



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, HIRPWM κλπ)
- Ρύθμιση στροφών τριφασικής ασύγχρονης μηχανής



# Διάλεξη 13η

## 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)



# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

✍ Μεταβολή του πλάτους της βασικής αρμονικής της πολικής τάσης εξόδου:

$$V_{LL,1}^{\text{peak}} = \sqrt{3} \cdot M_A \cdot \frac{V_d}{2} \Rightarrow V_{LL,1}^{\text{rms}} = \frac{\sqrt{6}}{4} \cdot M_A \cdot V_d$$

✍ Αν η τάση τροφοδοσίας προέρχεται από τριφασικό σύστημα 400V και  $M_A=1$ :

$$V_d = \sqrt{2} \cdot 400 = 565,68V \Rightarrow V_{LL,1}^{\text{rms}} = 346,41V$$

↪ ατελής εκμετάλλευση της τάσης εισόδου ➡ απαιτείται λύση

↪ Βελτιωμένες μέθοδοι διαμόρφωσης του εύρους των παλμών.

✍ Επίσης, υπάρχουν δύο είδη ημιτονοειδούς PWM:

↪ Ασύγχρονη SPWM (Asynchronous SPWM).

↪ Σύγχρονη SPWM (Synchronous SPWM).

✍ **Ασύγχρονη SPWM**

➤ Η συχνότητα του φορέα (τριγώνου) παραμένει σταθερή.

➤ Η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς (ημίτονου) μεταβάλλεται.

✍ **Σύγχρονη SPWM**

➤ Ο λόγος διαμόρφωσης συχνότητας  $M_F$  διατηρείται σταθερός, καθώς η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς (ημίτονο) μεταβάλλεται.

↪ Η συχνότητα του φορέα ( τρίγωνο) πρέπει να μεταβάλλεται μαζί με τη συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς (ημίτονο). **ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ.**



## Ασύγχρονη SPWM

- Εμφανίζονται υποαρμονικές (αρμονικές σε συχνότητες μικρότερες από τη βασική αρμονική), κυρίως όταν  $M_F$  είναι χαμηλός ( $< 21$ ).
- Αν τροφοδοτείται ασύγχρονος κινητήρας (επαγωγικό φορτίο), υποαρμονικές σε συχνότητες κοντά στη μηδενική συχνότητα προκαλούν μεγάλα ρεύματα και ταλαντώσεις στη ροπή.
- ↳ Αποφεύγεται η χρήση της σε χαμηλούς  $M_F$ . Θα πρέπει  $F_{tri} \gg F_{sin}$ .

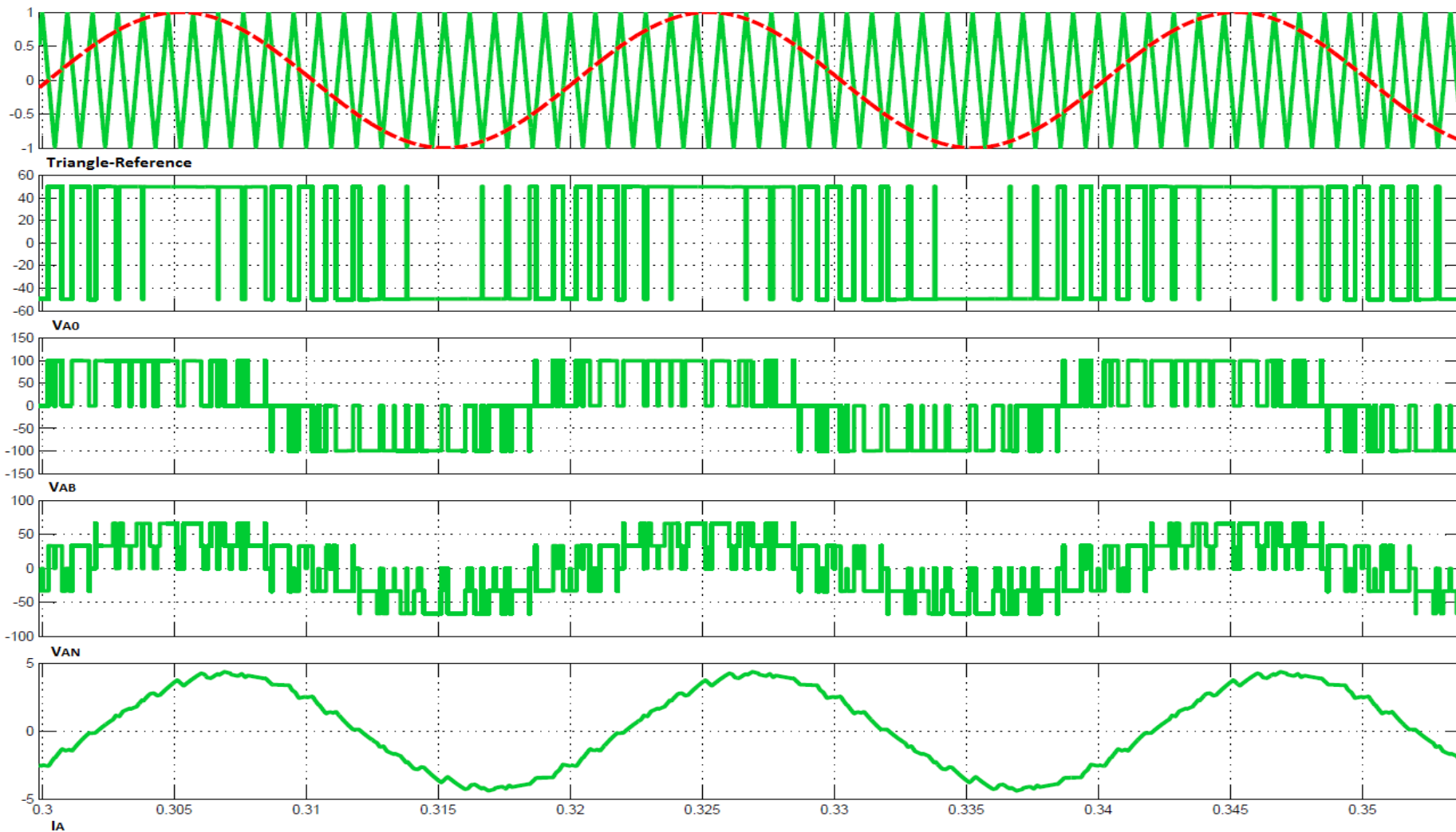


## Σύγχρονη SPWM

- Απαιτείται ακέραιη τιμή του  $M_F$ .
- Ο συντελεστής  $M_F$  πρέπει να είναι περιττός ακέραιος:
  - ↳ Συμμετρία ως προς τις  $90^\circ$  και αντισυμμετρία ως προς τις  $180^\circ$ .
  - ↳ Συνεπώς, **ΜΟΝΟ** περιττές αρμονικές στην έξοδο.
- Στους τριφασικούς αντιστροφείς τάσης ο  $M_F$  πρέπει να είναι και περιττό πολλαπλάσιο του 3 (περιττή συμμετρία σε όλες τις φάσεις – κοινός φορέας).
- **ΕΞΑΙΡΕΣΗ:** μονοφασικοί αντιστροφείς τάσης με μονοπολική τάση εξόδου:
  - ↳ Επιλέγεται άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $M_F$ .
- Αποκλείεται η εμφάνιση υποαρμονικών. Οι πλευρικές συχνότητες της πρώτης ομάδας αρμονικών συμπίπτουν με τη βασική αρμονική.



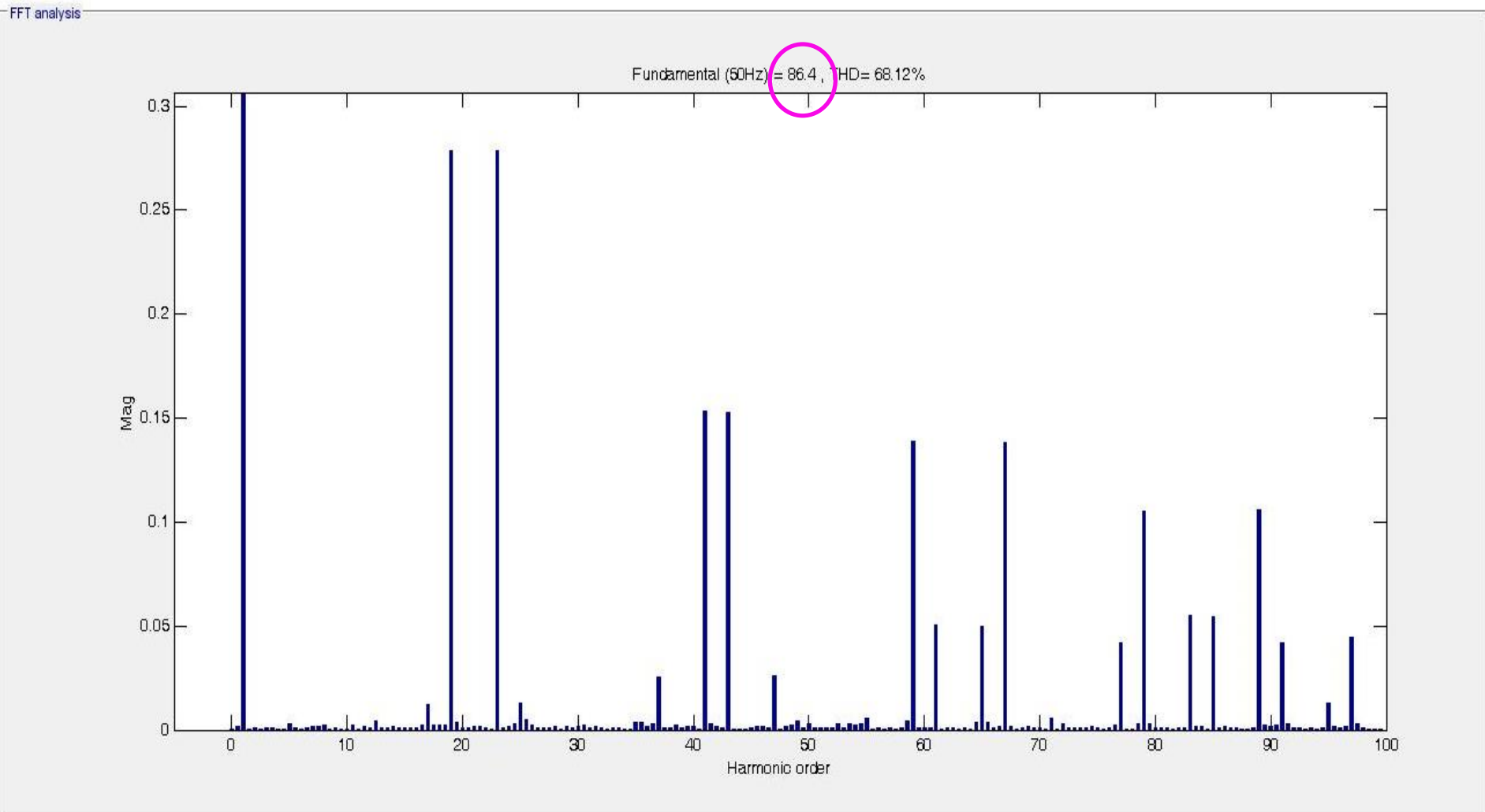
# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



**Κλασική SPWM,  $M_F=21$ ,  $M_A=1,0$**

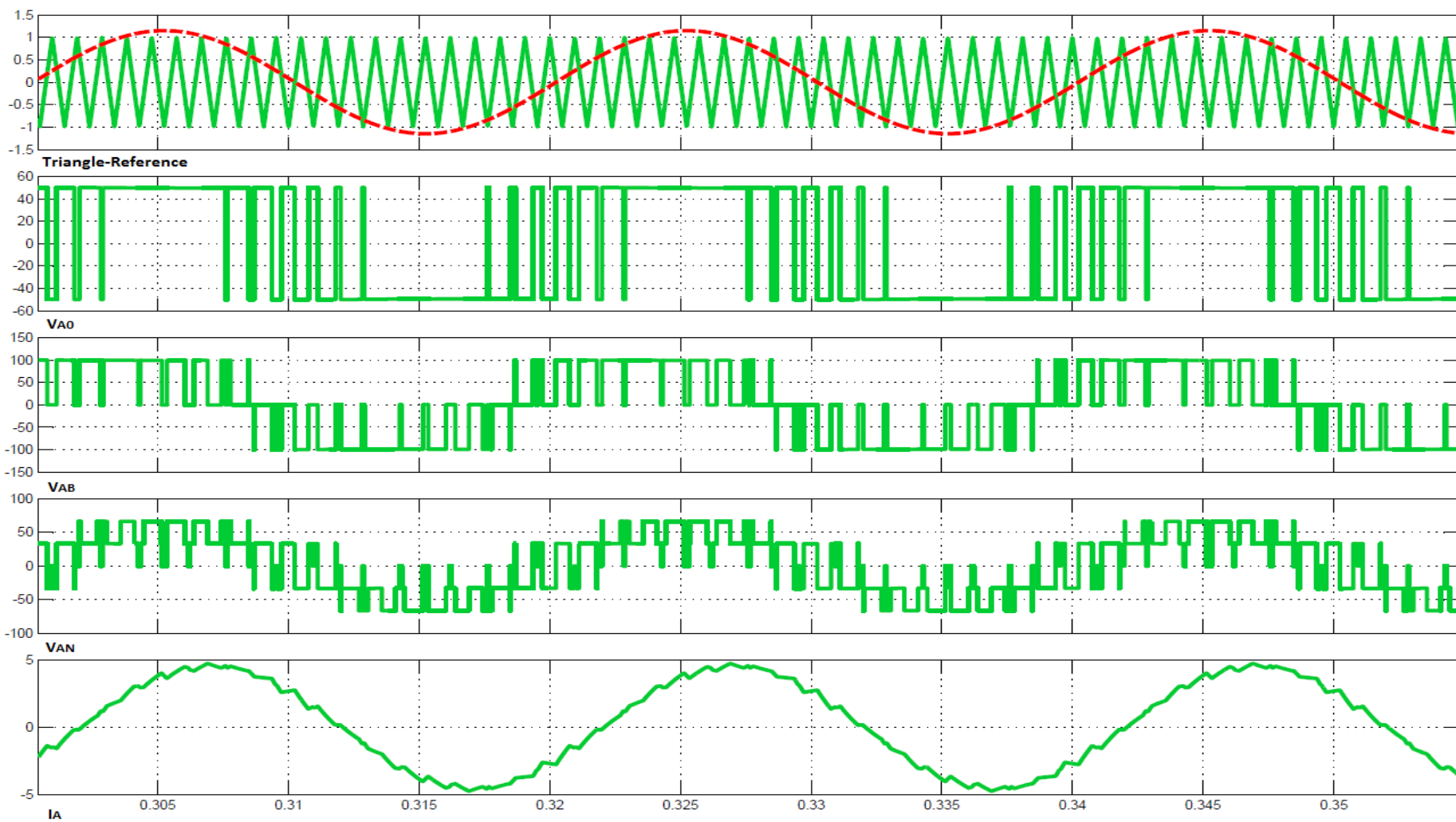


# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



**Κλασική SPWM,  $M_F=21$ ,  $M_A=1,0$**

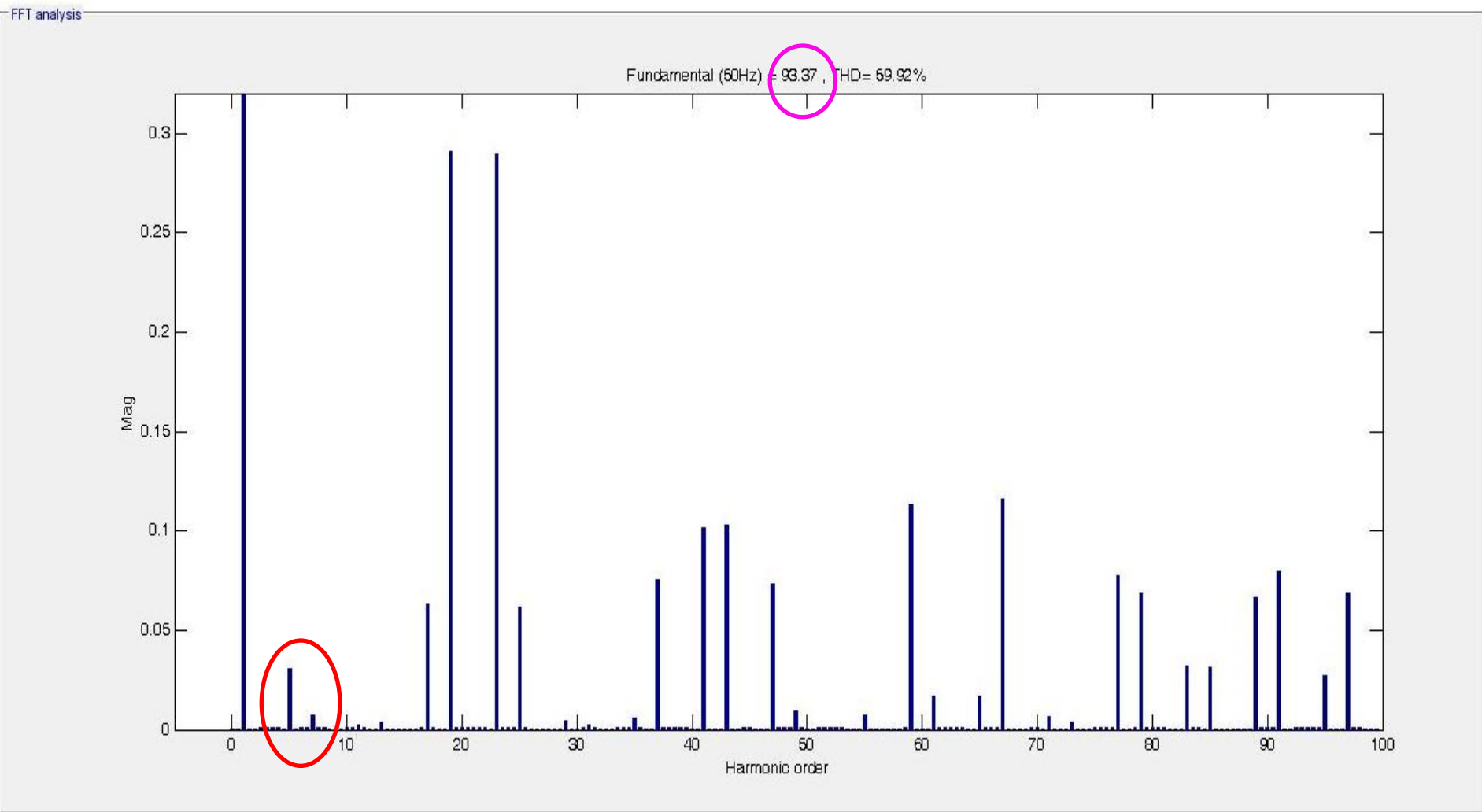
# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



**Κλασική SPWM,  $M_F=21$ , Υπερδιαμόρφωση**






# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



**Κλασική SPWM,  $M_F=21$ , Υπερδιαμόρφωση**

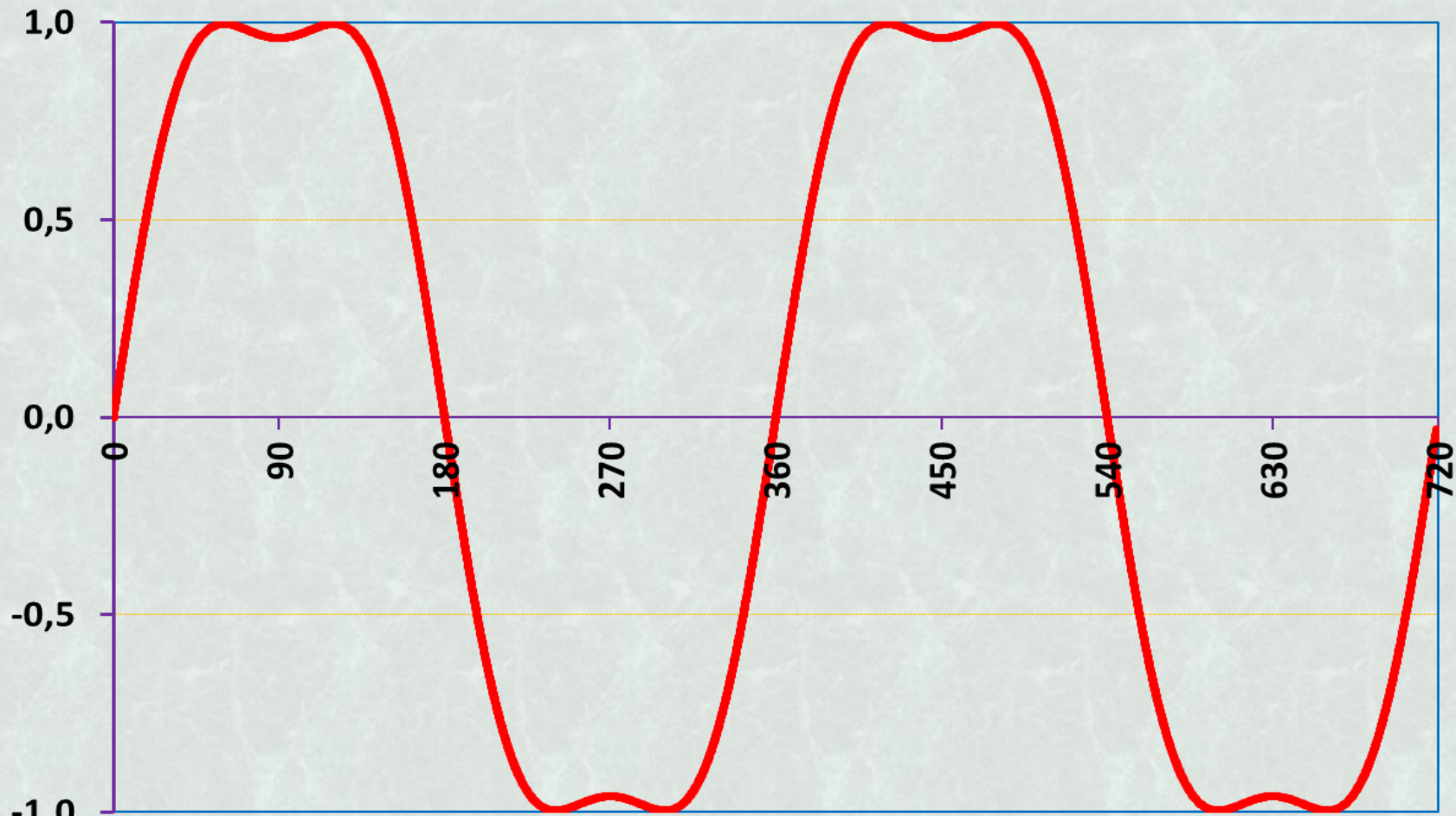
# ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

-  Έχουν ως βάση την κλασική SPWM. **Αλλάζει η μορφή της κυματομορφής αναφοράς ή της κυματομορφής φορέα.**
-  Προσδίδουν **βελτιωμένα χαρακτηριστικά** όσον αφορά:
  - Την εκμετάλλευση της τάσης εισόδου:
    - ↳ Αύξηση του πλάτους της βασικής αρμονικής.
  - Το αρμονικό περιεχόμενο που παρουσιάζουν:
    - ↳ Βελτίωση του συντελεστή συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (T.H.D.).
-  Έχουν προταθεί, στη βιβλιογραφία οι ακόλουθες μέθοδοι (για τριφασικούς, κυρίως, μετατροπείς τάσης):
  - Η τεχνική PWM με έγχυση τρίτης αρμονικής (*Third-Harmonic Injection PWM Technique*).
  - Η τεχνική PWM με έγχυση αρμονικών (*Harmonic Injection PWM Technique*).
    - ↳ Έγχυση τρίτης και ένατης αρμονικής.
  - Τροποποιημένη Τεχνική SPWM (*Modified SPWM Technique*)
  - Τροποποιημένη Τεχνική SPWM με μείωση των διακοπτικών απωλειών (*Modified SPWM Technique with decreasing switching losses*).

# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

✍ Η τεχνική PWM με έγχυση τρίτης αρμονικής (*Third-Harmonic Injection PWM Technique*)

➤ Η τριγωνική κυματομορφή (φορέας) συγκρίνεται με την ακόλουθη κυματομορφή αναφοράς:  $\psi(\omega \cdot t) = A_{\sin} \cdot [1,15 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 0,19 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t)]$

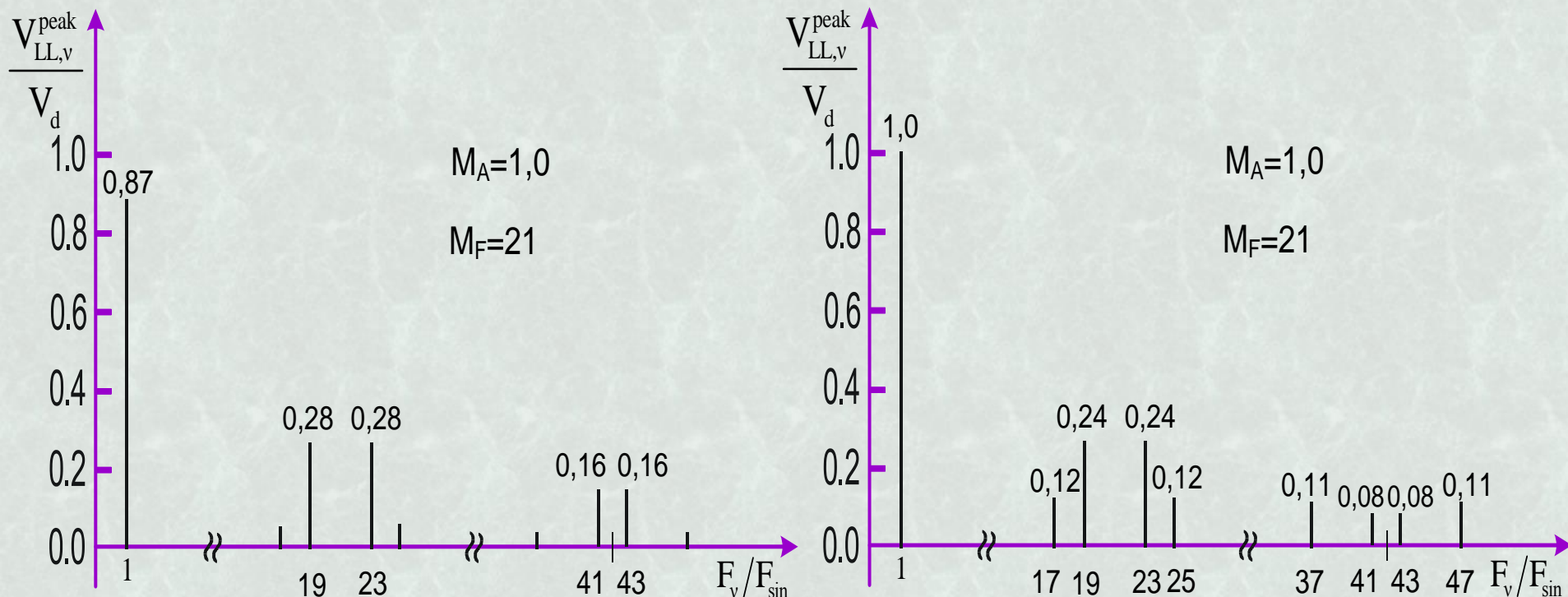


*Τεχνική PWM με έγχυση τρίτης αρμονικής*

# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ



## Η τεχνική PWM με έγχυση τρίτης αρμονικής (*Third-Harmonic Injection PWM Technique*)



**Σύγκριση του αρμονικού περιεχομένου της πολικής τάσης εξόδου (peak τιμή) της κλασσικής SPWM με την προαναφερθείσα τεχνική, για  $M_F=21$ .**



Αύξηση του πλάτους της βασικής αρμονικής.



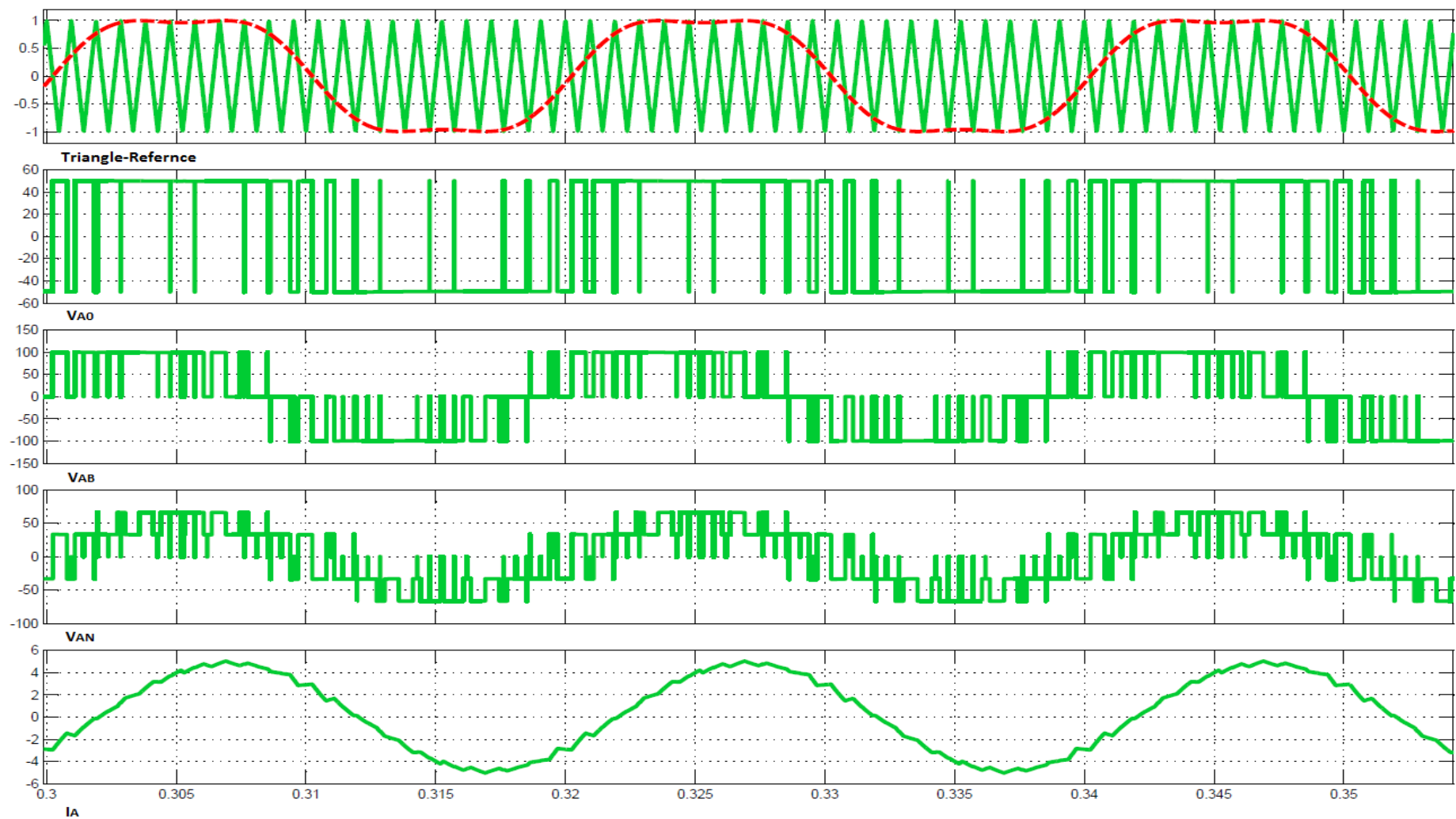
Πρακτική υλοποίηση σχετικά απλή.



Εμφάνιση τρίτης αρμονικής 17% μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου και του ουδέτερου του δικτύου, σε αντίθεση με κλασσική SPWM (0% 3<sup>η</sup>).

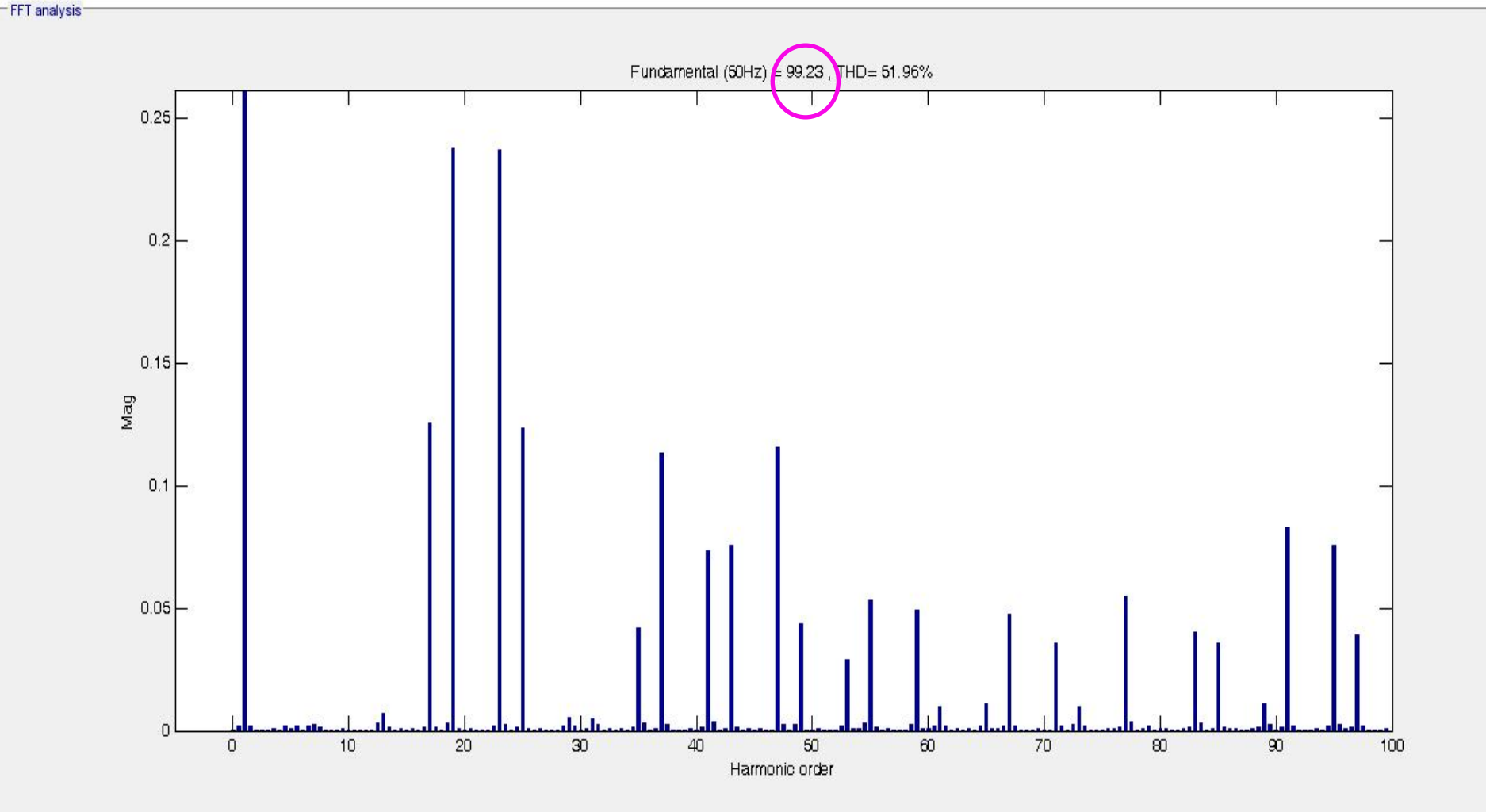


# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



***3<sup>rd</sup> Harmonic SPWM,  $M_F=21, M_A=1,0$***

# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



**3<sup>rd</sup> Harmonic SPWM,  $M_F=21$ ,  $M_A=1,0$**



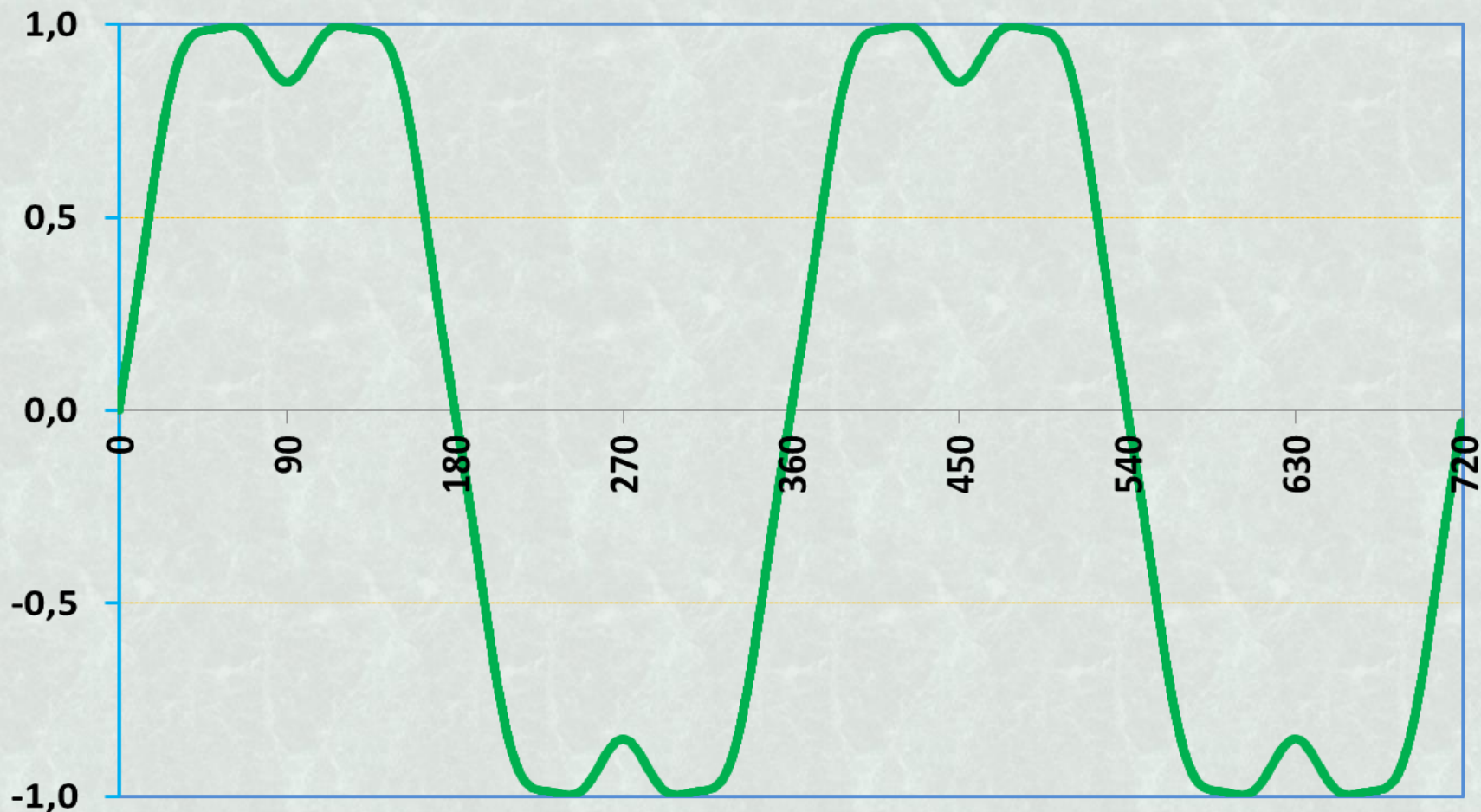
# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ



Η τεχνική PWM με έγχυση αρμονικών (*Harmonic Injection PWM Technique*)

- Η τριγωνική κυματομορφή (φορέας) συγκρίνεται με την ακόλουθη κυματομορφή αναφοράς (έγχυση 3<sup>ης</sup> και 9<sup>ης</sup> αρμονικής):

$$\psi(\omega \cdot t) = A_{\sin} \cdot [1,15 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 0,19 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) - 0,029 \cdot \sin(9 \cdot \omega \cdot t)]$$

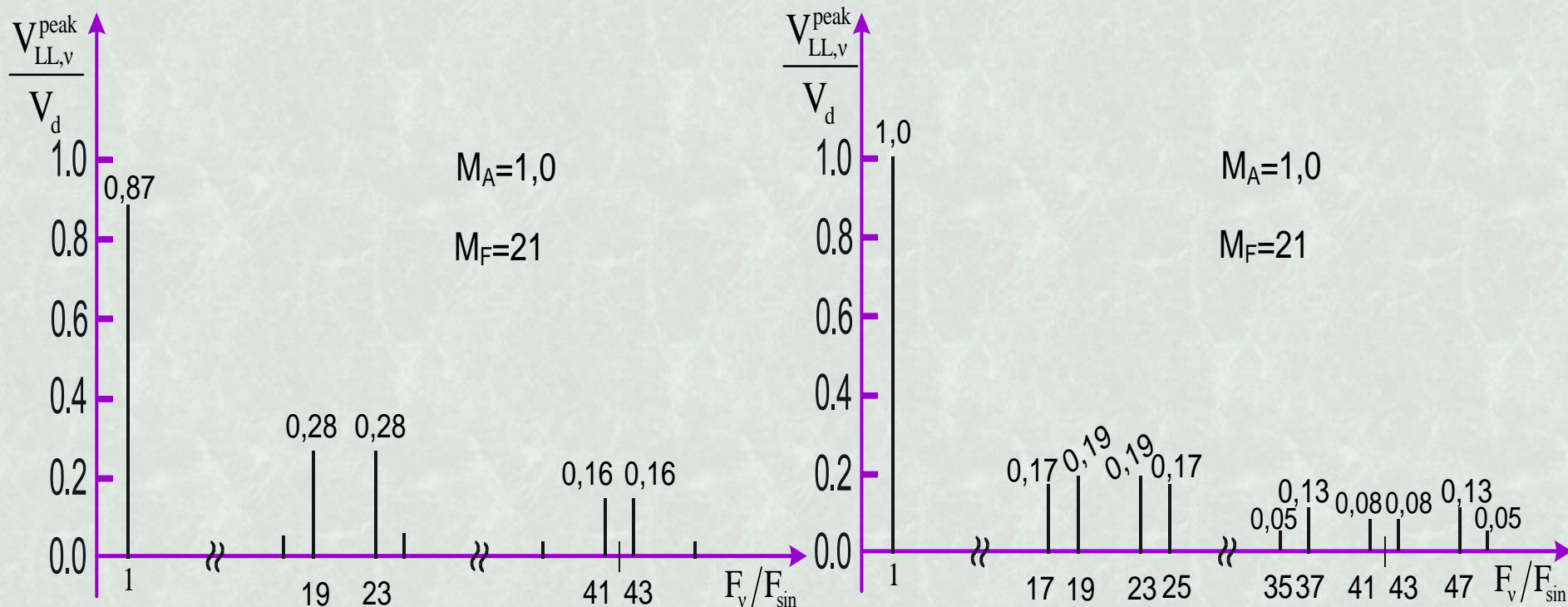


*Τεχνική PWM με έγχυση τρίτης και ένατης αρμονικής*

# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ



## Η τεχνική PWM με έγχυση αρμονικών (*Harmonic Injection PWM Technique*)



**Σύγκριση του αρμονικού περιεχομένου της πολικής τάσης εξόδου (peak τιμή) της κλασικής SPWM με την προαναφερθείσα τεχνική, για  $M_F=21$ .**

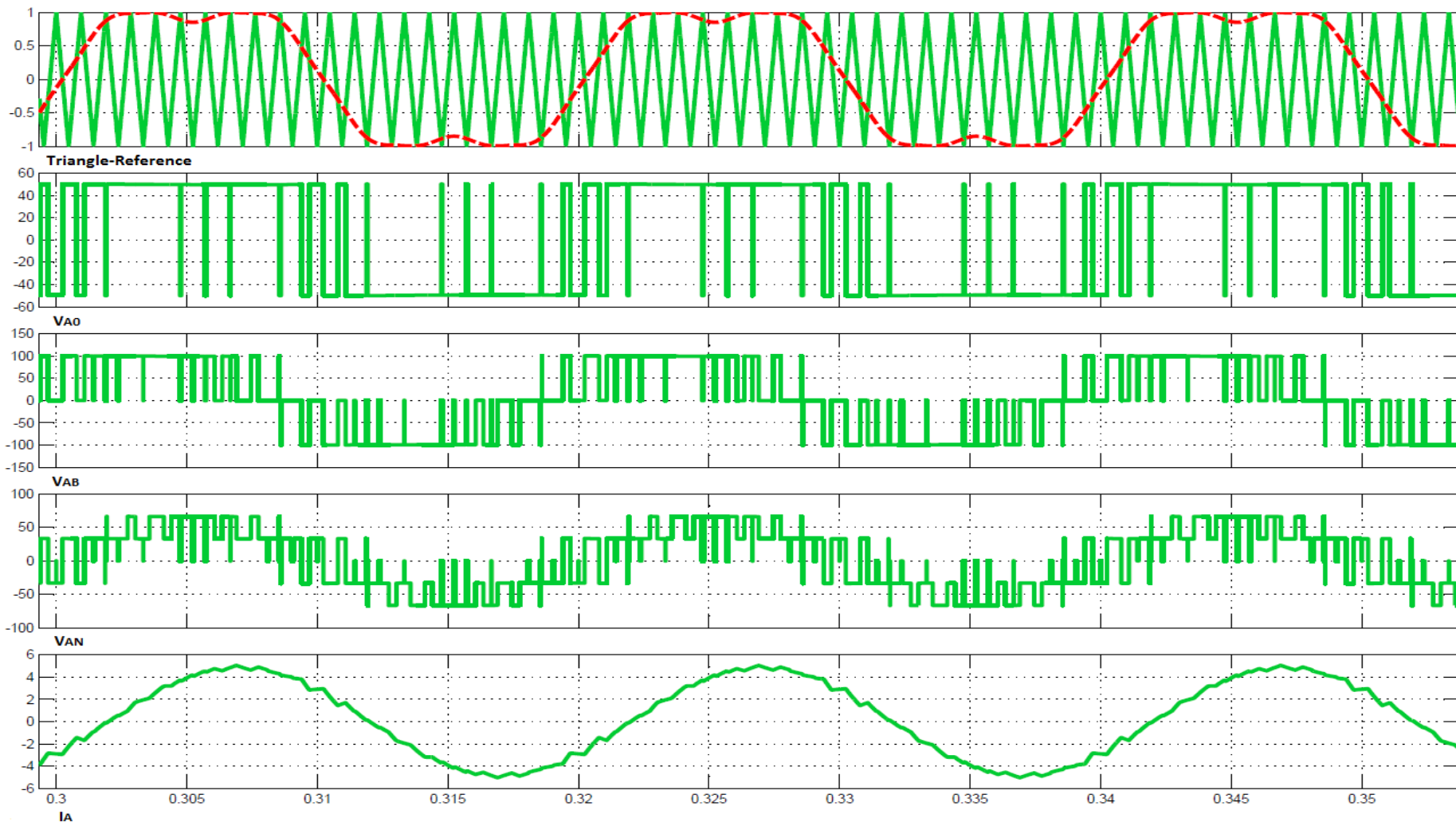
Αύξηση του πλάτους της βασικής αρμονικής.

Πρακτική υλοποίηση σχετικά απλή.

Εμφάνιση τρίτης αρμονικής μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου και του ουδέτερου του δικτύου, σε αντίθεση με κλασική SPWM (0% 3<sup>η</sup>).

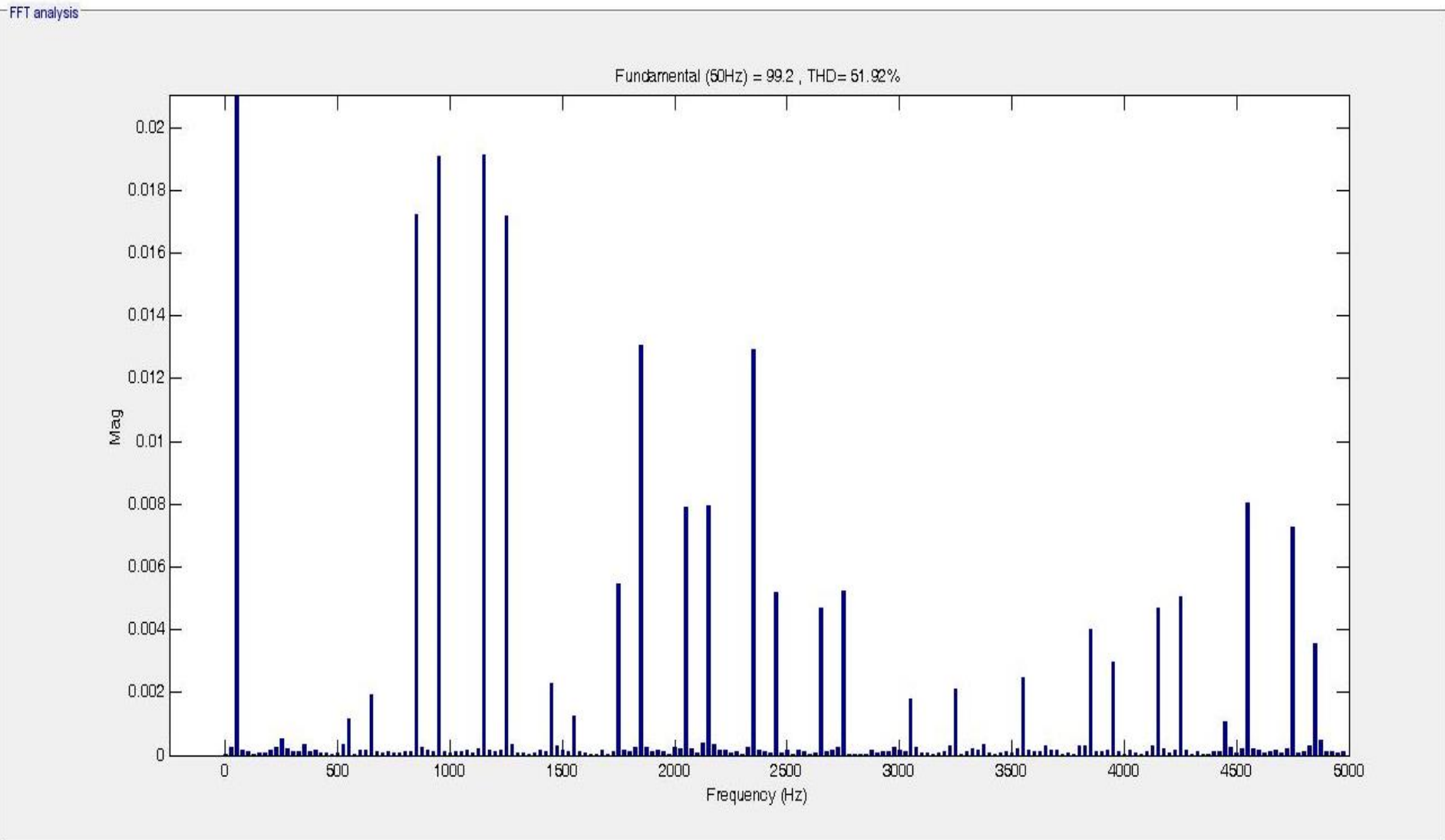


# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



**Harmonic SPWM,  $M_F=21$ ,  $M_A=1,0$**

# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Matlab/Simulink, του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με τρανζίστορ (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)



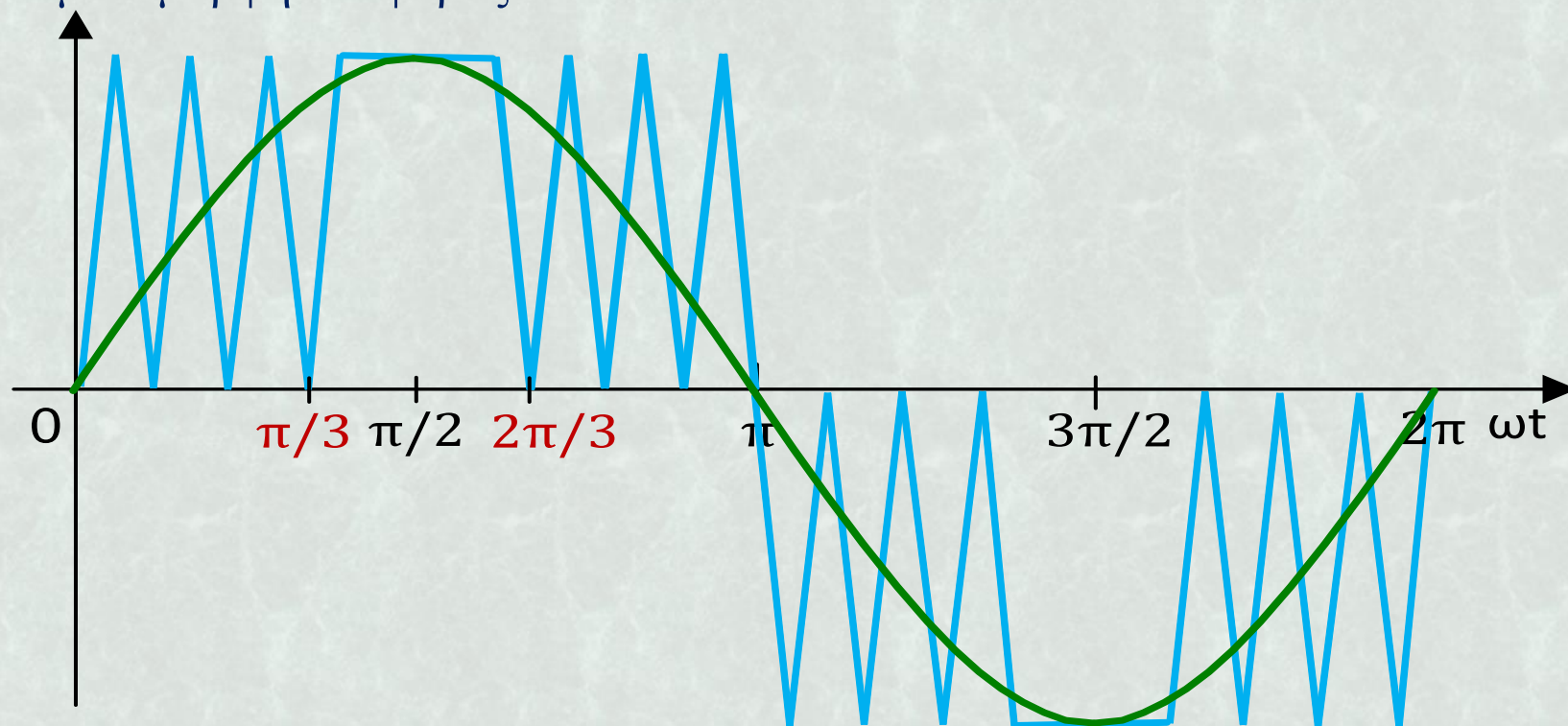
***Harmonic SPWM,  $M_F=21, M_A=1,0$***

# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ



## Η Τροποποιημένη Τεχνική SPWM (Modified SPWM Technique)

- Η κυματομορφή φορέα του σχήματος συγκρίνεται με μία ημιτονοειδή κυματομορφή αναφοράς:



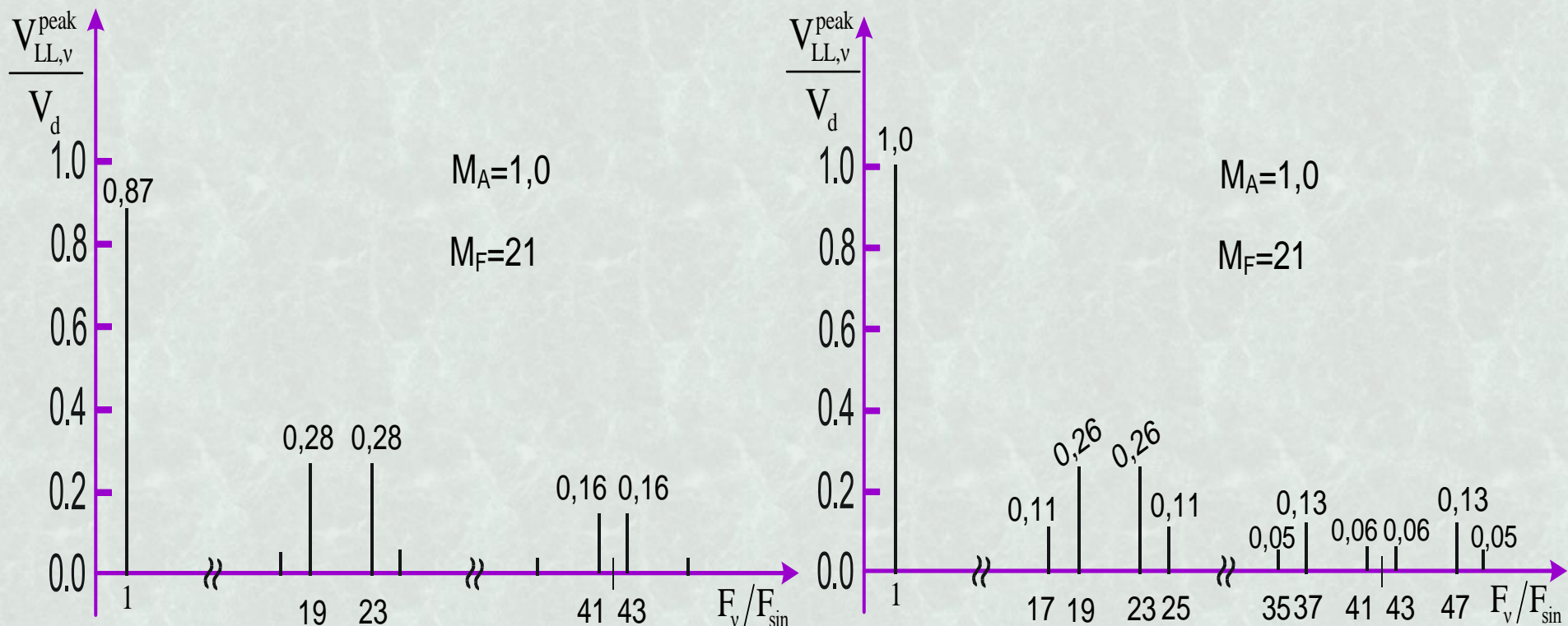
- Μόνο στις πρώτες και οι τελευταίες  $60^\circ$  μιας ημιπεριόδου του ημιτόνου (που είναι τριγωνικής μορφής για τον φορέα) συγκρίνονται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή αναφοράς.
- Για τριφασικούς αντιστροφείς απαιτούνται 3 κυματομορφές φορέα και 3 αναφοράς, με διαφορά φάσης  $120^\circ$ .



# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ



## Η Τροποποιημένη Τεχνική SPWM (Modified SPWM Technique)



**Σύγκριση του αρμονικού περιεχομένου της πολικής τάσης εξόδου (peak τιμή) της κλασσικής SPWM με την προαναφερθείσα τεχνική, για  $M_F=21$ .**

Αύξηση του πλάτους της βασικής αρμονικής.

Πρακτική υλοποίηση μάλλον πολύπλοκη.

Εμφάνιση τρίτης αρμονικής 21% μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου και του ουδέτερου του δικτύου, σε αντίθεση με κλασσική SPWM (0% 3<sup>η</sup>).



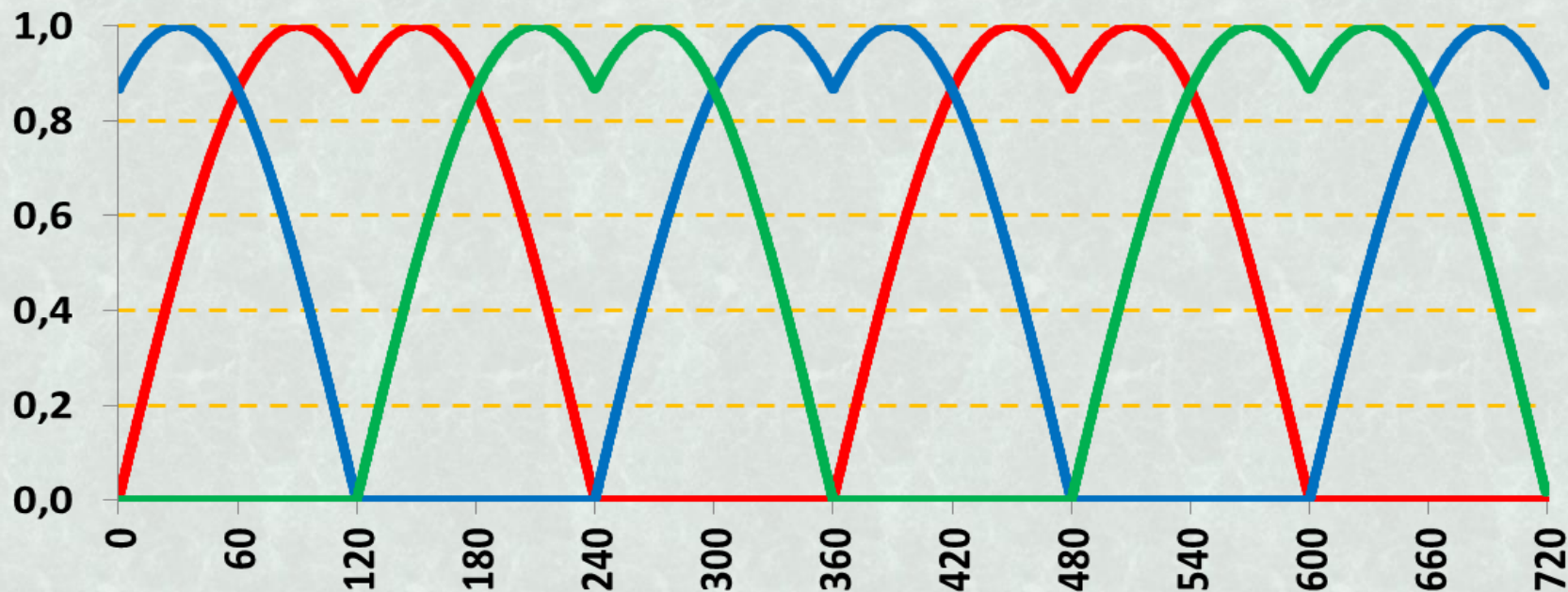
# ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

Η Τροποποιημένη Τεχνική SPWM με μείωση των διακοπτικών απωλειών (*Modified SPWM Technique with decreasing switching losses*).

➤ Η τριγωνική κυματομορφή (φορέας) συγκρίνεται με την ακόλουθη κυματομορφή αναφοράς (για τον πρώτο κλάδο):

$$y(\omega \cdot t) = \begin{cases} A_{\sin} \cdot \sin(\omega \cdot t), & 0^\circ < \omega \cdot t < 120^\circ \\ A_{\sin} \cdot \sin(\omega \cdot t - 60^\circ), & 120^\circ < \omega \cdot t < 240^\circ \\ 0, & 240^\circ < \omega \cdot t < 360^\circ \end{cases}$$

➤ Για τους υπόλοιπους δύο κλάδους η κυματομορφή αναφοράς έχει διαφορά φάσης  $120^\circ$  και  $240^\circ$  αντίστοιχα.



# Σύγκριση αντιστροφών τάσης με διαφορετική μέθοδο παλμοδότησης

	Αντιστροφέας έξι παλμών	Ημιτονοειδής PWM
Στοιχεία ισχύος	Θυρίστορ στην ανορθωτική διάταξη ή δίοδοι και μετατροπέας DC/DC. Συνήθως GTO ή IGBT ή MOSFET στο κύκλωμα του αντιστροφέα.	Δίοδοι στην ανορθωτική διάταξη. Συνήθως IGBT ή MOSFET στο κύκλωμα του αντιστροφέα.
Μέγιστη Ισχύς	Δεκάδες ή εκατοντάδες kW	Δεκάδες ή εκατοντάδες kW
Δυνατότητα δυναμικής πέδησης	Ναι	Ναι
Αρμονικές στο φορτίο	Υψηλές. Πιθανότητα δημιουργίας κυματώσεων στη ροπή Α.Μ. σε χαμηλές συχνότητες	Χαμηλές. Μειώνονται όσο η διακοπτική συχνότητα αυξάνει
Αρμονικές στο δίκτυο	Υψηλές, κυρίως οι αρμονικές μικρής τάξεως	Υψηλές
Ακουστικός θόρυβος στη μηχανή	Υπαρκτός	Σχετικά υψηλός σε χαμηλές διακοπτικές συχνότητες
Απόδοση	Υψηλή	Υψηλή, αλλά χαμηλότερη από το μετατροπέα έξι παλμών λόγω διακοπτικών απωλειών



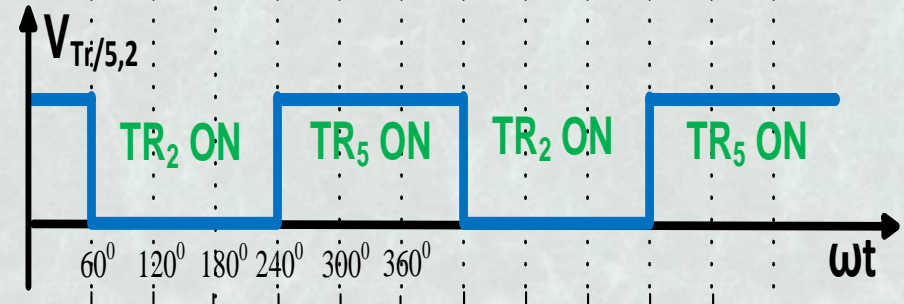
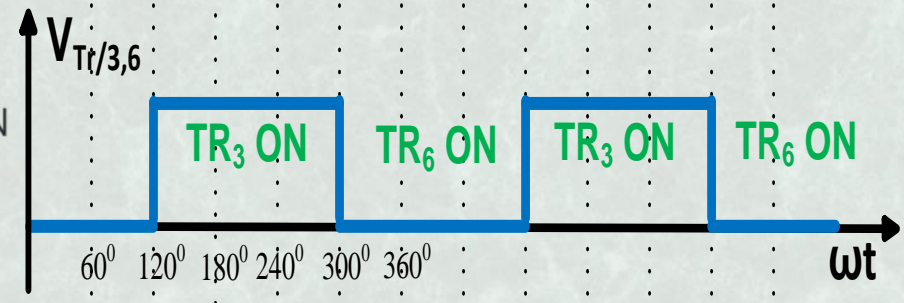
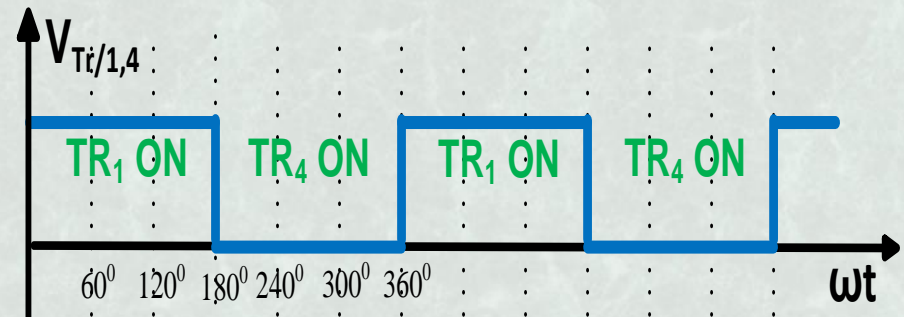
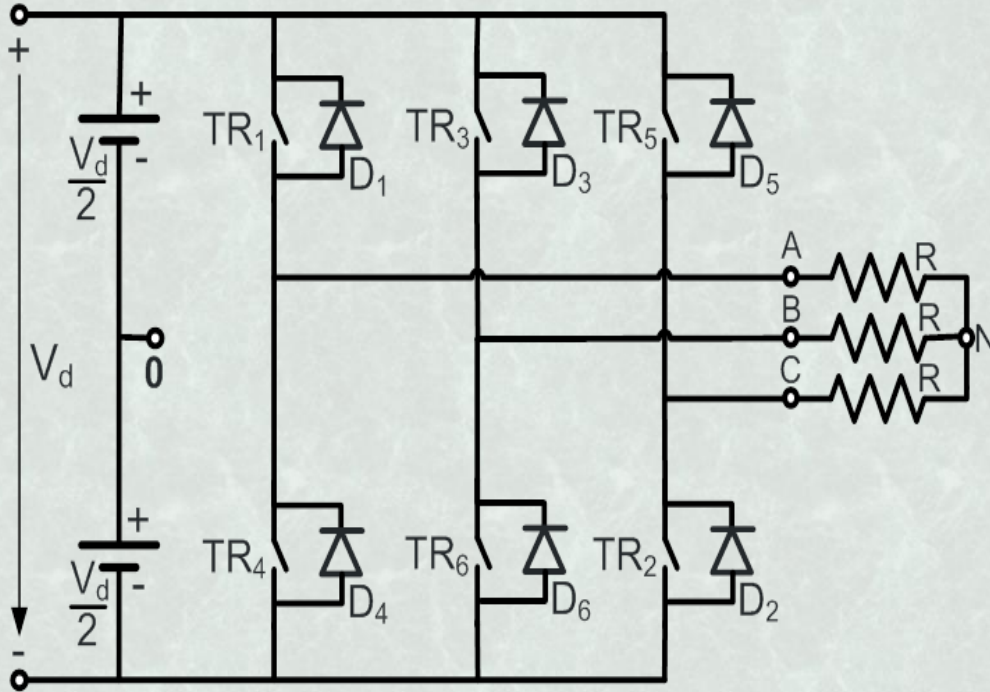






# Ασκήσεις στους αντιστροφείς τάσης

## Άσκηση 5<sup>η</sup> ΛΥΣΗ



$$V_{xN}(t) = V_{x0}(t) - V_{N0}(t)$$

όπου 
$$V_{N0}(t) = \frac{V_{A0}(t) + V_{B0}(t) + V_{C0}(t)}{3}$$

Φάση A					
Φάση B					
Φάση C					



# Ασκήσεις στους αντιστροφείς τάσης

## Άσκηση 5<sup>η</sup> ΛΥΣΗ

$$I_S = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_d}{R} \text{ και } I_{a,rms} = \frac{V_{AN,rms}}{R}$$

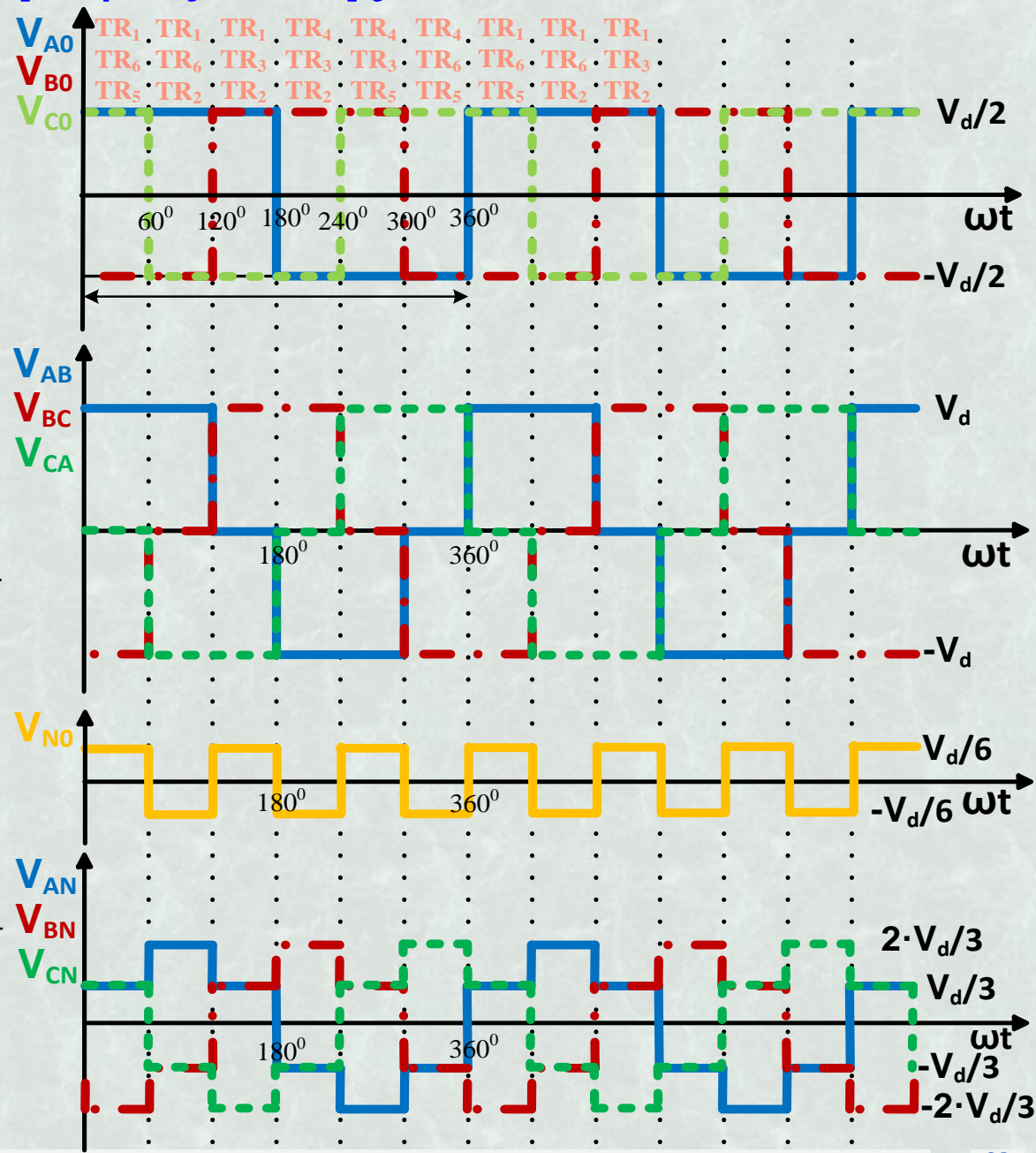
Από τύπο ενεργού τιμής  
βρίσκουμε:

$$V_{AN,rms} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_d$$

$$P_{IN} = V_d \cdot I_S = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_d^2}{R} = 3 \cdot \frac{V_{AN,rms}^2}{R}$$

$$THD_{(V_{AB})} = \sqrt{\frac{\sum_{k=5,7,11,13...}^n V_{k,AB,rms}^2}{V_{1,AB,rms}^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{k=5}^n V_{AB,rms}^2 - V_{1,AB,rms}^2}{V_{1,AB,rms}^2}} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{3}\right)^2 - 1}$$



# Τέλος Διάλεξης



Τέλος Ενότητας



# 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.

