



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ηλεκτρονικά Ισχύος II

Ενότητα 1: Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή  
(DC-DC Converters)

Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής  
Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας  
Υπολογιστών

# Σκοποί ενότητας

- Παρουσίαση και επεξήγηση βασικών τοπολογιών των μετατροπών συνεχούς τάσης σε συνεχή



# Περιεχόμενα ενότητας

- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή με τρανζίστορ ισχύος (Buck, Boost, Buck/Boost).
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή με θυρίστορ (Chopper)
- Ρύθμιση στροφών μηχανής συνεχούς ρεύματος με χρήση των ανωτέρω τοπολογιών



# Διάλεξη 5η

## Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ ανύψωσης τάσης (Boost) – Μέρος 2ο





# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ II

## ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ

(DC-DC Converters)

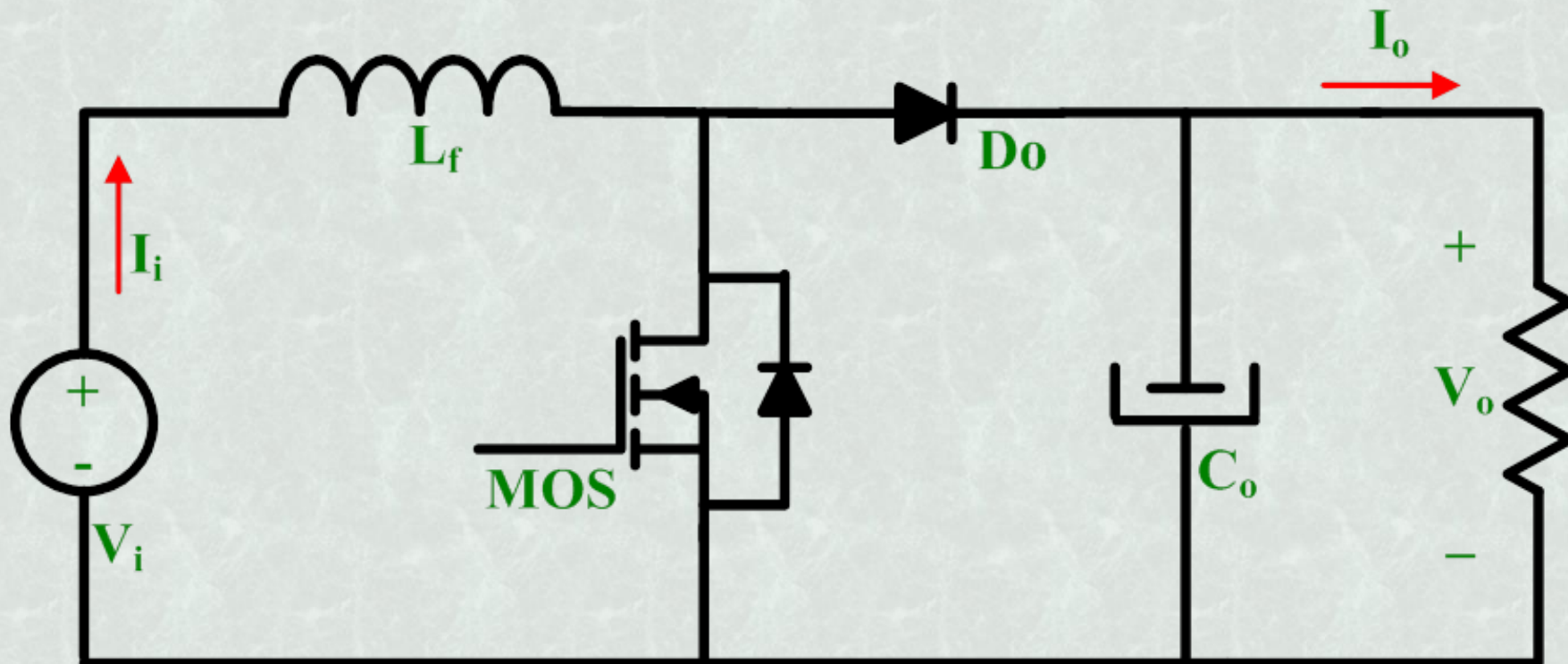
**Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΤ-ΣΤ  
ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ**

**(Boost DC-DC Converter)**

**Μέρος 2<sup>ο</sup>**



# ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ Σ.Τ.-Σ.Τ. ΤΥΠΟΥ BOOST



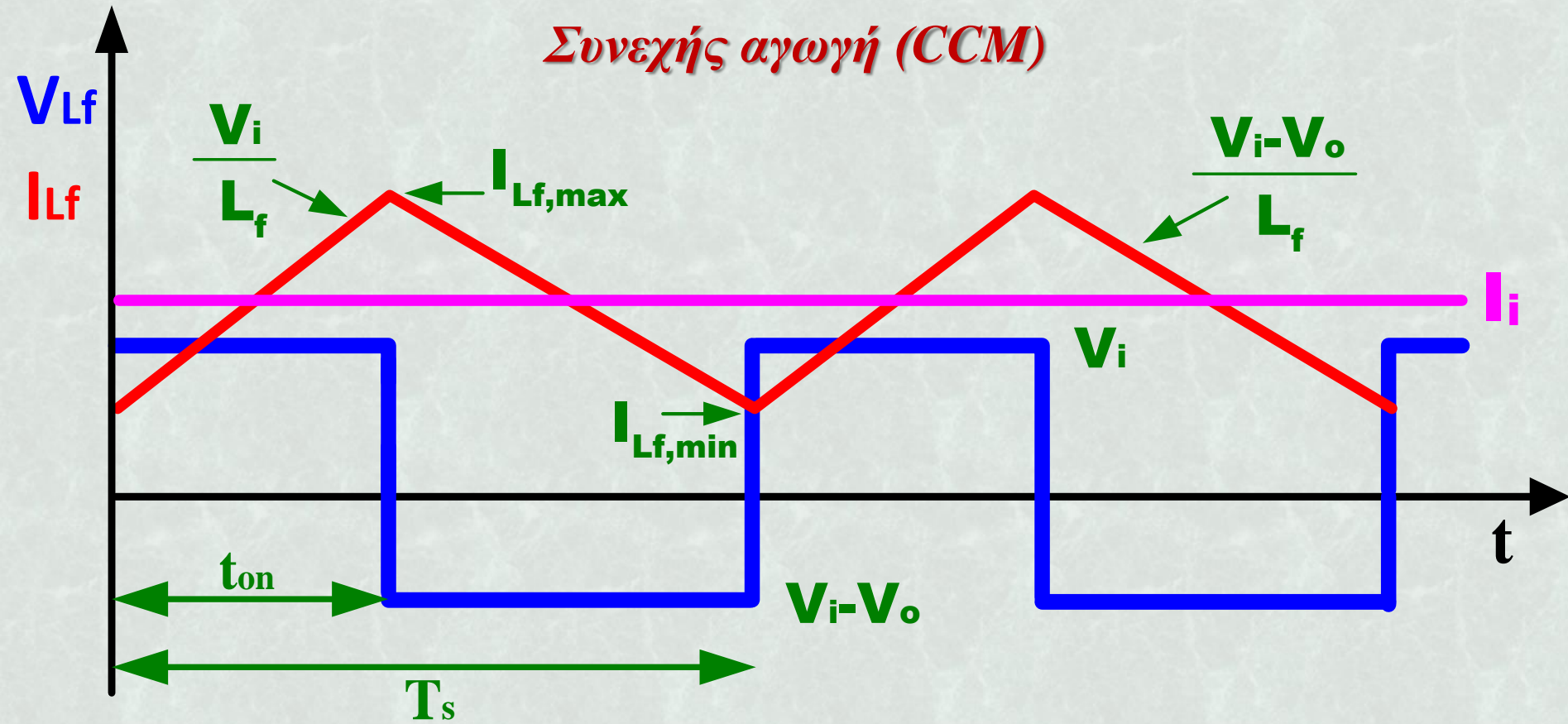
## *Κυκλωματικό διάγραμμα*

Όπως δηλώνει και το όνομά του, είναι ένας μετατροπέας Σ.Τ. σε Σ.Τ. ανύψωσης τάσης (step-up ή boost converter) και παράγει μια συνεχή τάση εξόδου υψηλότερη από τη συνεχή τάση εισόδου.



# Βασικότερες εξισώσεις λειτουργίας Boost

*Συνεχής αγωγή (CCM)*



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-\delta}, \quad I_o = \frac{(I_{Lf,max} + I_{Lf,min})}{2} \cdot (1-\delta), \quad I_i = \frac{(I_{Lf,max} + I_{Lf,min})}{2}$$

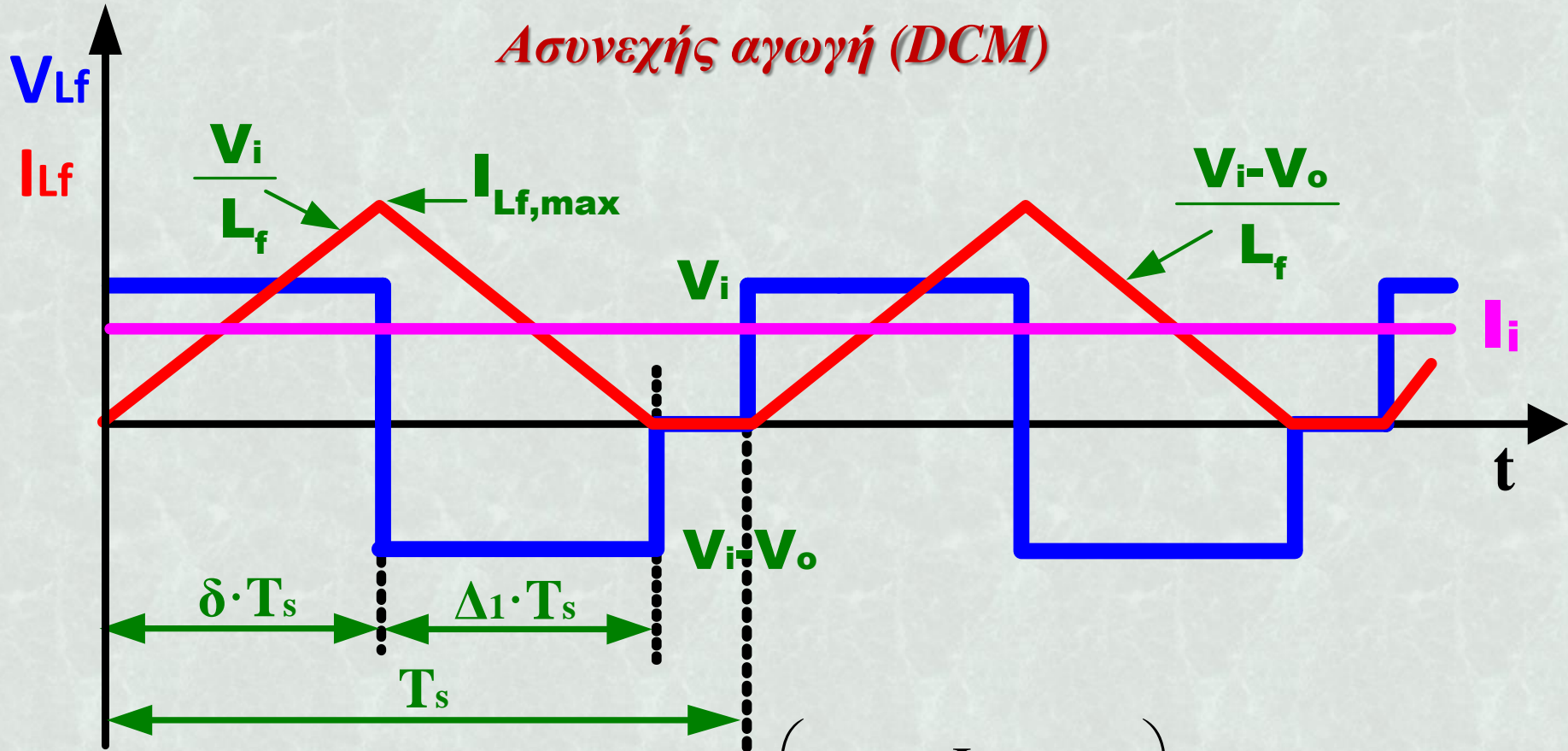
$$I_{Lf,max} - I_{Lf,min} = \frac{V_i}{L_f} \cdot \delta \cdot T_s = \frac{V_o - V_i}{L_f} \cdot (1-\delta) \cdot T_s = \frac{V_o}{L_f} \cdot \delta \cdot (1-\delta) \cdot T_s$$





# Βασικότερες εξισώσεις λειτουργίας Boost

*Ασυνεχής αγωγή (DCM)*



**ΠΡΟΣΟΧΗ**

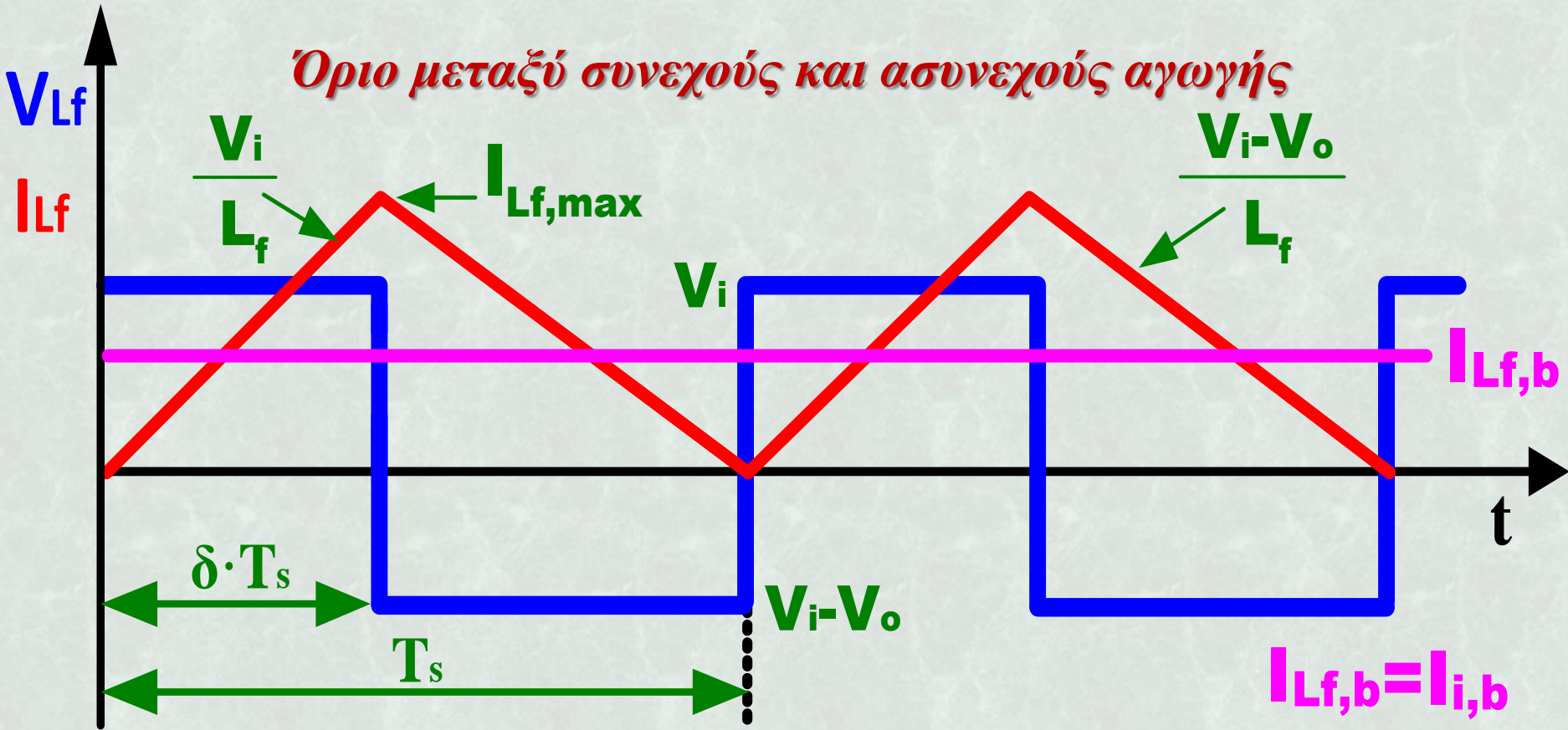
ρεύμα εξόδου = μέση τιμή  
ρεύματος διόδου

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 \cdot \left( \frac{I_o}{\left[ \frac{(V_i \cdot T_s)}{L_f} \right]} \right) + \delta^2}{2 \cdot \left( \frac{I_o}{\left[ \frac{(V_i \cdot T_s)}{L_f} \right]} \right)} = \frac{\delta^2 + 2 \cdot I_{No,i}}{2 \cdot I_{No,i}}$$



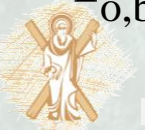


# Βασικότερες εξισώσεις λειτουργίας Boost



$$I_{Lf,b} = \frac{(V_o - V_i) \cdot (1-\delta) \cdot T_s}{L_f \cdot 2} = \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \cdot \frac{\delta}{2} = \frac{V_o \cdot T_s}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)}{2}$$

$$I_{o,b} = \frac{(V_o - V_i) \cdot (1-\delta)^2 \cdot T_s}{L_f \cdot 2} = \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)}{2} = \frac{V_o \cdot T_s}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)^2}{2}$$



## Χαρακτηριστικές εξόδου Boost (Vi σταθερή)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-\delta}, \text{ CCM} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta^2 + 2 \cdot \left( \frac{I_o}{\left[ (V_i \cdot T_s) / L_f \right]} \right)}{2 \cdot \left( \frac{I_o}{\left[ (V_i \cdot T_s) / L_f \right]} \right)} = \frac{\delta^2 + 2 \cdot I_{No,i}}{2 \cdot I_{No,i}}, \text{ DCM}$$

$$I_{o,b} = \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)}{2} \Rightarrow I_{o,b,max} = \frac{V_i \cdot T_s}{8 \cdot L_f} \quad (\text{για } \delta = \frac{1}{2})$$

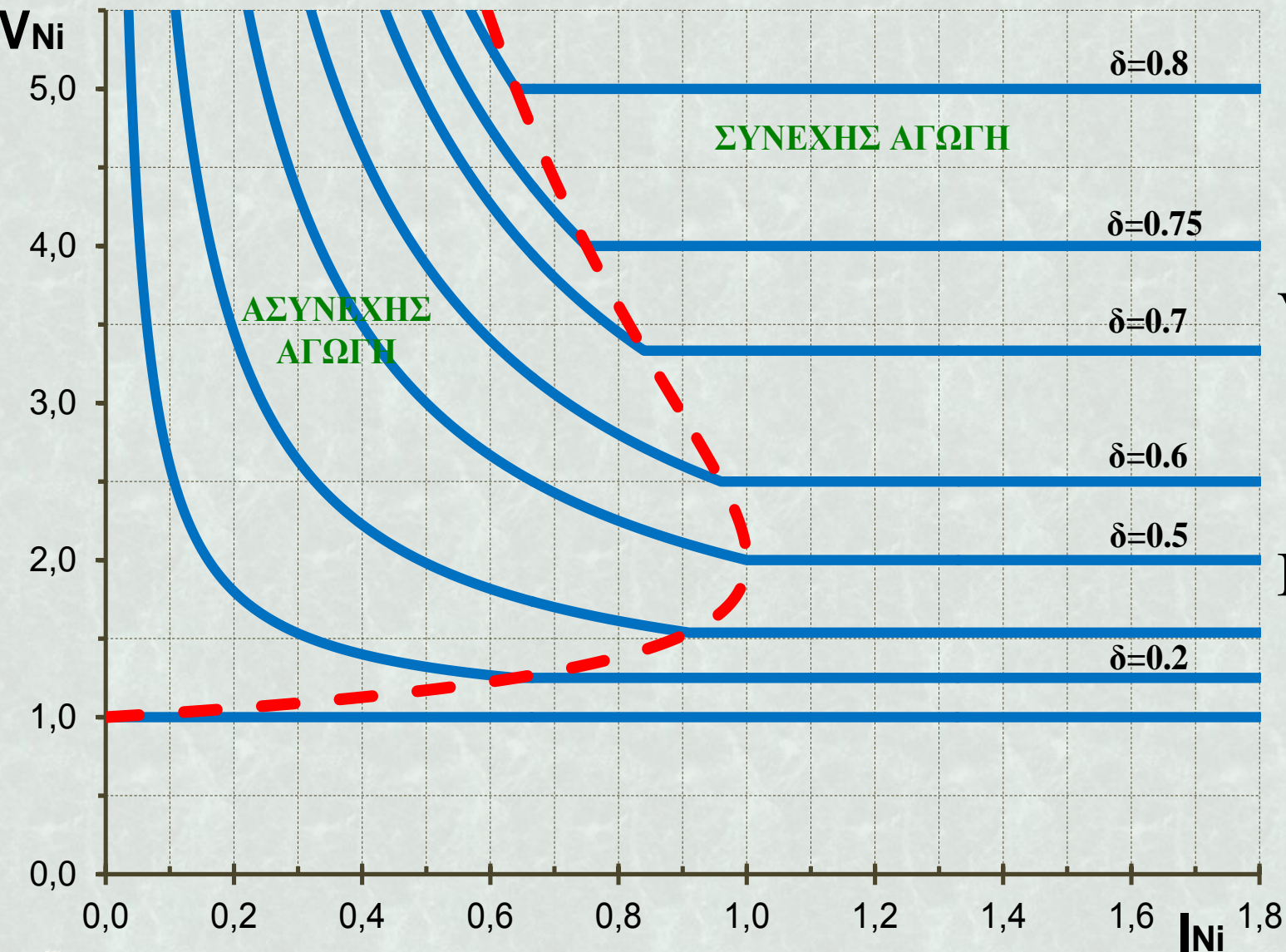
Αν θέσουμε:  $V_{Ni} = \frac{V_o}{V_i}$  και  $I_{Ni} = \frac{I_o}{I_{o,b,max}} = \frac{I_o}{\frac{V_i \cdot T_s}{8 \cdot L_f}}$

Θα έχουμε:

$$V_{Ni} = \frac{1}{1-\delta}, \text{ CCM} \quad V_{Ni} = \frac{\delta^2 + \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{I_o}{I_{o,b,max}} \right)}{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{I_o}{I_{o,b,max}} \right)} = \frac{\delta^2 + \frac{1}{4} \cdot I_{Ni}}{\frac{1}{4} \cdot I_{Ni}}, \text{ DCM}$$



# Χαρακτηριστικές εξόδου Boost (Vi σταθερή)



$$V_{Ni} = \frac{V_o}{V_i}$$

$$I_{Ni} = \frac{I_o}{\frac{V_i \cdot T_s}{8 \cdot L_f}}$$

Χαρακτηριστικές εξόδου για  $V_i = ct$





## Χαρακτηριστικές εξόδου Boost (V<sub>o</sub> σταθερή)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-\delta}, \text{ CCM} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta^2 + 2 \cdot \left( \frac{I_o}{\left[ (V_i \cdot T_s) / L_f \right]} \right)}{2 \cdot \left( \frac{I_o}{\left[ (V_i \cdot T_s) / L_f \right]} \right)} = \frac{\delta^2 + 2 \cdot I_{No,i}}{2 \cdot I_{No,i}}, \text{ DCM}$$

$$I_{o,b} = \frac{V_o \cdot T_s}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)^2}{2} \Rightarrow I_{o,b,max} = \frac{2}{27} \cdot \frac{V_o \cdot T_s}{L_f} \left( \text{για } \delta = \frac{1}{3} \right)$$

Αν θέσουμε:  $V_{No} = \frac{V_i}{V_o}$  και  $I_{No} = \frac{I_o}{I_{o,b,max}} = \frac{I_o}{\frac{2}{27} \cdot \frac{V_o \cdot T_s}{L_f}}$

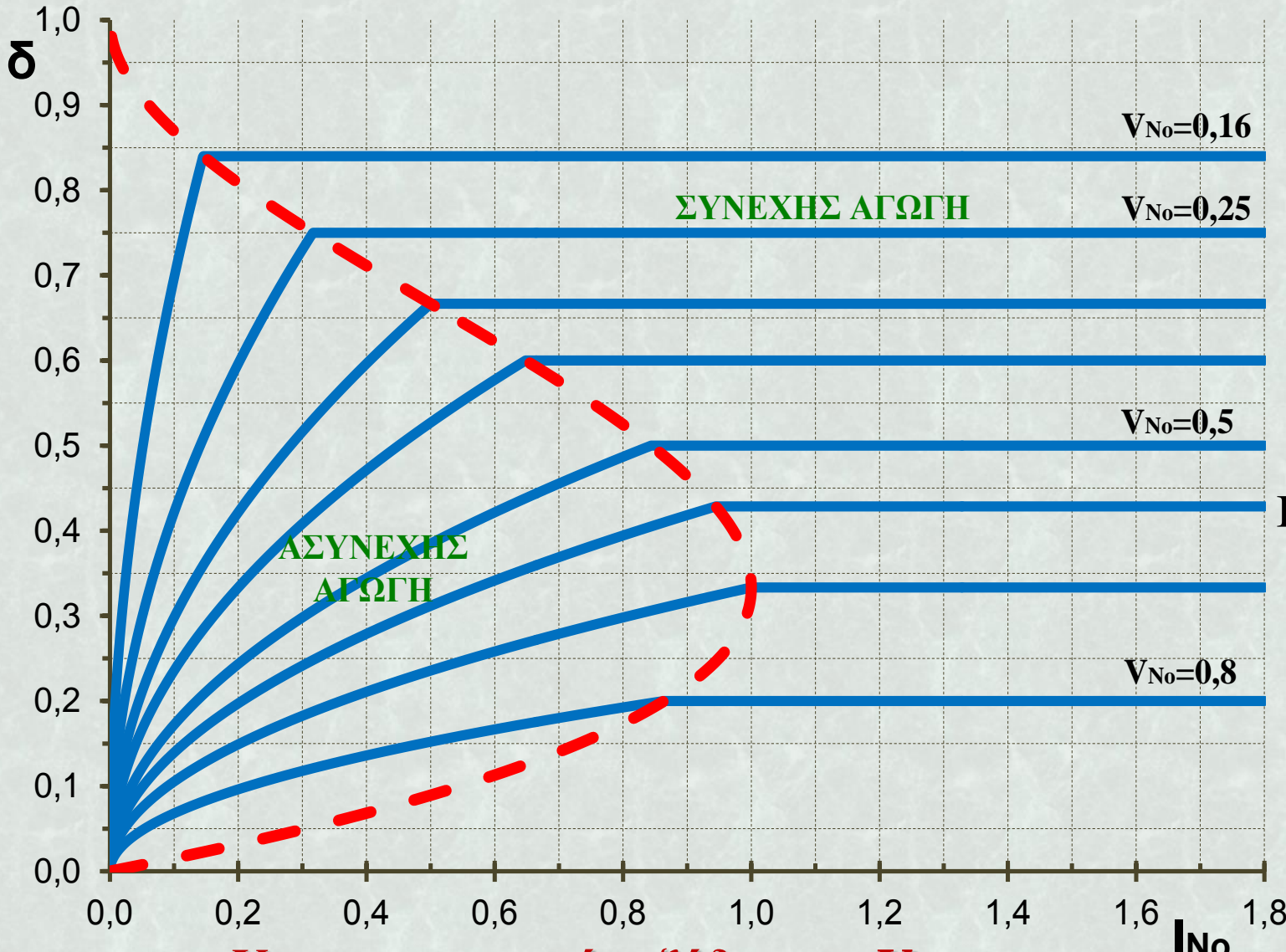
Θα έχουμε:

$$\delta = 1 - V_{No}, \text{ CCM} \quad \delta = \frac{1}{V_{No}} \cdot \sqrt{\frac{4}{27} \cdot (1 - V_{No}) \cdot I_{No}}, \text{ DCM}$$





# Χαρακτηριστικές εξόδου Boost (Vo σταθερή)



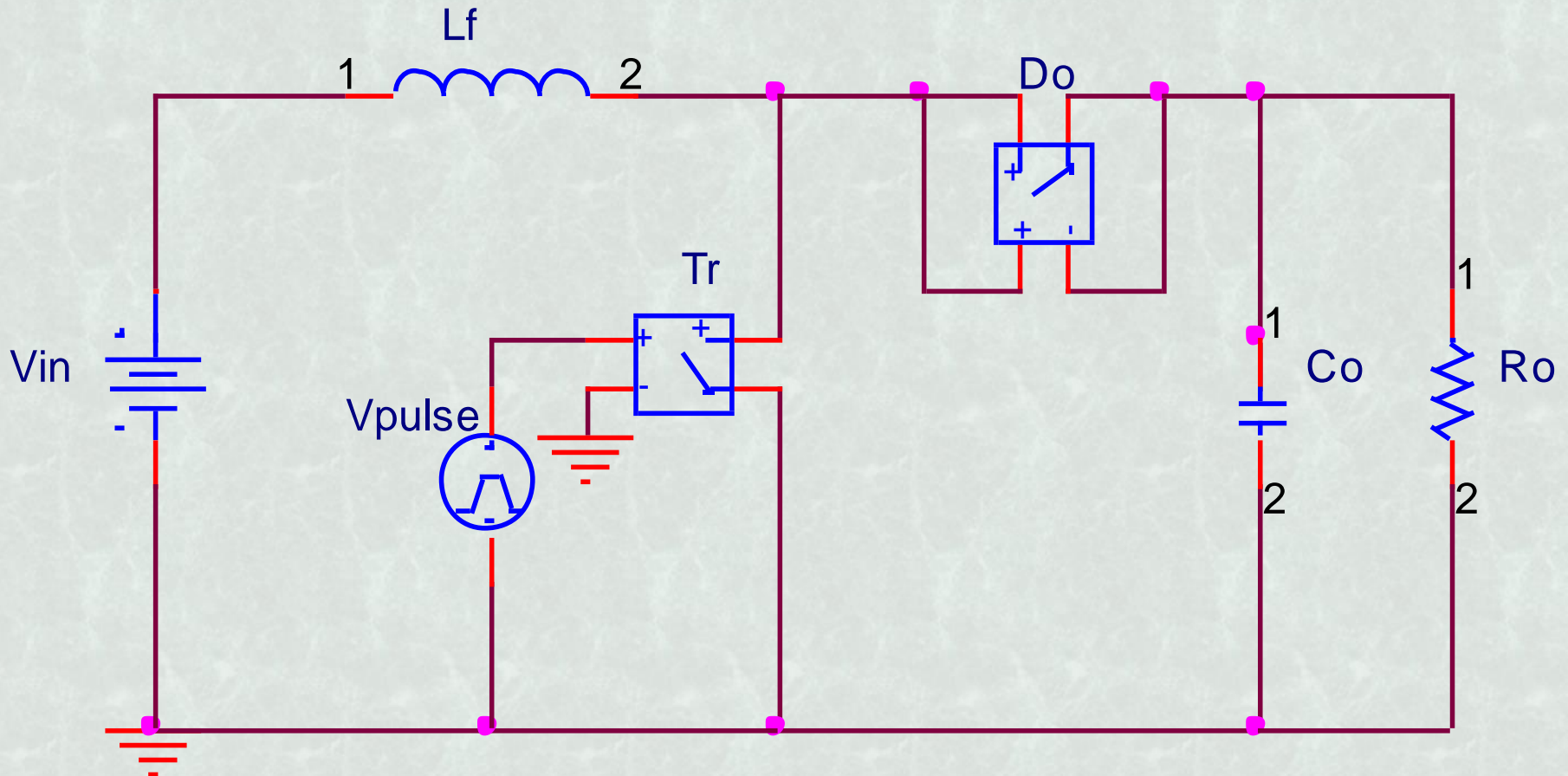
$$V_{No} = \frac{V_i}{V_o}$$

$$I_{No} = \frac{I_o}{27} \cdot \frac{V_o \cdot T_s}{L_f}$$

*Χαρακτηριστικές εξόδου για  $V_o = ct$*



# Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του μετατροπέα Σ.Τ.–Σ.Τ. Boost

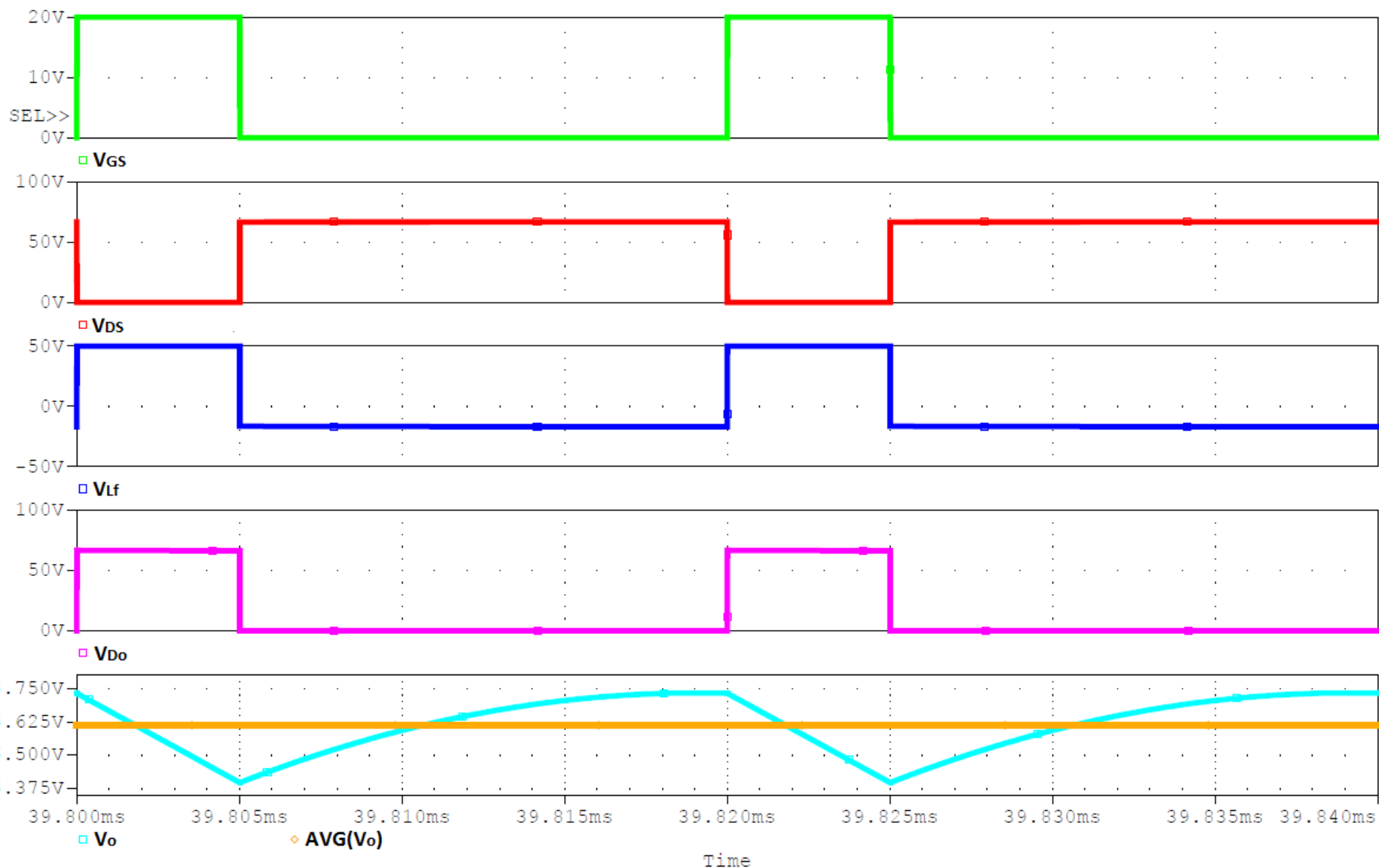


*Κυκλωματικό διάγραμμα*



# Προσομοίωση του Boost στην περιοχή CCM

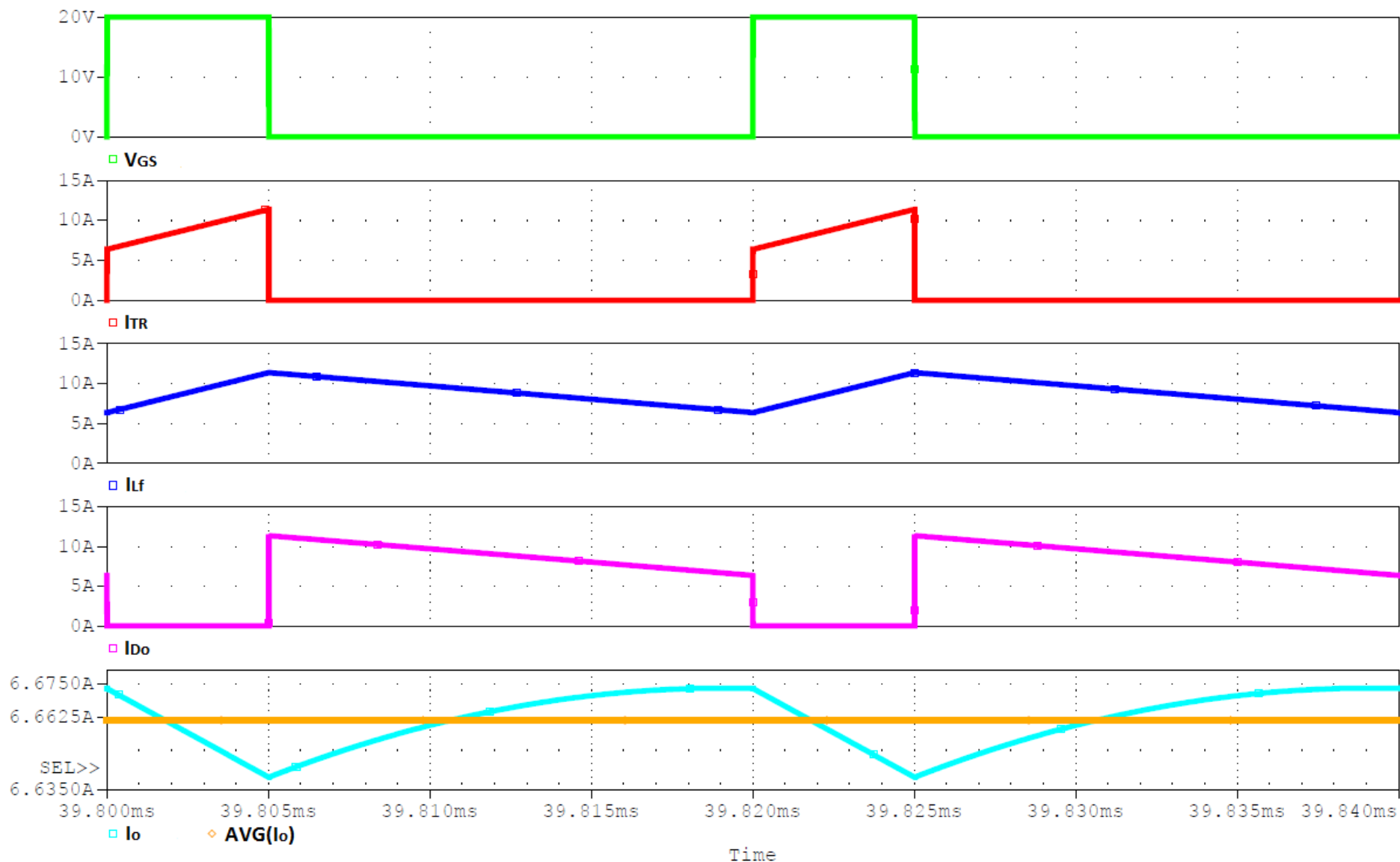
(A) boost-ideal-SCHEMATIC1-Boost-Ideal.dat (active)



## Κυματομορφές Τάσεων στη CCM

# Προσομοίωση του Boost στην περιοχή CCM

(A) boost-ideal-SCHEMATIC1-Boost-Ideal.dat (active)

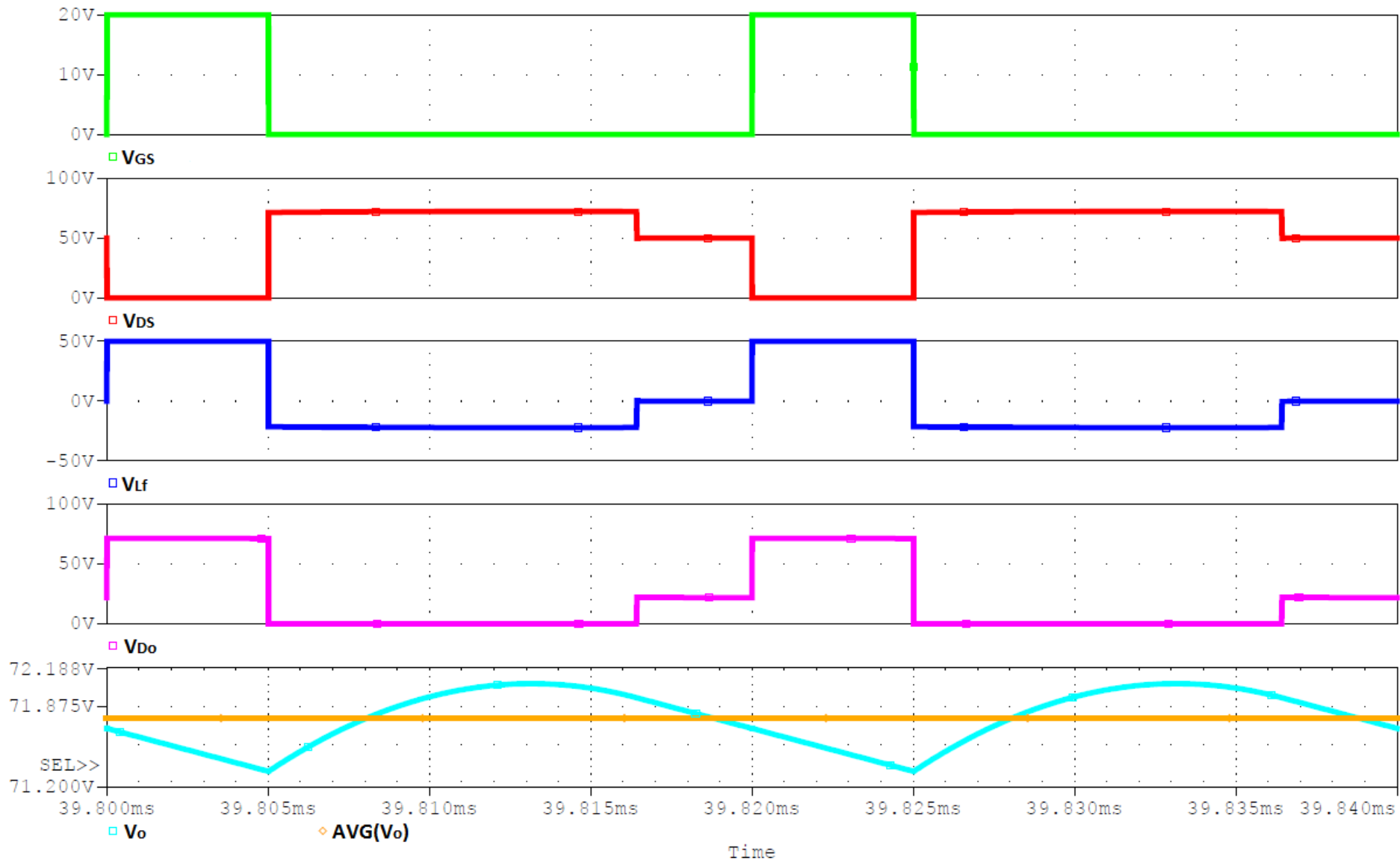


## Κυματομορφές Ρευμάτων στη CCM



# Προσομοίωση του Boost στην περιοχή DCM

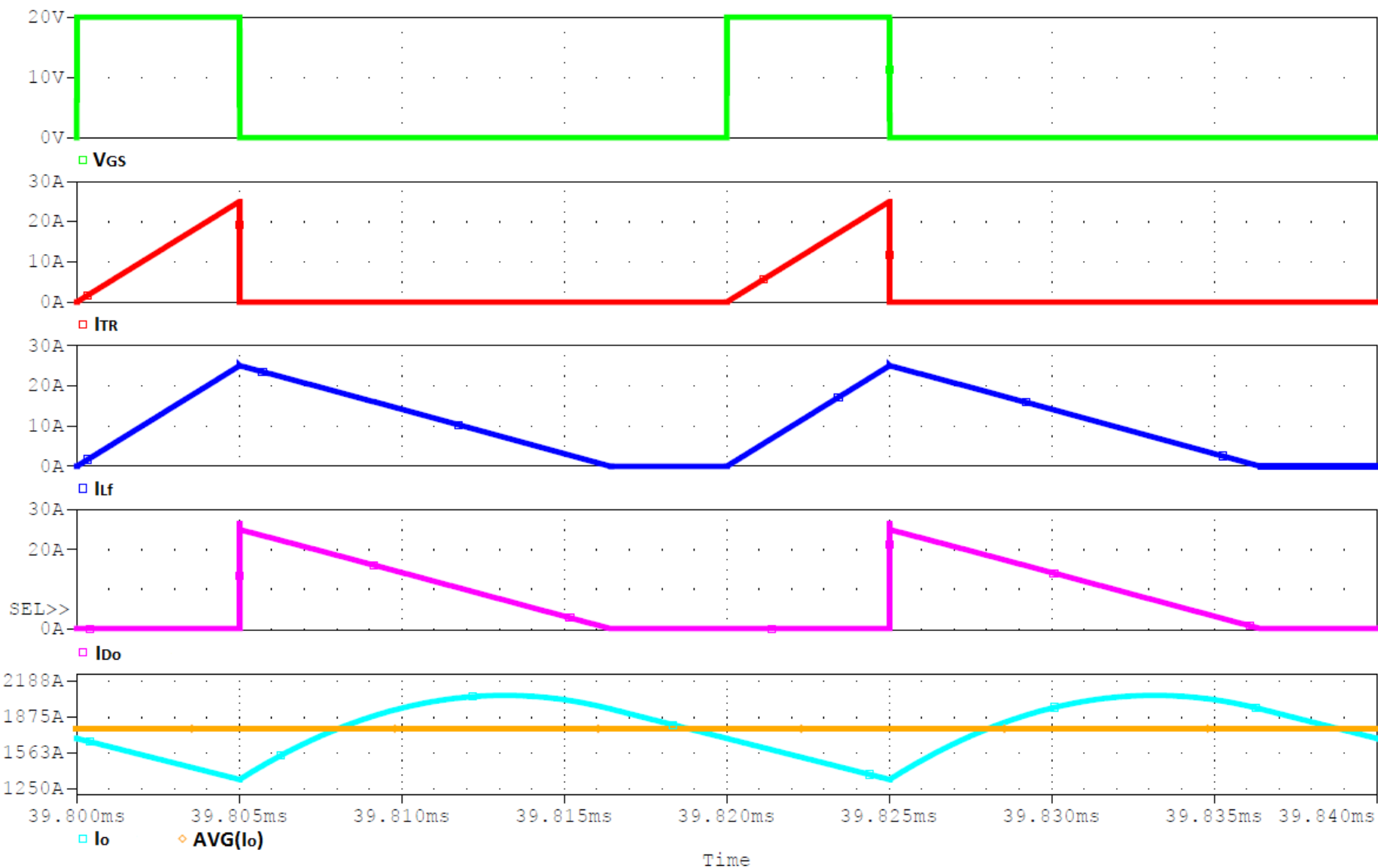
(A) boost-ideal-SCHEMATIC1-Boost-Ideal.dat (active)



## Κυματομορφές Τάσεων στη DCM

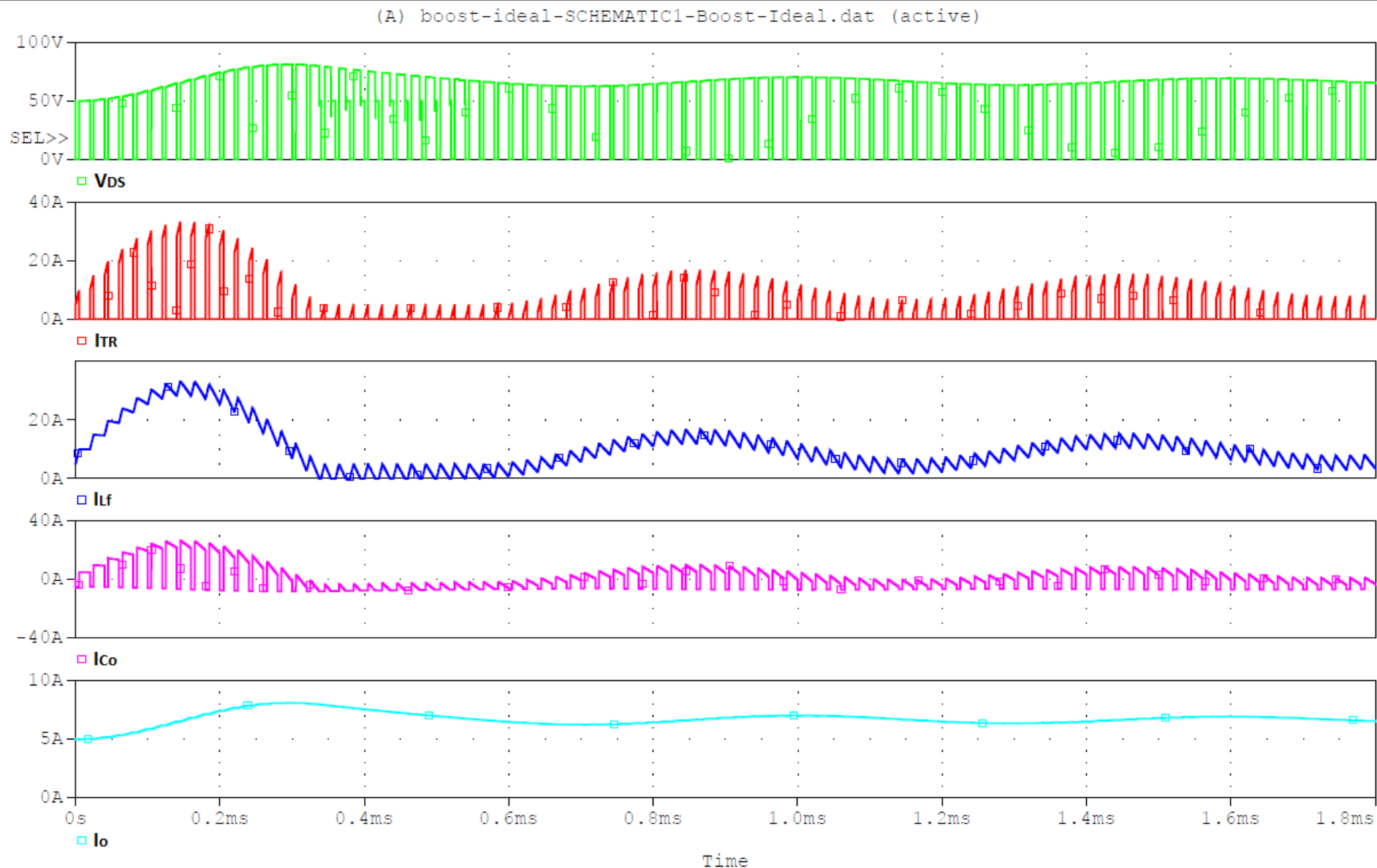
# Προσομοίωση του Boost στην περιοχή DCM

(A) boost-ideal-SCHEMATIC1-Boost-Ideal.dat (active)



## Κυματομορφές Ρευμάτων στη DCM

# Προσομίωση του Boost στην εκκίνηση



## Κυματομορφές των στοιχείων κατά την εκκίνηση

# Κυμάτωση της τάσης εξόδου του Boost

Υπολογισμός για την ειδική περίπτωση που απεικονίζεται στο σχήμα

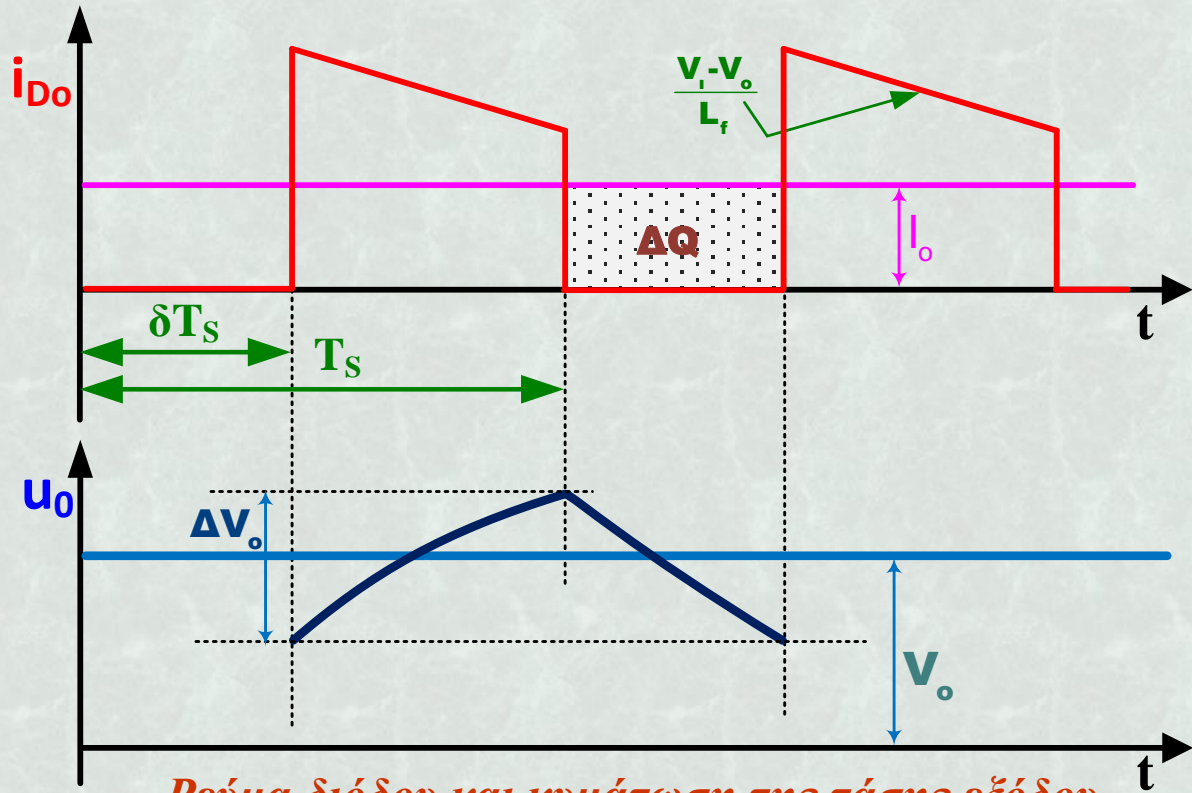
$$\left. \begin{aligned} \Delta V_o &= \frac{\Delta Q}{C_o} = \frac{I_o \cdot \delta \cdot T_s}{C_o} \\ I_o &= \frac{V_o}{R_L} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta V_o = V_o \cdot \frac{\delta \cdot T_s}{R_L \cdot C_o}$$

Συνεπώς:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{\delta \cdot T_s}{R_L \cdot C_o} = \delta \cdot \frac{T_s}{\tau}$$

Όπου  $\tau$  η σταθερά χρόνου του RC κυκλώματος:



Ρεύμα διόδου και κυμάτωση της τάσης εξόδου

Η κυμάτωση εξαρτάται:

- Από το λόγο κατάτμησης  $\delta$
- Από τη συχνότητα λειτουργίας  $f_s$
- Από τη σταθερά χρόνου  $\tau$  του κυκλώματος εξόδου.





# Ασκήσεις στο μετατροπέα Boost

## Άσκηση 3<sup>η</sup>

Να αποδειχθεί ο τύπος που δίνει το λόγο  $V_o/V_i$  στην περίπτωση ενός μετατροπέα  $\Sigma.T.-\Sigma.T.$  ανύψωσης τάσης (Boost) ο οποίος λειτουργεί στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής.

## Άσκηση 4<sup>η</sup>

Ένας μετατροπέας  $\Sigma.T.-\Sigma.T.$  ανύψωσης τάσης (Boost) τροφοδοτεί με τάση  $V_o=48V$  ένα φορτίο του οποίου η ισχύς εξόδου είναι σταθερή και ίση με  $P_o=120W$ .

Η τάση εισόδου του μετατροπέα αυτού μεταβάλλεται μεταξύ 12V και 24V και η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του είναι 50kHz.

Να υπολογισθεί η οριακή τιμή του πηνίου εξομάλυνσης  $L_f$  ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί στην:

- **περιοχή ασυνεχούς αγωγής** σε οποιαδήποτε συνθήκες λειτουργίας;
- **περιοχή συνεχούς αγωγής** σε οποιαδήποτε συνθήκες λειτουργίας;



# ΑΣΚΗΣΗ 3<sup>η</sup>: ΛΥΣΗ

## Απόδειξη τύπου $V_o/V_i$ για Boost σε DCM

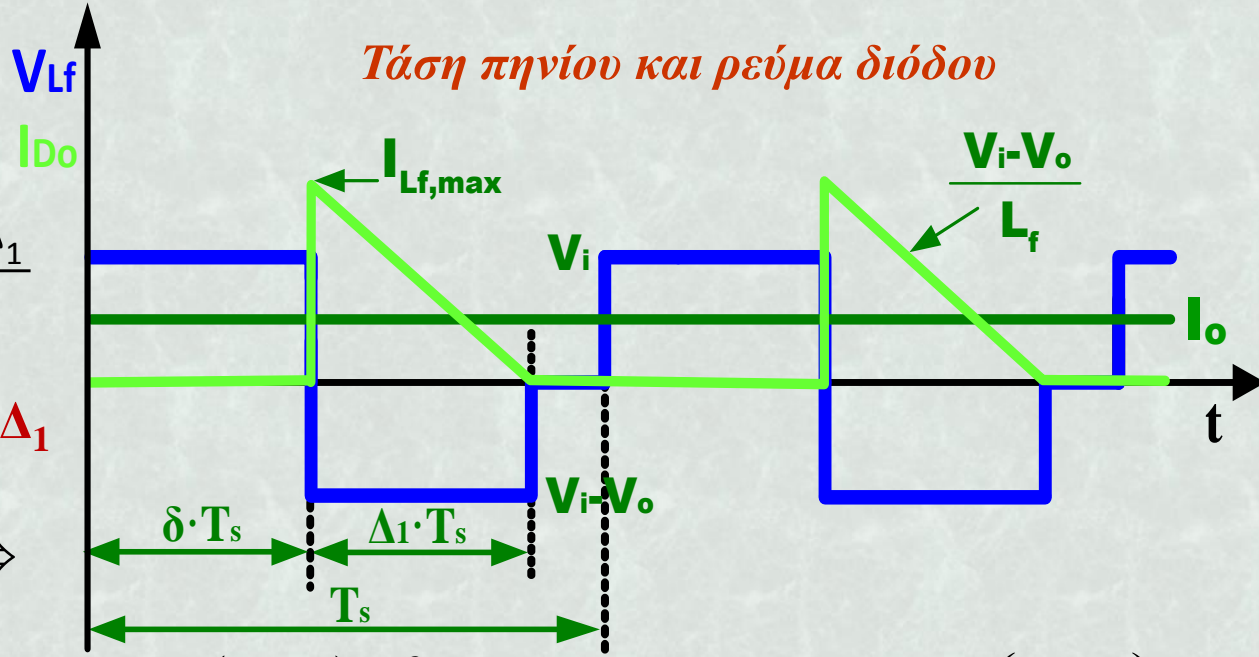
$$V_i \cdot \delta \cdot T_s = (V_o - V_i) \cdot \Delta_1 \cdot T_s$$

$$\Rightarrow \Delta_1 = \frac{V_i \cdot \delta}{V_o - V_i} \text{ και } \frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta + \Delta_1}{\Delta_1}$$

Σχέση που συνδέει  $I_o$  και  $\Delta_1$

$$I_o = \frac{1}{T_s} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot I_{Lf,max} \cdot \Delta_1 \cdot T_s \right]$$

$$I_o = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(V_o - V_i)}{L_f} \cdot \Delta_1 \cdot T_s \right) \cdot \Delta_1 \Rightarrow I_o = \frac{(V_o - V_i) \cdot \Delta_1^2 \cdot T_s}{2 \cdot L_f}$$



$$I_{No,i} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{V_o - V_i}{V_i} \right) \cdot \frac{V_i^2}{(V_o - V_i)^2} \cdot \delta^2 \Rightarrow 2 \cdot I_{No,i} = \delta^2 \cdot \frac{1}{\left( \left( \frac{V_o}{V_i} \right) - 1 \right)} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta^2 + 2 \cdot I_{No,i}}{2 \cdot I_{No,i}}$$



## ΑΣΚΗΣΗ 4<sup>η</sup>

Ένας μετατροπέας  $\Sigma.T.-\Sigma.T.$  ανύψωσης τάσης (Boost) τροφοδοτεί με τάση  $V_o=48V$  ένα φορτίο του οποίου η ισχύς εξόδου είναι σταθερή και ίση με  $P_o=120W$ .

Η τάση εισόδου  $V_i$  του μετατροπέα αυτού μεταβάλλεται μεταξύ  $12V$  και  $24V$  και η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του είναι  $50kHz$ .

Να υπολογισθεί η οριακή τιμή του πηνίου εξομάλυνσης  $L_f$ , ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί στην:

- **περιοχή ασυνεχούς αγωγής** σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας;
- **περιοχή συνεχούς αγωγής** σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας;





# ΑΣΚΗΣΗ 4<sup>η</sup>: ΛΥΣΗ

$$I_{L_f,b} = \frac{(V_o - V_i) \cdot (1-\delta) \cdot T_S}{L_f \cdot 2} = \frac{V_i \cdot T_S \cdot \delta}{L_f \cdot 2} = \frac{V_o \cdot T_S \cdot \delta \cdot (1-\delta)}{L_f \cdot 2}$$

$$I_{o,b} = \frac{(V_o - V_i) \cdot (1-\delta)^2 \cdot T_S}{L_f \cdot 2} = \frac{V_i \cdot T_S \cdot \delta \cdot (1-\delta)}{L_f \cdot 2} = \frac{V_o \cdot T_S \cdot \delta \cdot (1-\delta)^2}{L_f \cdot 2}$$

$$V_{No,min} = \frac{V_{i,min}}{V_o} = \frac{12}{48} = 0,25 \Rightarrow \delta_{max} = 1 - V_{No,min} = 0,75$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{120W}{48V} = 2,50A$$

$$V_{No,max} = \frac{V_{i,max}}{V_o} = \frac{24}{48} = 0,50 \Rightarrow \delta_{min} = 1 - V_{No,max} = 0,50$$

## ΕΡΩΤΗΜΑ:

DCM:  $I_o \leq I_{ob}$  για ποιά  $V_i$  ( $\delta$ );

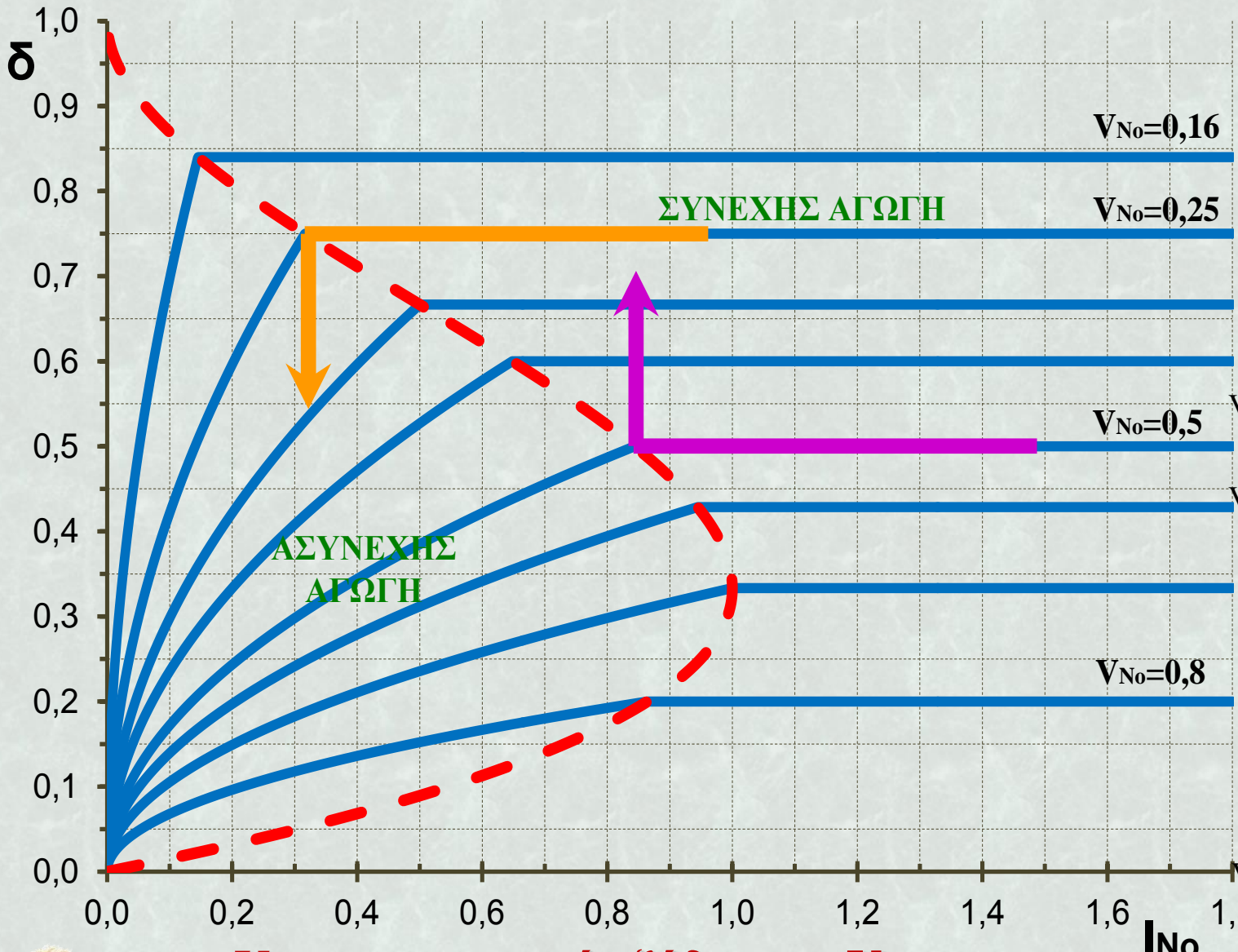
CCM:  $I_o \geq I_{ob}$  για ποιά  $V_i$  ( $\delta$ );

Χρησιμοποιούμε  
το διάγραμμα για  
 $V_o = ct = 48V$ .





# ΑΣΚΗΣΗ 4<sup>η</sup>: ΛΥΣΗ



$$V_{No} = \frac{V_i}{V_o}$$

$$I_{No} = \frac{I_o}{\frac{2}{27} \cdot \frac{V_o \cdot T_s}{L_f}}$$

$$V_{No,min} = \frac{V_{i,min}}{V_o} = \frac{12}{48} = 0,25$$

$$V_{No,max} = \frac{V_{i,max}}{V_o} = \frac{24}{48} = 0,50$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{120}{48} = 2,50A$$

$$Av V_{i,max} = 36V;$$

$$V_{No,max} = \frac{V_{i,max}}{V_o} = \frac{36}{48} = 0,75$$

**Χαρακτηριστική εξόδου για  $V_o = ct$**



# ΑΣΚΗΣΗ 4<sup>η</sup>: ΛΥΣΗ

α) Από τη χαρακτηριστική εξόδου με  $V_o=ct$ , η οριακή τιμή του πηνίου για λειτουργία στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής (DCM) για οποιαδήποτε τιμή της τάσης εισόδου  $V_i$  (εντός των ορίων που έχουν δοθεί από εκφώνηση), θα πρέπει να υπολογισθεί για  $V_i=V_{i,\min}$ , συνεπώς για  $\delta=\delta_{\max}$ . Άρα:

$$I_o \leq I_{o,b} \Rightarrow I_o \leq \frac{V_o}{L_f \cdot f_s} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)^2}{2} \Rightarrow L_f \leq \frac{V_o}{I_o \cdot f_s} \cdot \frac{\delta_{\max} \cdot (1-\delta_{\max})^2}{2}$$
$$L_f \leq \frac{48V}{50 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 2,5A} \cdot \frac{0,75 \cdot (1-0,75)^2}{2} \Rightarrow \boxed{L_f \leq 9,0\mu\text{H}}$$

β) Από τη χαρακτηριστική εξόδου με  $V_o=ct$ , η οριακή τιμή του πηνίου για λειτουργία στην περιοχή συνεχούς αγωγής (CCM) για οποιαδήποτε τιμή της τάσης εισόδου  $V_i$  (εντός των ορίων που έχουν δοθεί από εκφώνηση), θα πρέπει να υπολογισθεί για  $V_i=V_{i,\max}$ , συνεπώς για  $\delta=\delta_{\min}$ . Άρα:

$$I_o \geq I_{o,b} \Rightarrow I_o \geq \frac{V_o}{L_f \cdot f_s} \cdot \frac{\delta \cdot (1-\delta)^2}{2} \Rightarrow L_f \geq \frac{V_o}{I_o \cdot f_s} \cdot \frac{\delta_{\min} \cdot (1-\delta_{\min})^2}{2}$$
$$L_f \geq \frac{48V}{50 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 2,5A} \cdot \frac{0,50 \cdot (1-0,50)^2}{2} \Rightarrow \boxed{L_f \geq 24,0\mu\text{H}}$$



# 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 Συνεχή». 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.

