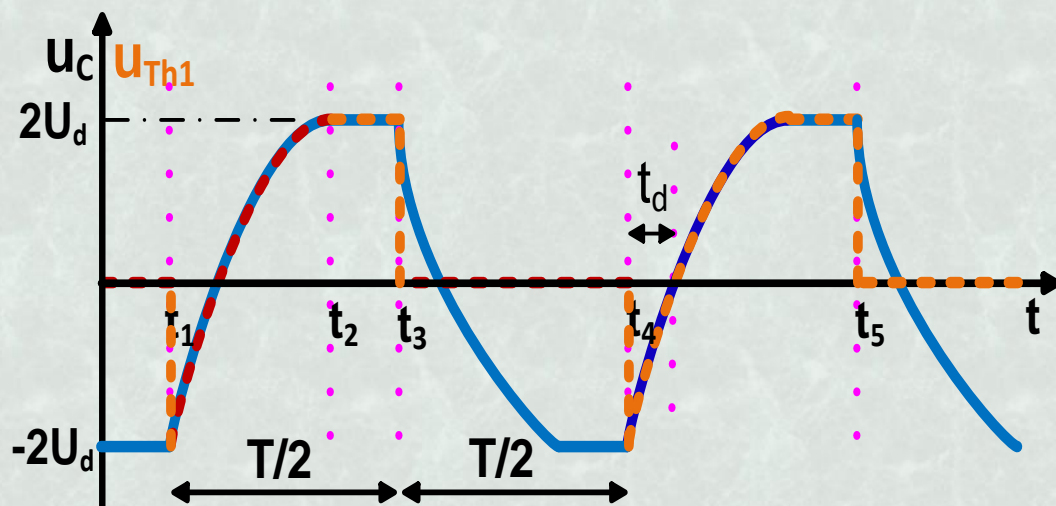
$$u_R(t) = u'_C(t) = U_d \cdot \frac{\left(1 - \frac{2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}}\right)}{1 - \frac{4 \cdot \tau}{T} \cdot \tanh\left(\frac{T}{4 \cdot \tau}\right)} = U_d \cdot \frac{\left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau}} - 2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}{\left[1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}\right] \cdot \left[1 - \frac{4 \cdot \tau}{T} \cdot \tanh\left(\frac{T}{4 \cdot \tau}\right)\right]}$$

Επίσης: $u_C(t) = 2 \cdot u'_C(t)$ και: $u_R\left(\frac{T}{2}\right) = U_d$ αν $4 \cdot \tau \square \frac{T}{2} \Rightarrow \frac{T}{4 \cdot \tau} \square 2 \Rightarrow \frac{T}{\tau} \square 8$

Τέλος, θα πρέπει ο χρόνος απελευθέρωσης των θυρίστρον t_F να είναι μικρότερος από t_d .

Συνεπώς :

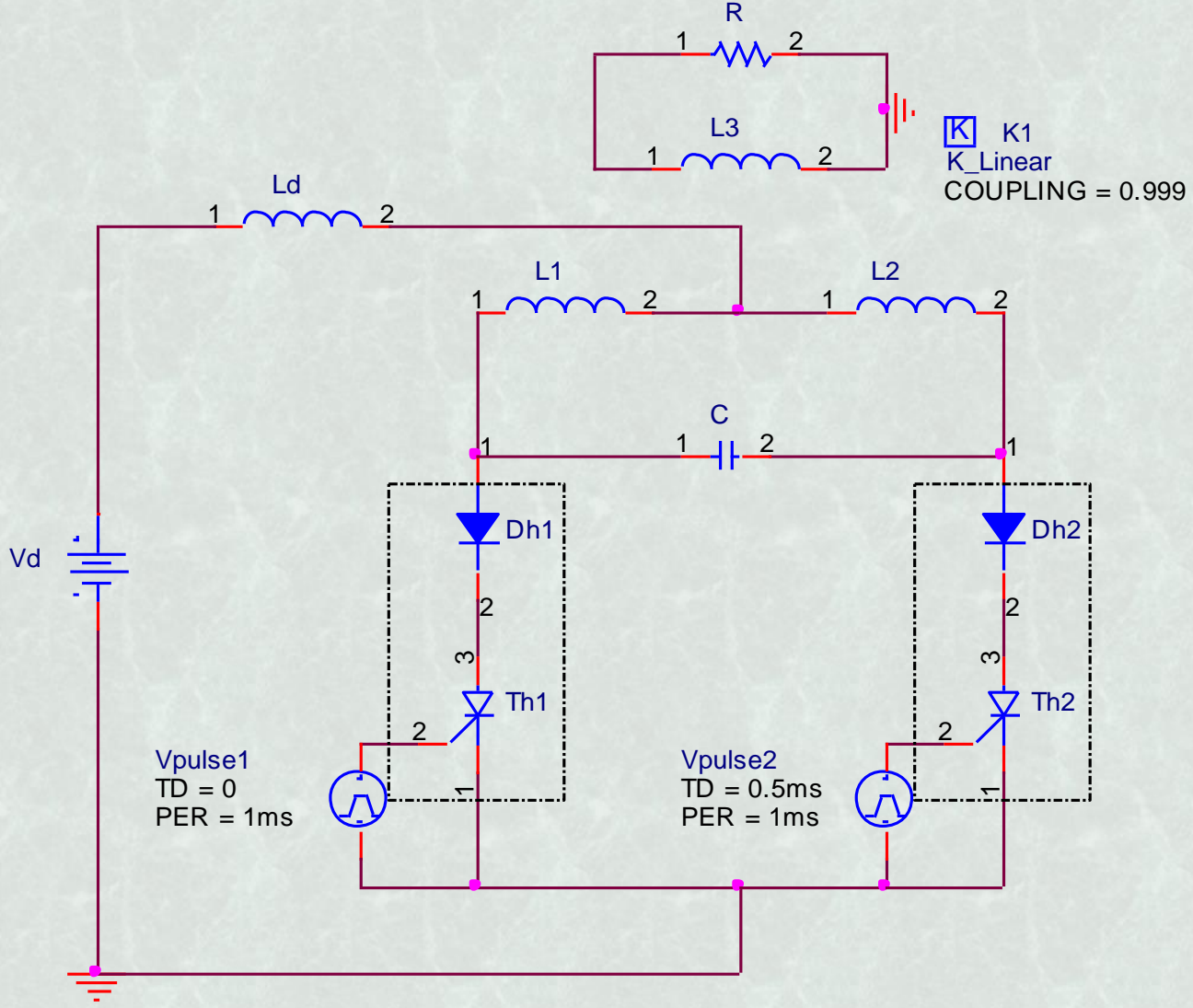
$$t_F \leq t_d = \tau \cdot \ln \frac{2}{\left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}\right)}$$



Κυματομορφές τάσεων C και Th₁

- Μειονεκτήματα:**
- α) Δεν λειτουργεί εν κενώ ή με πολύ μικρό ρεύμα εξόδου
 - β) Δεν μπορεί να τροφοδοτήσει ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του μονοφασικού αντιστροφέα ρεύματος με θυρίστωρ (ωμικό φορτίο)

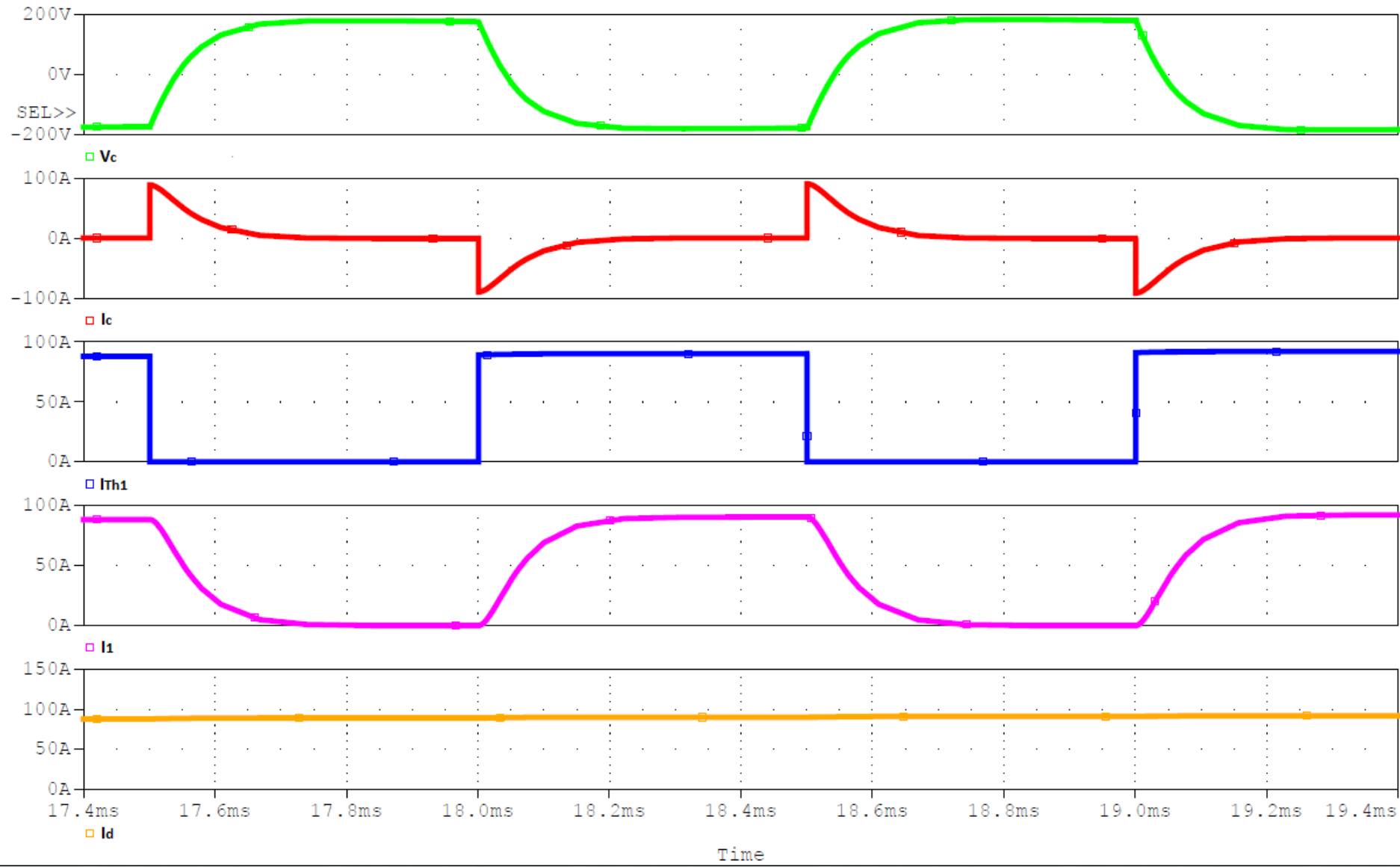


Κυκλωματικό διάγραμμα



Προσομοίωση αντιστροφέα ρεύματος με θυρίστορ (R φορτίο)

(A) thyristor inverter-alexanderson-SCHEMATIC1-Inverter_alexanderson.dat (active)

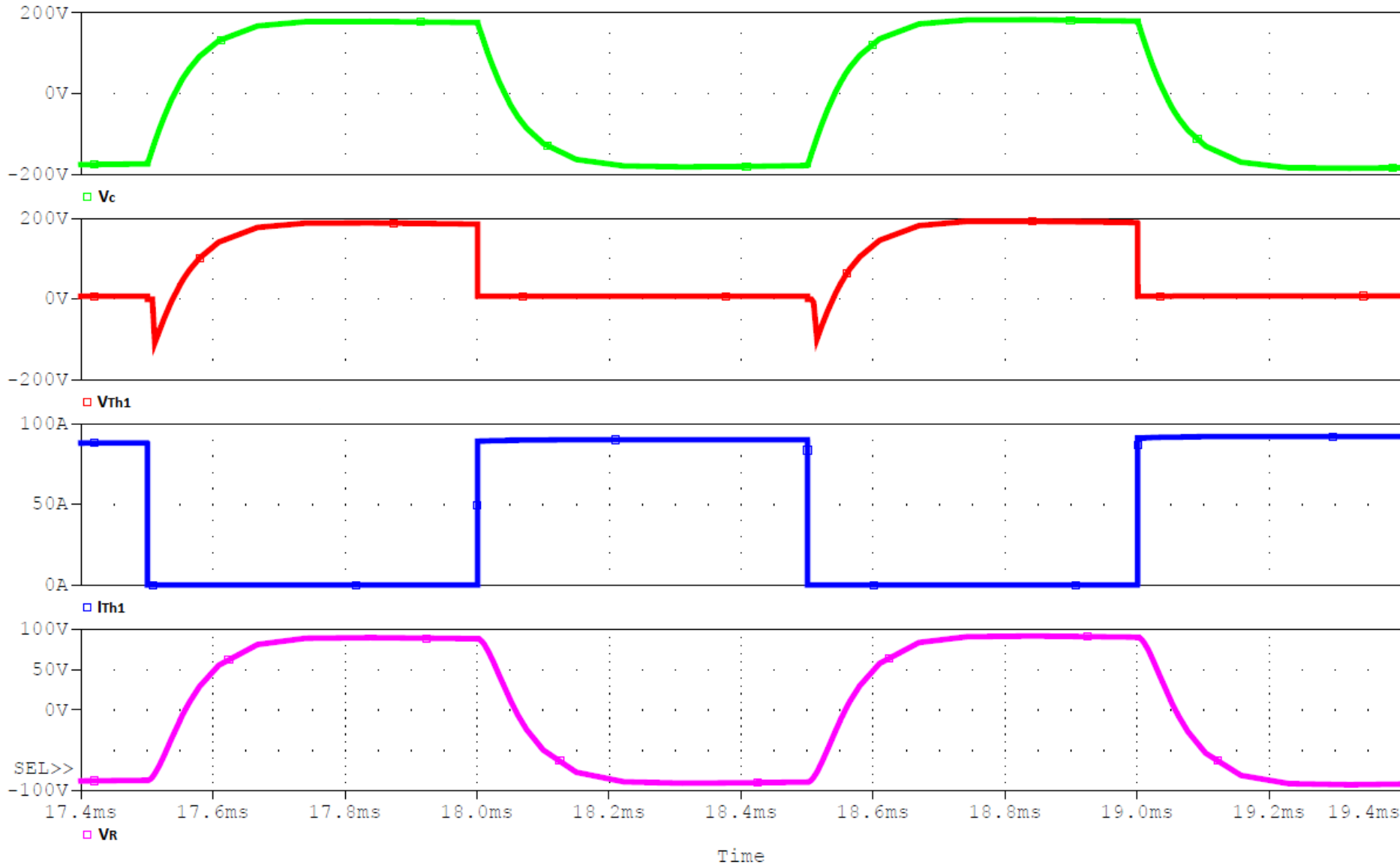


Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για ωμικό φορτίο



Προσομοίωση αντιστροφεία ρεύματος με θυρίστορ (R φορτίο)

(A) thyristor inverter-alexanderson-SCHEMATIC1-Inverter_alexanderson.dat (active)



Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για ωμικό φορτίο

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΙΙ

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

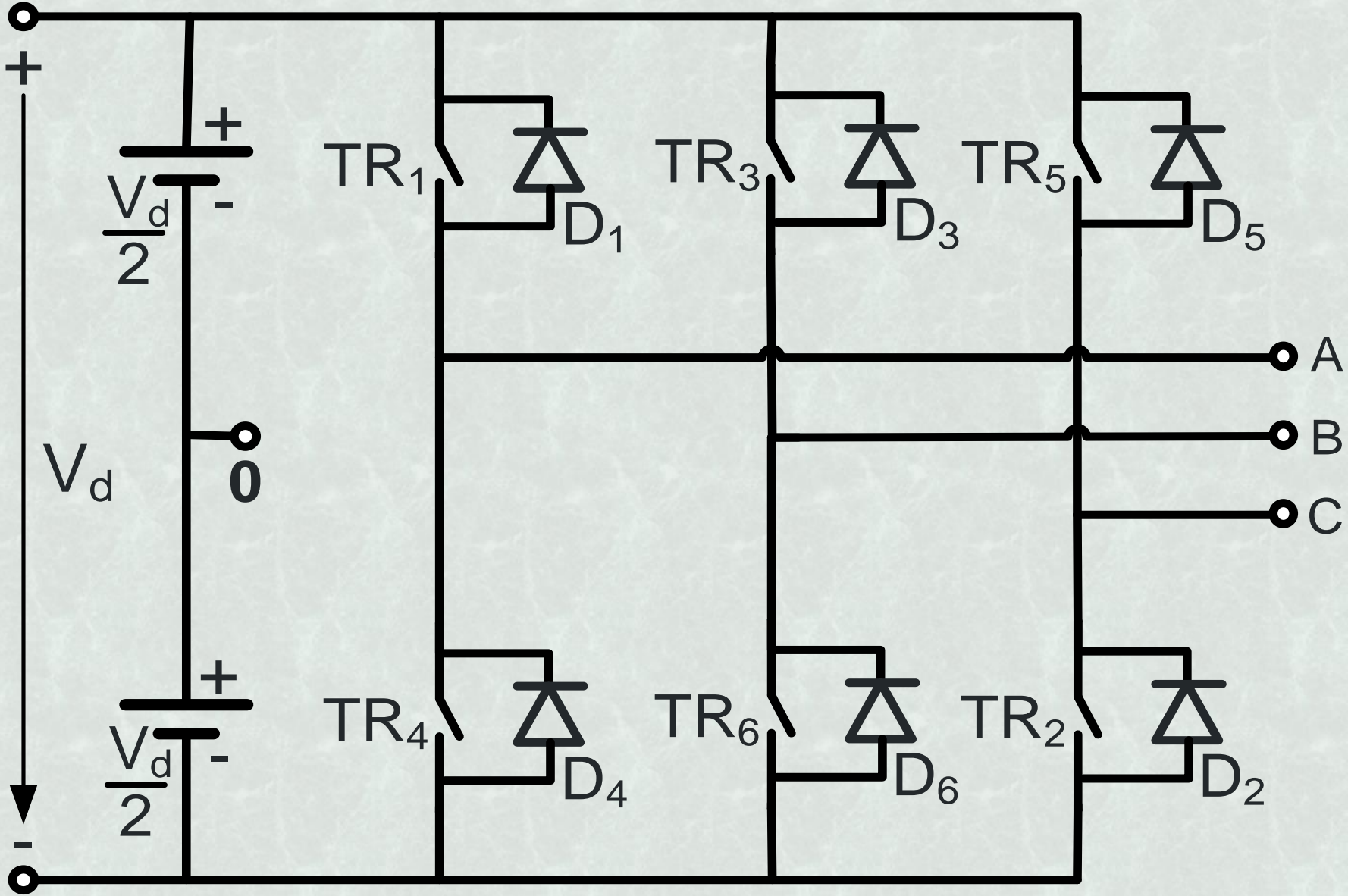
ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ
(DC-AC Converters ή INVERTERS)

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΤ-ΕΤ
(Three Phase Inverters)

Έλεγχος με τετραγωνικούς παλμούς



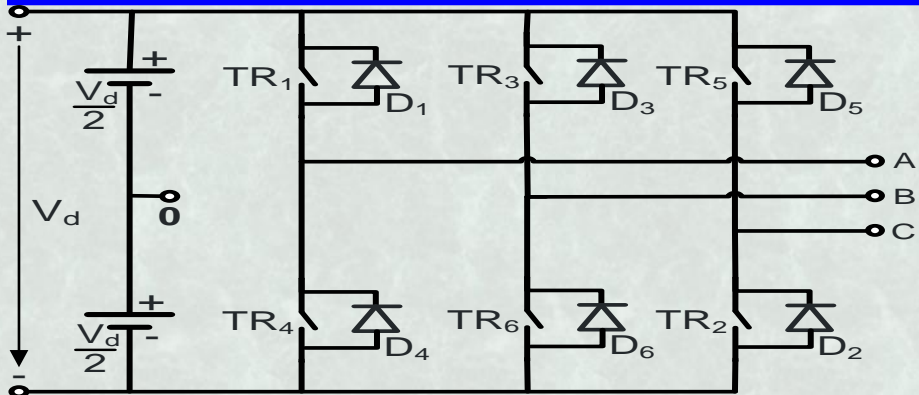
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ



Κυκλωματικό διάγραμμα

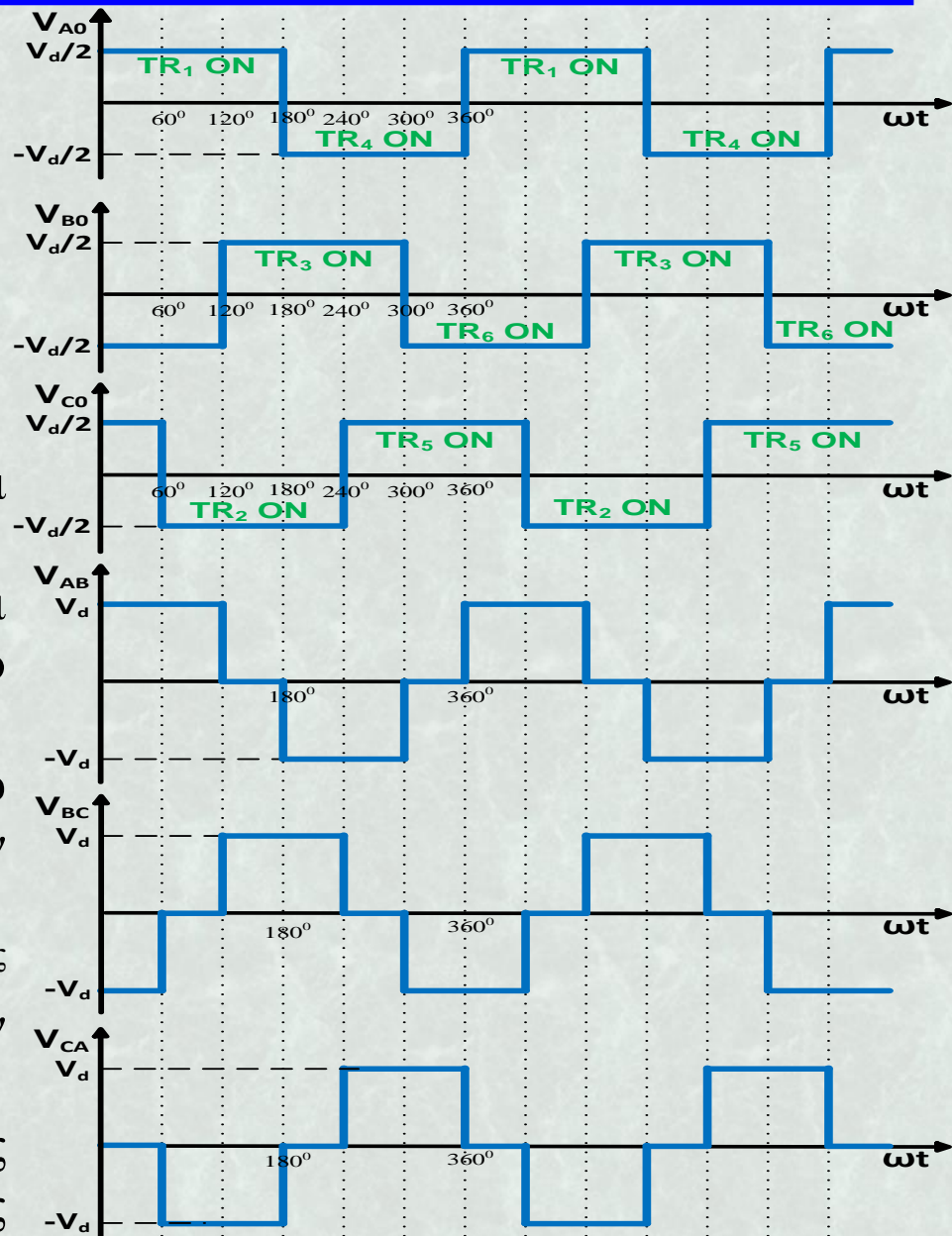


ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ



Κυκλωματικό διάγραμμα

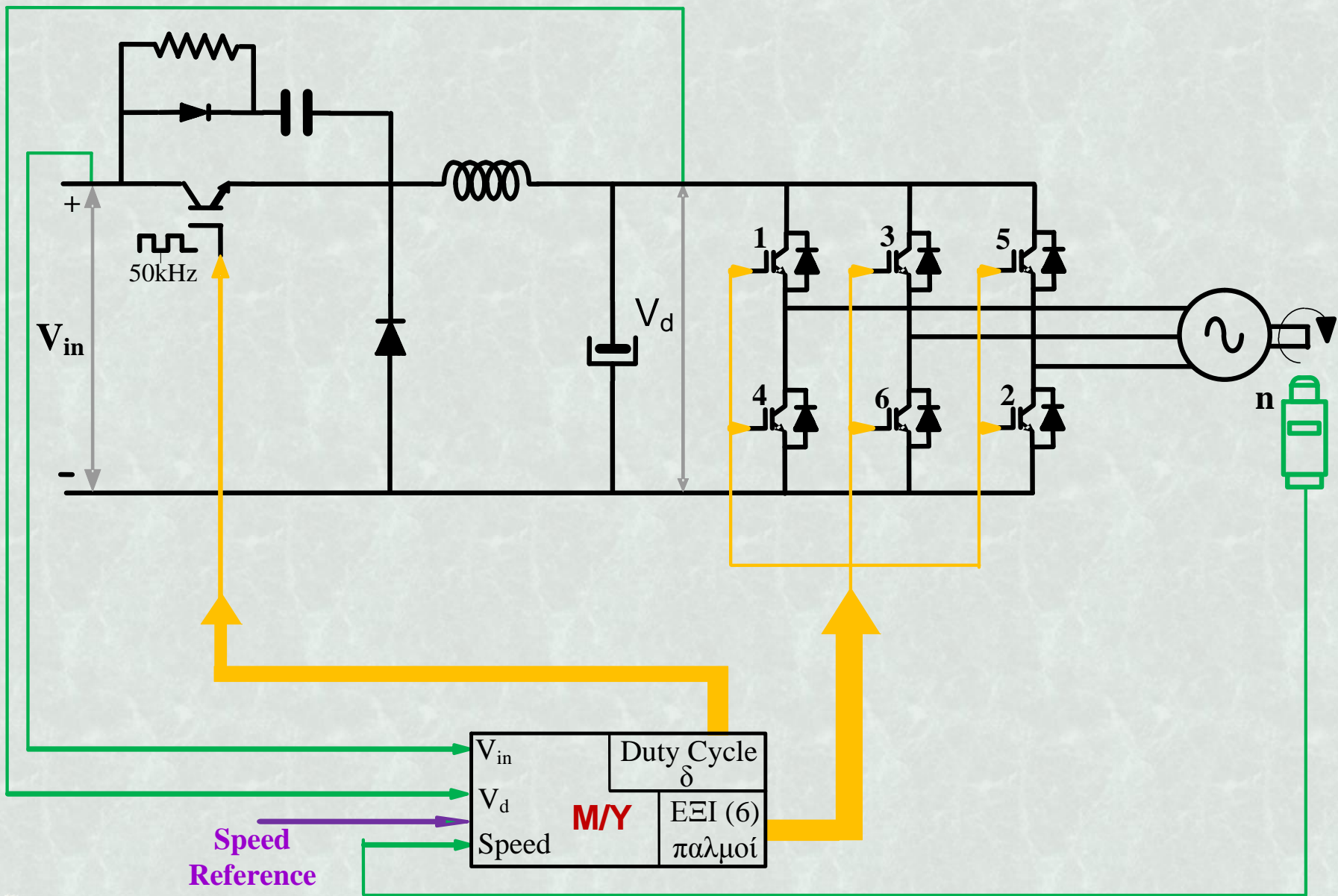
- ✍ Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο ανάβει και σβήνει για 180° .
- ✍ Κάθε ακροδέκτης εξόδου συνδέεται εναλλάξ στο θετικό ή τον αρνητικό πόλο της πηγής τροφοδοσίας.
- ✍ Επιτυγχάνεται τριφασική έξοδος λόγω καθυστέρησης 120° μεταξύ των παλμών έναυσης κάθε κλάδου.
- ✍ Τα περιττά πολλαπλάσια της 3ης αρμονικής δεν εμφανίζονται στην πολική τάση.
- ✍ Ρύθμιση συχνότητας όχι όμως και της ενεργού τιμής της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου.



Κυματομορφές τάσεων των στοιχείων

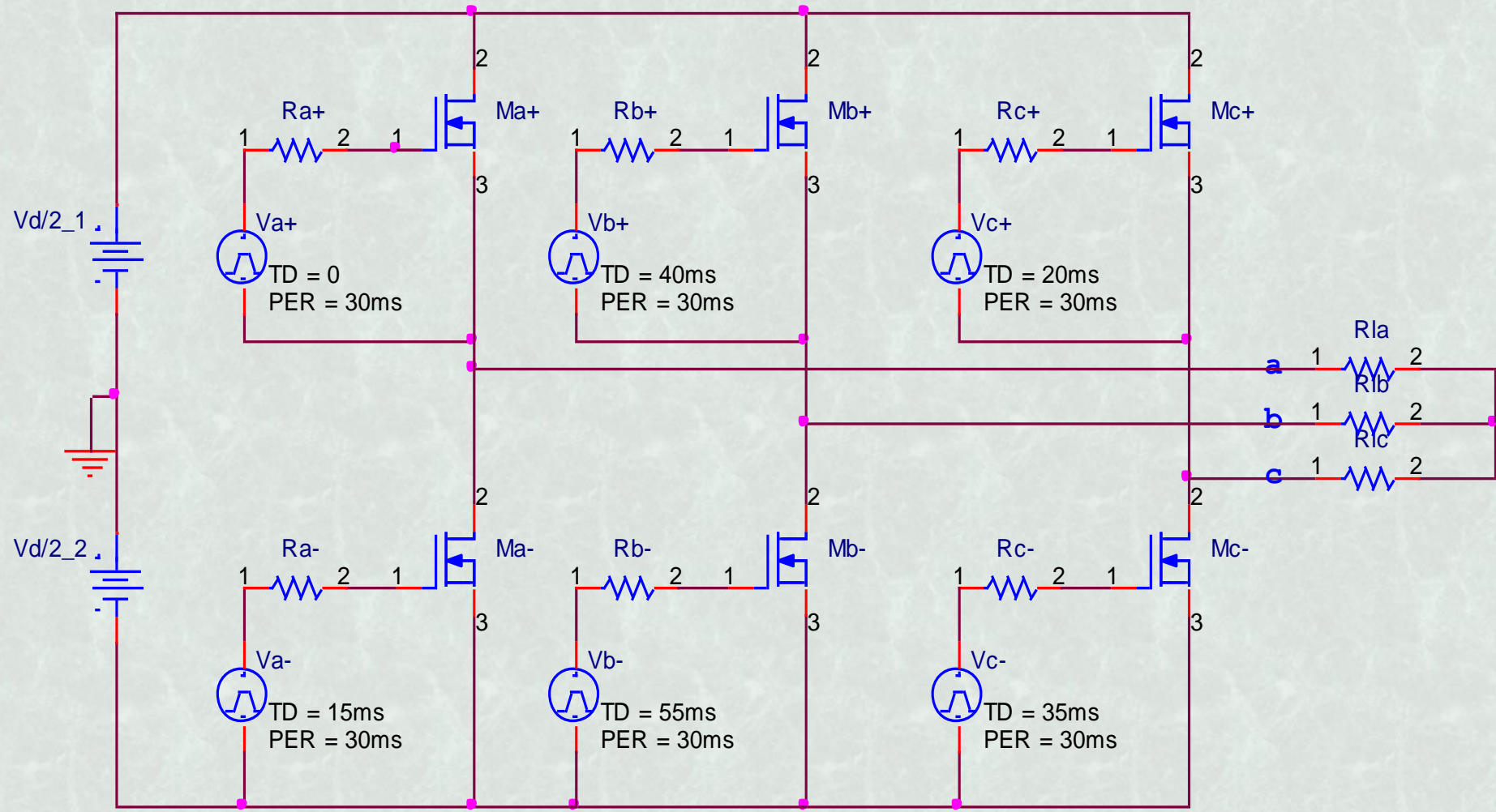


ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ



Σύστημα ρύθμισης στροφών Α.Μ.

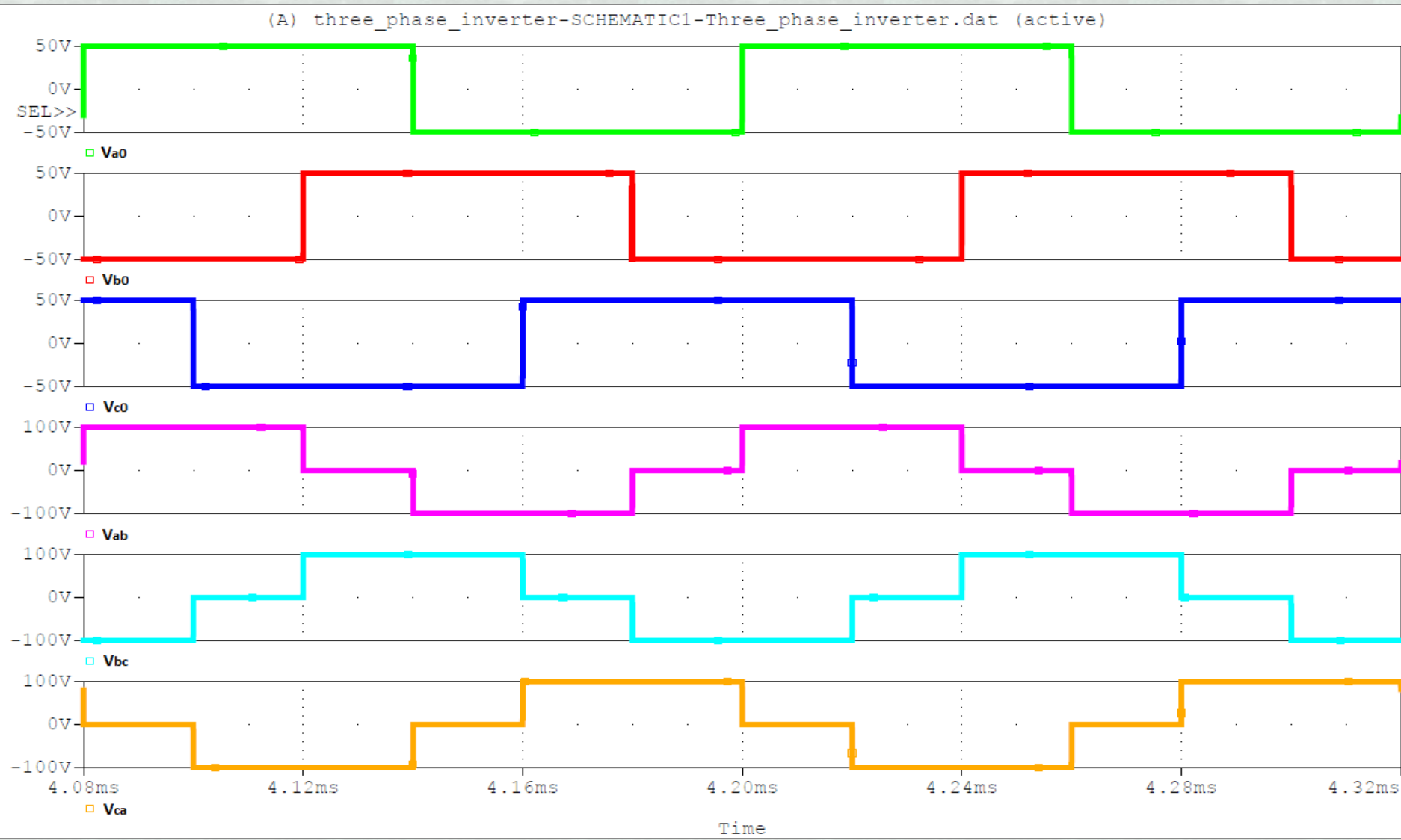
Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό φορτίο)



Κυκλωματικό διάγραμμα



Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανσίστορ (ωμικό φορτίο)



Κυματομορφές τάσεων



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ II

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ
(DC-AC Converters ή INVERTERS)

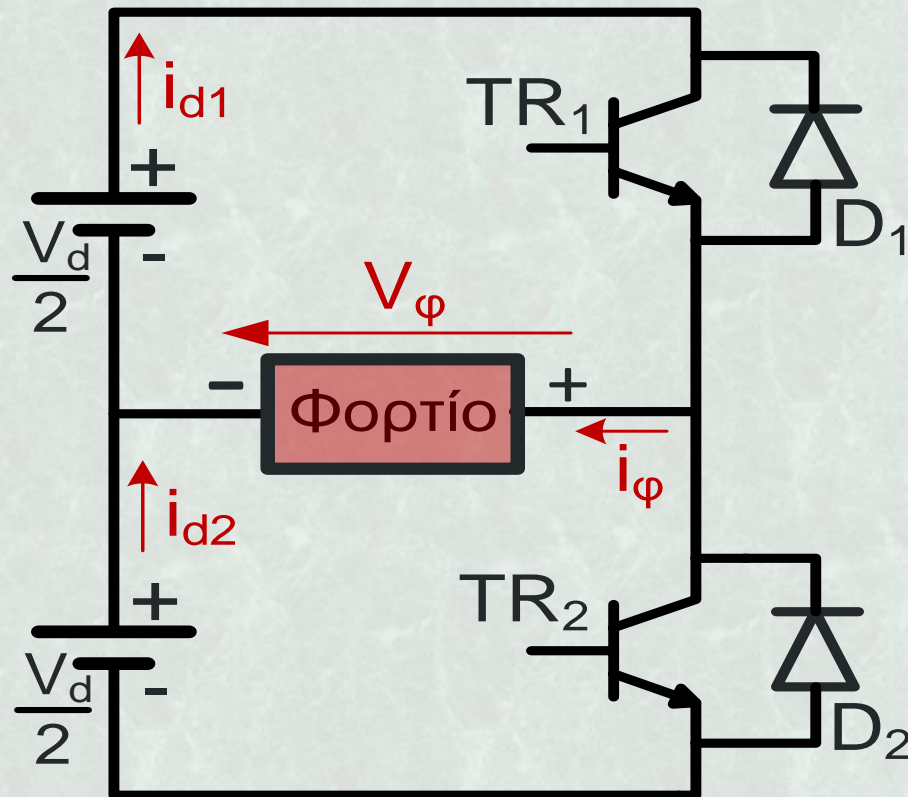
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΤ-ΕΤ
(Single Phase Inverters)

Έλεγχος με S.P.W.M.

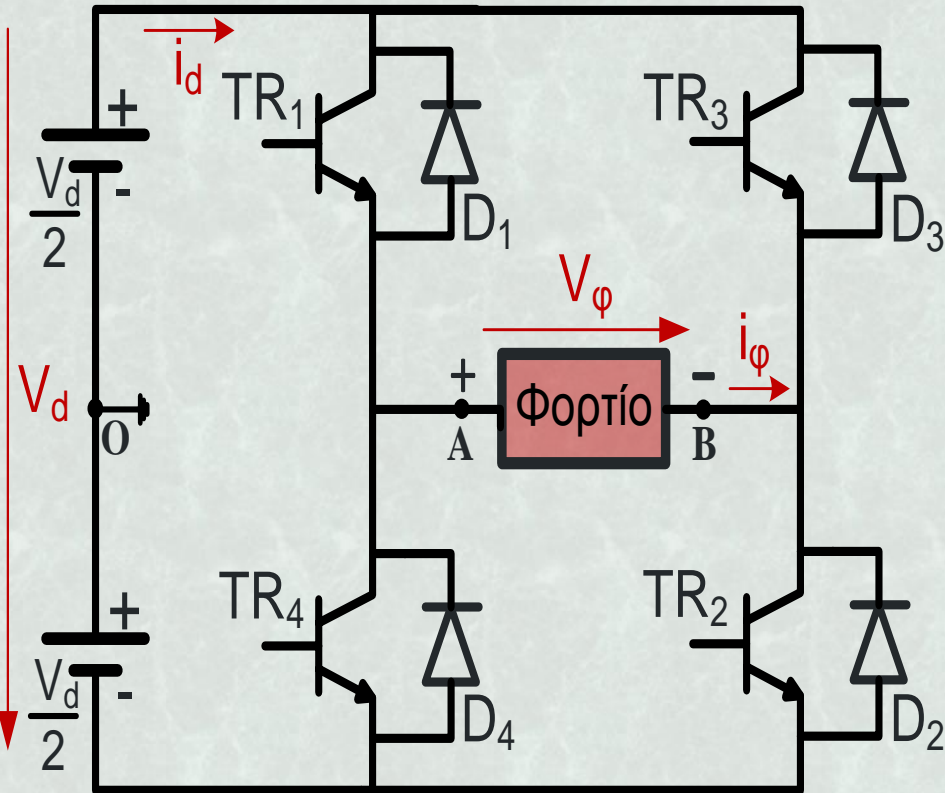


ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ

Μονοφασικός αντιστροφέας ελεγχόμενος με S.P.W.M.



Μονοφασικός αντιστροφέας τάσης σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας (Half-Bridge Inverter)



Μονοφασικός αντιστροφέας τάσης σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (Full-Bridge Inverter)

Κάθε ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο επιτρέπει τη ροή ρεύματος, όταν αυτό άγει, κατά τη μία φορά, ενώ η αντιπαράλληλη διάδος επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση.

ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

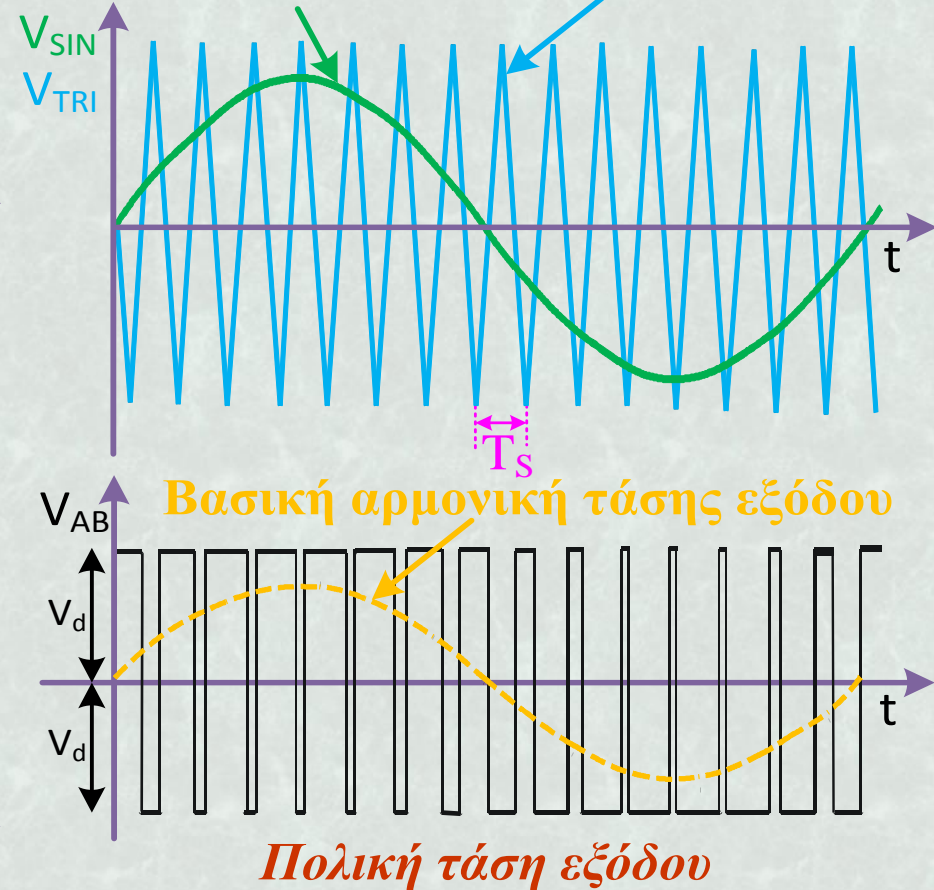
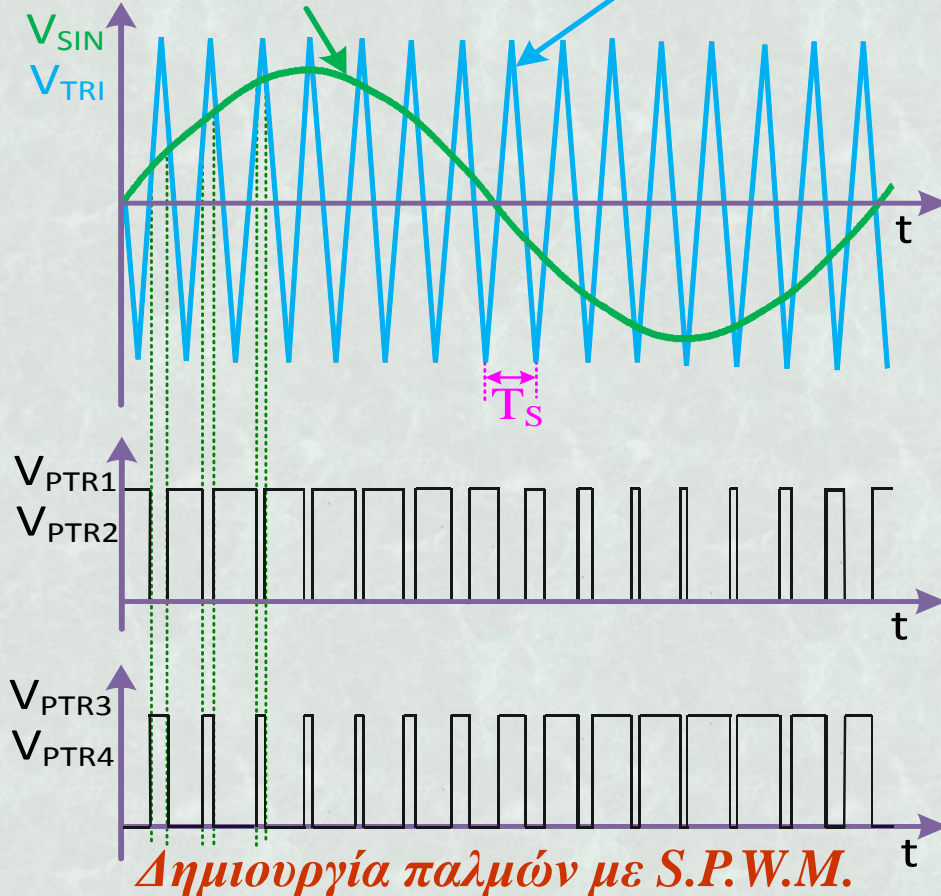
Sinusoidal Pulse Width Modulation (S.P.W.M.)

Ημίτονο
αναφοράς

Τρίγωνο
αναφοράς

Ημίτονο
αναφοράς

Τρίγωνο
αναφοράς



✎ Στο φορέα (τρίγωνο αναφοράς) διατηρείται σταθερό το πλάτος.

✎ Ρύθμιση συχνότητας και ενεργού τιμής της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου με μεταβολή της συχνότητας και του πλάτους του ημιτόνου αναφοράς.

Sinusoidal Pulse Width Modulation (S.P.W.M.)

ΟΡΙΣΜΟΙ

A_{\sin} = Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς.

A_{tri} = Το πλάτος της κυματομορφής φορέα.

F_{\sin} = Η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς.

F_{tri} = Η συχνότητα της κυματομορφής φορέα.

M_A = Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους.

M_F = Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας.

$$M_A = \frac{A_{\sin}}{A_{\text{tri}}}$$

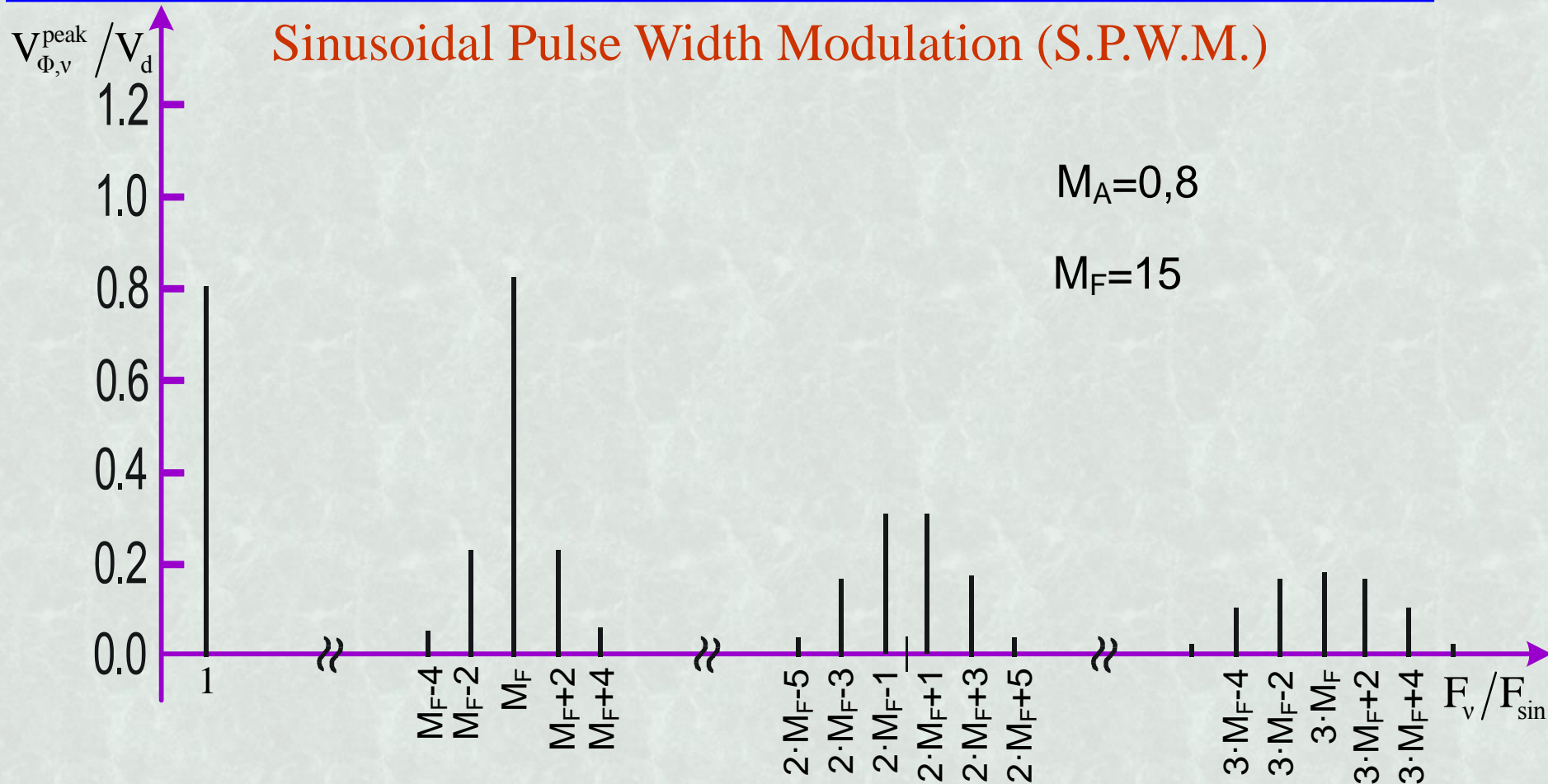
Πλάτος της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου:

$$V_{\Phi,1}^{\text{peak}} = M_A \cdot V_d \quad \text{γιά} \quad M_A \leq 1$$

$$M_F = \frac{F_{\text{tri}}}{F_{\sin}}$$



Sinusoidal Pulse Width Modulation (S.P.W.M.)



Πρώτη ομάδα: $F_v = F_{tri} \pm 2 \cdot (v-1) \cdot F_{sin} = [M_F \pm 2 \cdot (v-1)] \cdot F_{sin} \quad v=1, 2, 3, \dots$

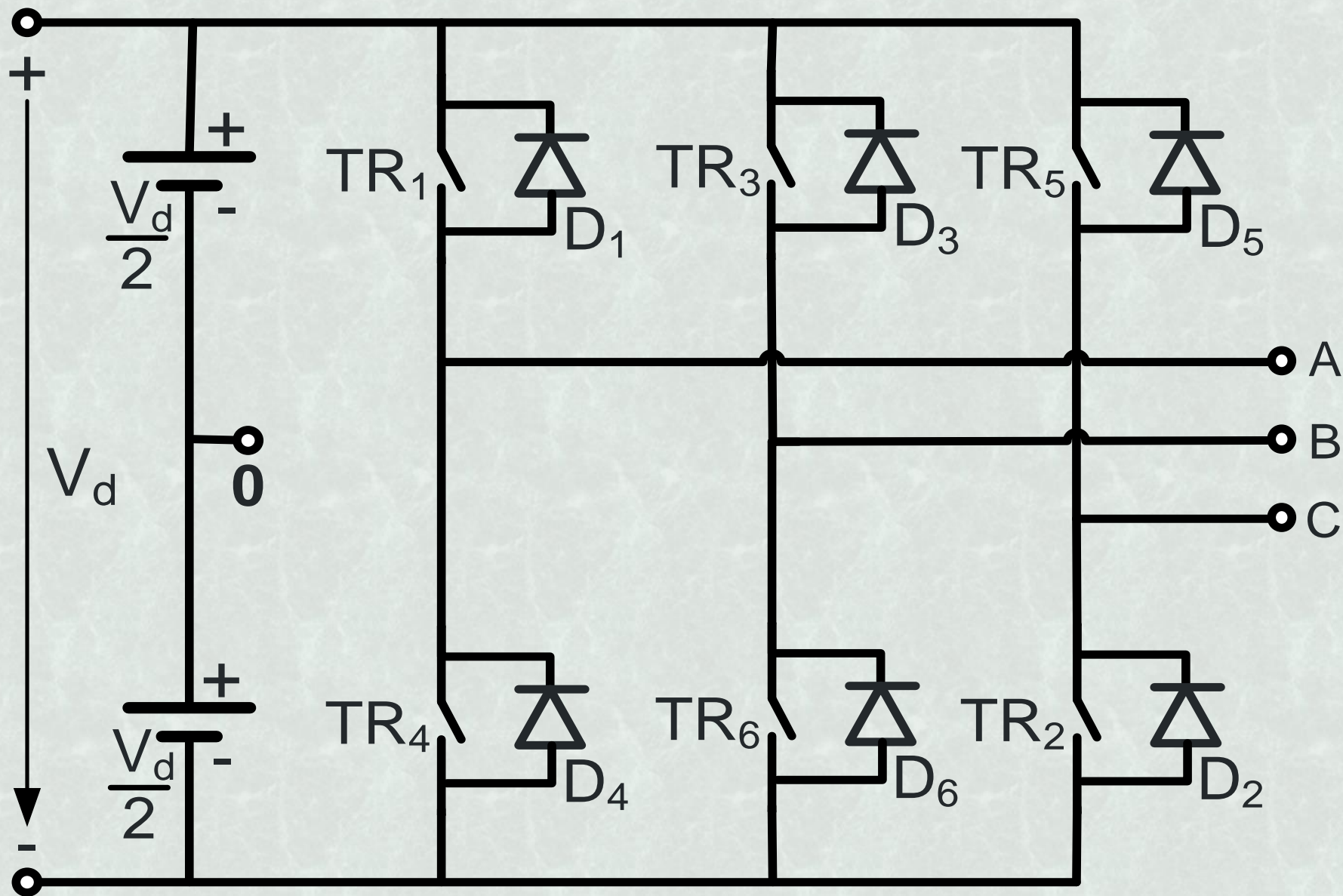
Δεύτερη ομάδα: $F_v = 2 \cdot F_{tri} \pm (2 \cdot v - 1) \cdot F_{sin} = [2 \cdot M_F \pm (2 \cdot v - 1)] \cdot F_{sin}$

Τρίτη ομάδα: $F_v = 3 \cdot F_{tri} \pm 2 \cdot (v-1) \cdot F_{sin} = [3 \cdot M_F \pm 2 \cdot (v-1)] \cdot F_{sin}$

Τέταρτη ομάδα: $F_v = 4 \cdot F_{tri} \pm (2 \cdot v - 1) \cdot F_{sin} = [4 \cdot M_F \pm (2 \cdot v - 1)] \cdot F_{sin}$

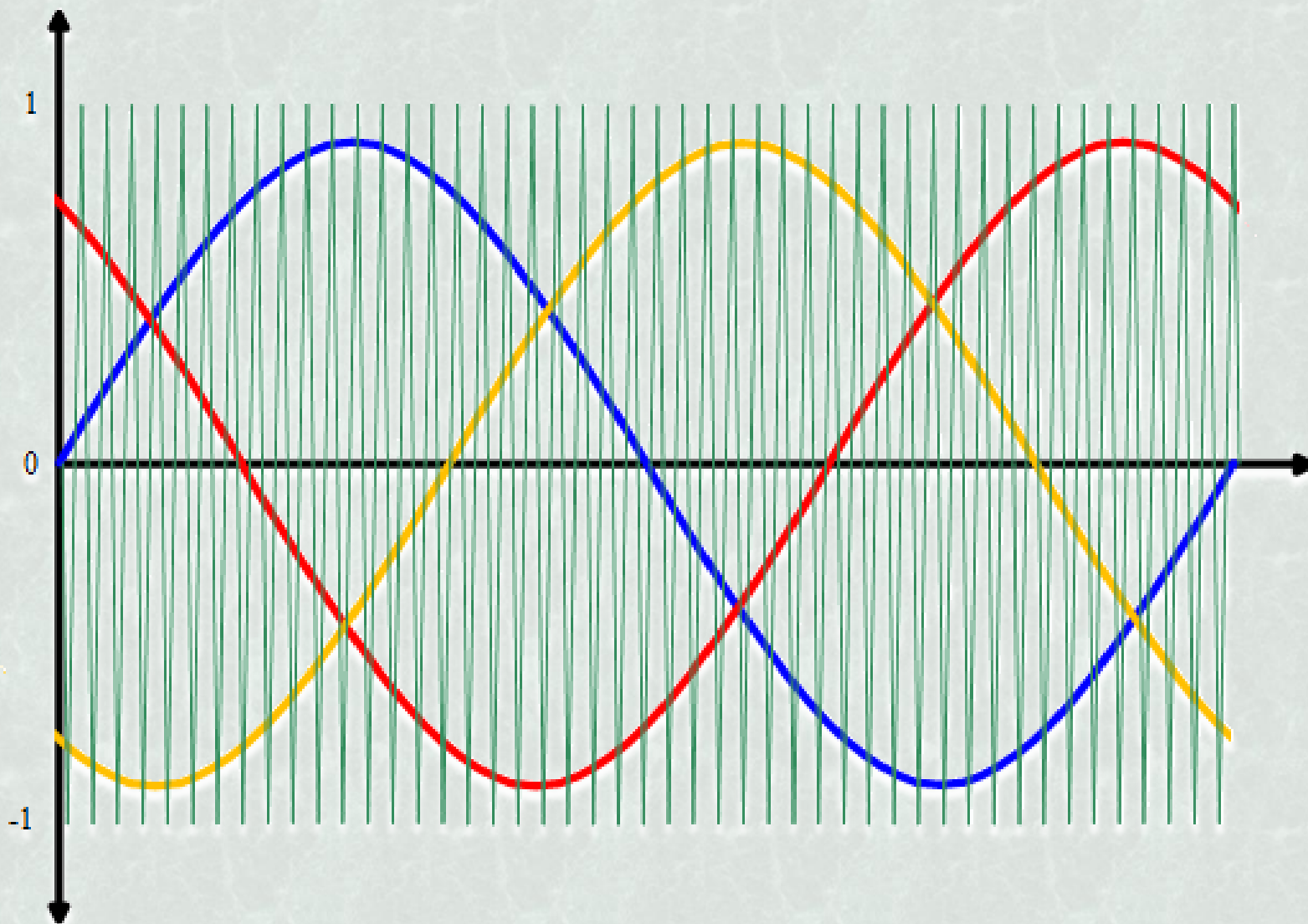


ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ



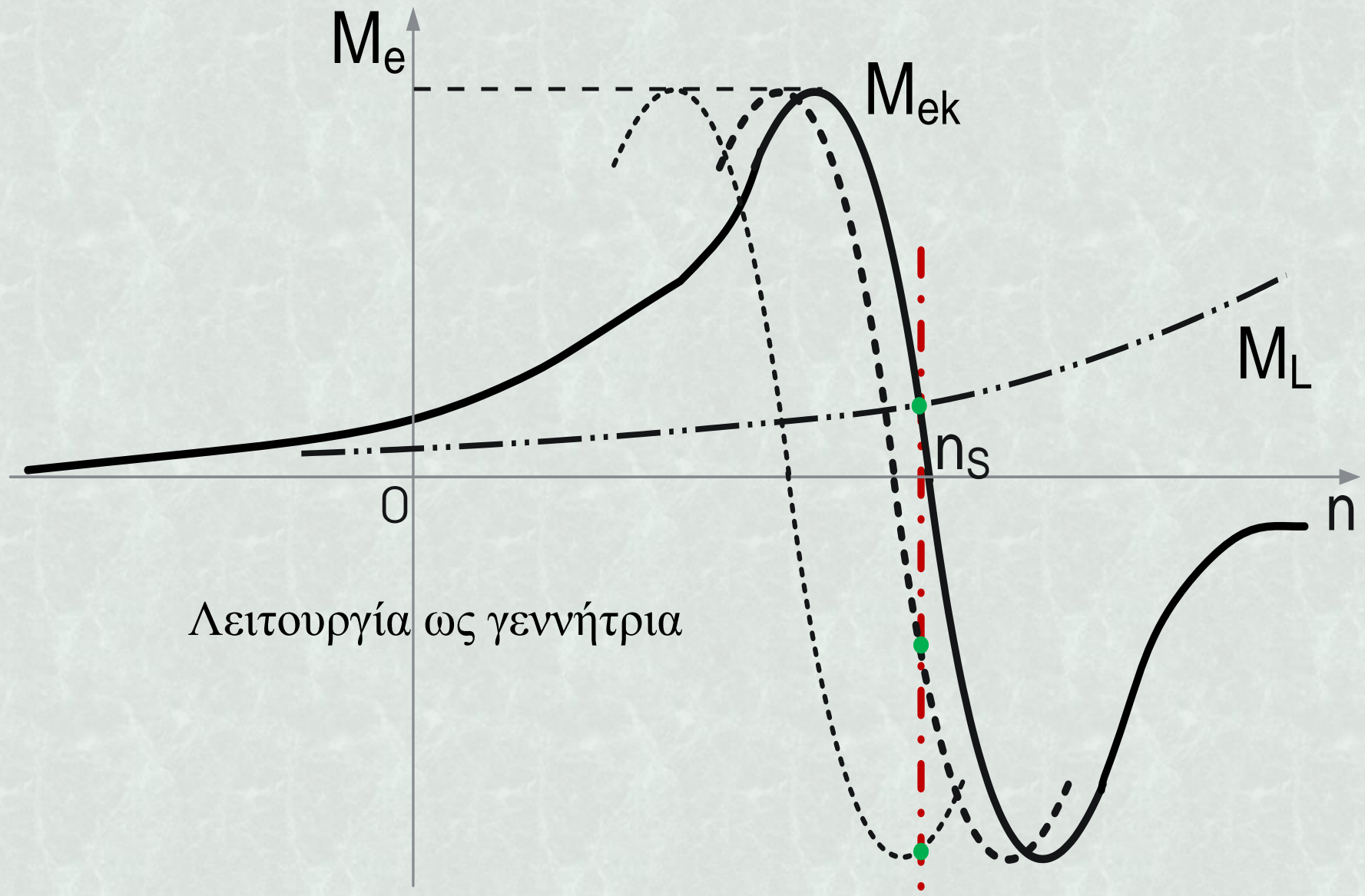
Κυκλωματικό διάγραμμα





Ημίτονα και τρίγωνο αναφοράς για SPWM

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΤΆ ΤΗΝ ΠΕΔΗΣΗ



Χαρακτηριστική ροπής-στροφών Α.Μ.



Τέλος Διάλεξης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Εμμανουήλ Τατάκης 2014. Εμμανουήλ Τατάκης. «Ηλεκτρονικά Ισχύος II. Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Εναλλασσόμενη Τάση». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.upatras.gr/courses/EE898/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι εικόνες των διαλέξεων δημιουργήθηκαν από τους κ. Τατάκη Εμμανουήλ, Συρίγο Στυλιανό στα πλαίσια του έργου «Ανοικτά ακαδημαϊκά μαθήματα Πανεπιστημίου Πατρών» εκτός κι αν αναφέρεται διαφορετικά παρακάτω:



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

