

Ηλεκτρονικά Ισχύος και Μέθοδοι Οδήγησης Κινητήρων

DC-DC Μετατροπείς

UNIVERSITY OF
WESTERN MACEDONIA



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

Εισαγωγή

- Συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος που μετατρέπουν μια dc τάση σε μια άλλη dc τάση διαφορετικού μεγέθους.
- Η dc τάση εισόδου προέρχεται συχνά από ανόρθωση της τάσης του δικτύου (π.χ. γέφυρα διόδων)
- Διακοπτική λειτουργία σε αντίθεση με γραμμικούς μετατροπείς → πολύ μικρότερες απώλειες.
- Συχνότητες λειτουργίας υψηλές → μικρό μέγεθος.
- Χρήση ελεγχόμενων διακοπών (MOSFET, IGBT κυρίως).



Εφαρμογές

- Χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν ρυθμιζόμενη dc ισχύ:
 - Υπολογιστές
 - Ιατρικά εργαλεία
 - Φορτιστές μπαταριών
 - Τηλεπικοινωνιακές συσκευές
 - Δέκτες τηλεόρασης
 - Έλεγχος στροφών dc κινητήρων



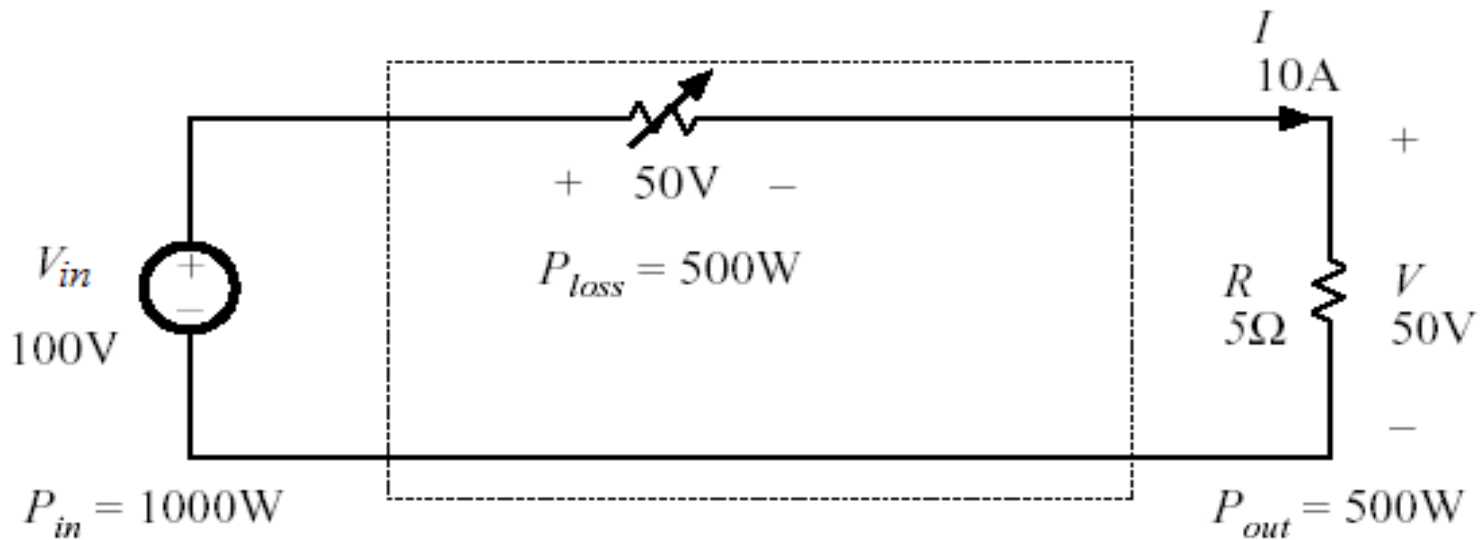
Απλός dc-dc μετατροπέας



- Πως μπορώ να τροφοδοτήσω ένα φορτίο με 50V, 10A, 5Ω , από μια πηγή τάσης 100V?



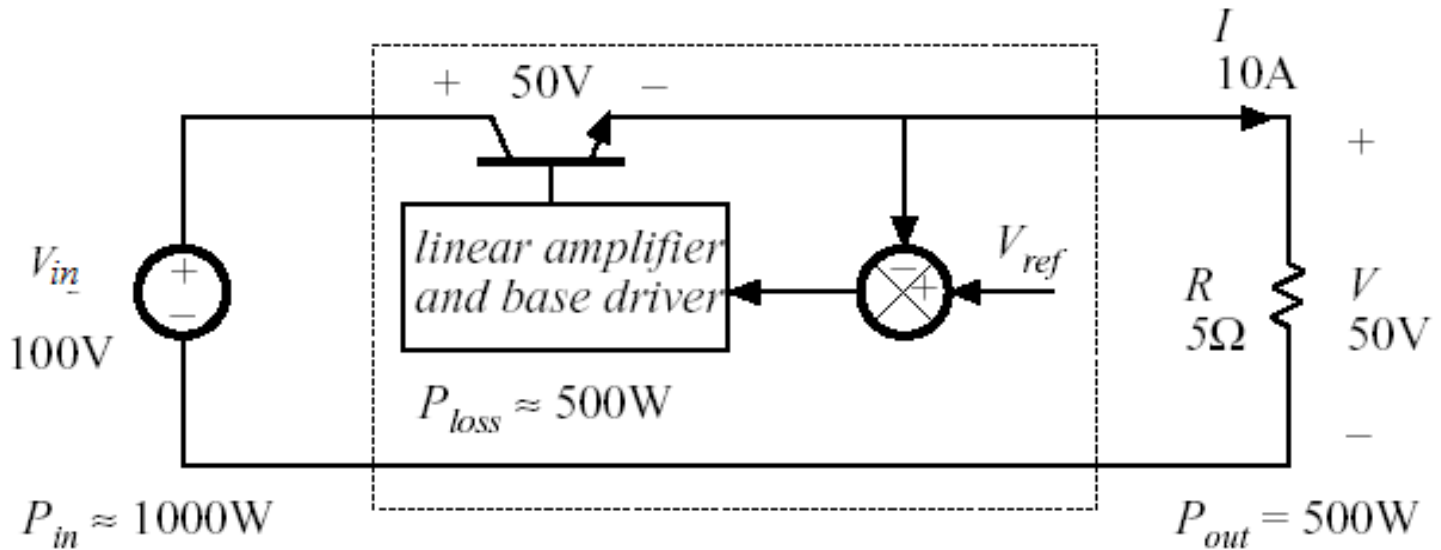
Υλοποίηση με μεταβλητή αντίσταση



- Σημαντικές απώλειες στη μεταβλητή αντίσταση.

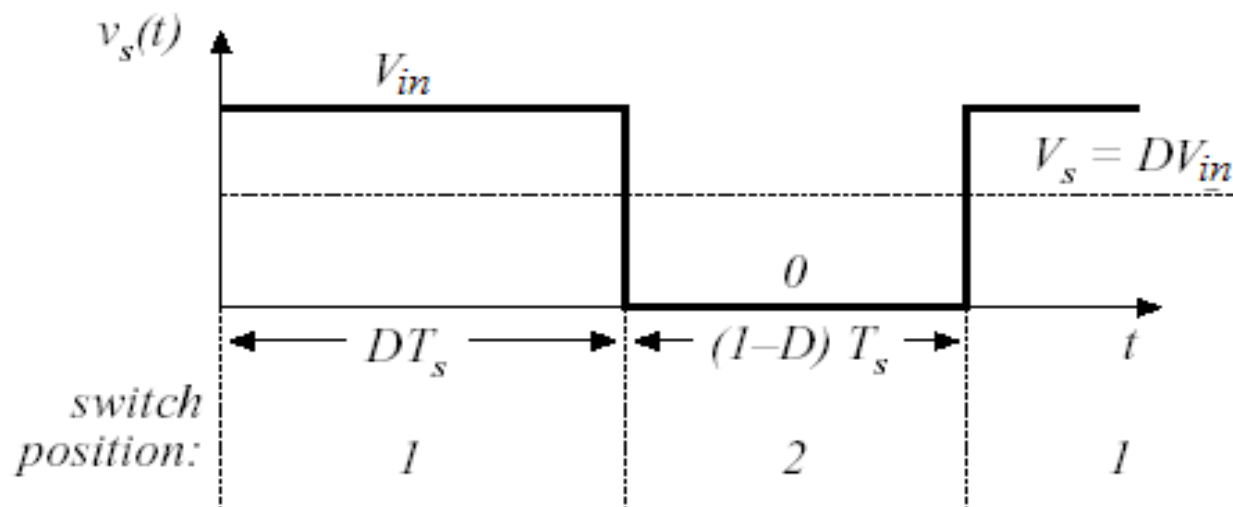
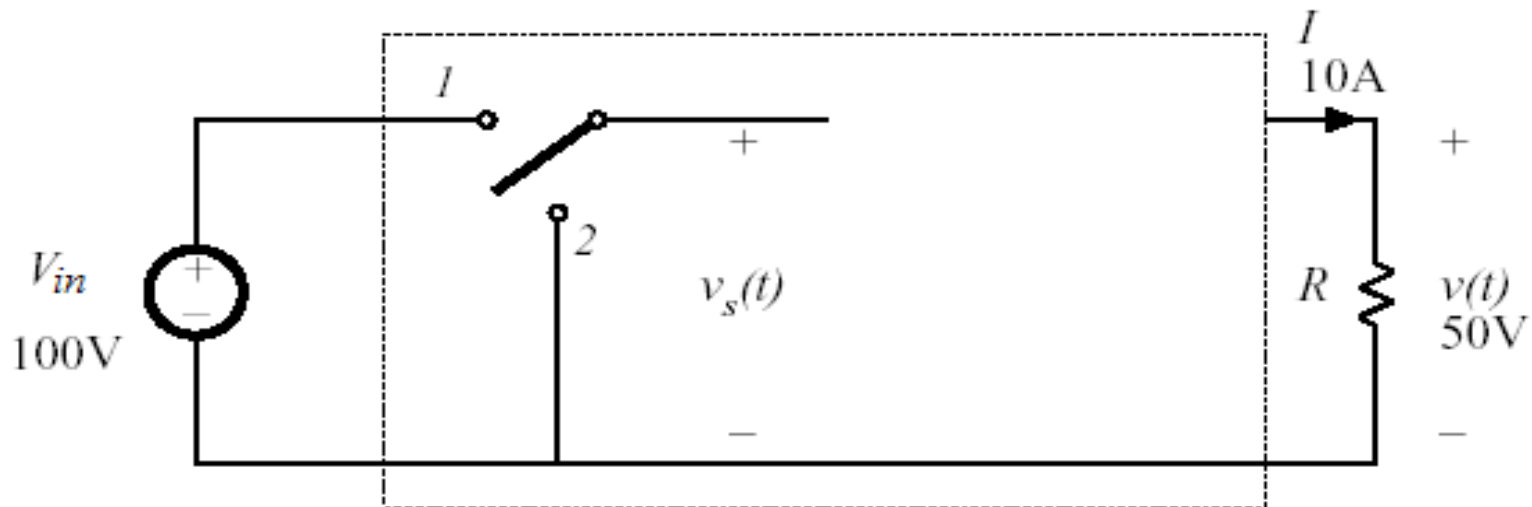


Υλοποίηση με τρανζίστορ



- Το τρανζίστορ λειτουργεί στη γραμμική περιοχή (έλεγχος αντίστασης συλλέκτη-εκπομπού) → **ΑΠΩΛΕΙΕΣ**

Υλοποίηση με διακόπτη

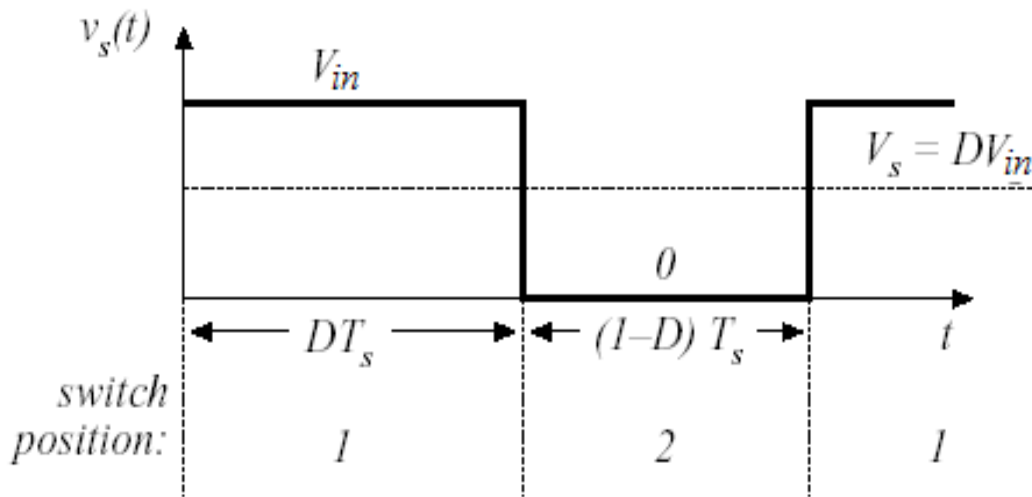


Υλοποίηση με διακόπτη

- Ανοιγοκλείνοντας το διακόπτη συνεχώς και μεταβάλλοντας το λόγο του ON χρόνου προς τον OFF χρόνο, μεταβάλλεται η μέση τάση στο φορτίο.
- Αν είναι ανοικτός (OFF) όλο το χρόνο τότε η μέση τάση είναι 0V, γίνεται 50V αν είναι ON και OFF για τον ίδιο χρόνο σε κάθε κύκλο, και 100V αν είναι κλειστός (ON) συνεχώς.
- Ονομάζεται και **ψαλιδιστής (chopper)**
- Λειτουργία με σταθερή διακοπτική συχνότητα, και μεταβολή του χρόνου (πλάτος παλμού) που ο διακόπτης είναι κλειστός (ON) (ρύθμιση μέσης τάσης εξόδου) → **Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation – PWM)**
- Κρατώντας το πλάτος παλμού ON σταθερό, και αλλάζοντας τη διακοπτική συχνότητα → **Διαμόρφωση Συχνότητας Παλμών (Pulse Frequency Modulation)**



Υλοποίηση με διακόπτη



$D \rightarrow$ Λόγος χρησιμοποίησης (Duty Cycle) $0 \leq D \leq 1$

$T_s \rightarrow$ Διακοπτική Περίοδος (switching period)

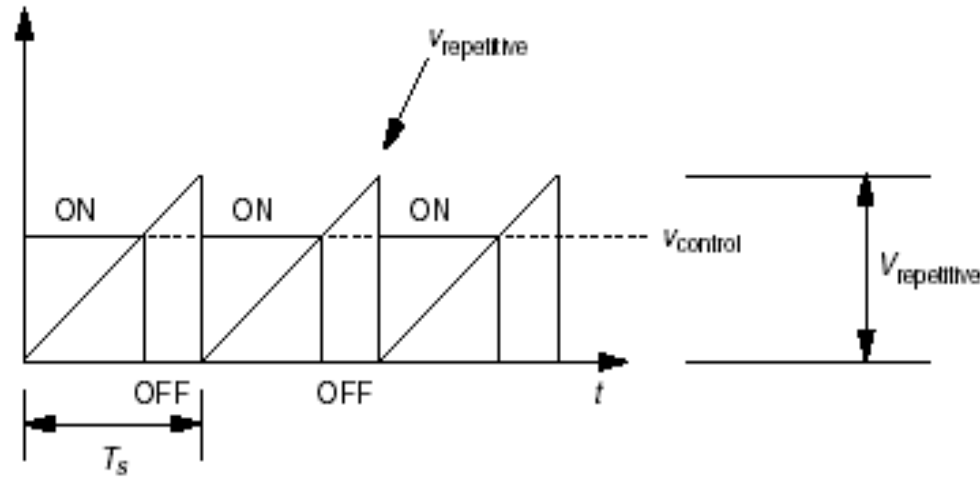
$f_s \rightarrow$ Διακοπτική Συχνότητα (switching frequency)

dc συνιστώσα της $V_s =$ μέση τιμή

$$V_s = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_s(t) dt = DV_{in}$$



Ρύθμιση τάσης εξόδου (PWM)



- Έλεγχος τάσης εξόδου μέσω της τάσης $V_{control}$
- Η τάση αυτή συγκρίνεται με την επαναληπτική κυματομορφή $V_{repetitive}$ μεταβάλλοντας το χρόνο αγωγής t_{ON} του διακόπτη
- Στην ουσία ελέγχεται ο λόγος χρησιμοποίησης **D**

$$D = \frac{t_{ON}}{T_s} = \frac{V_{control}}{V_{repetitive}}$$



Υλοποίηση με διακόπτη

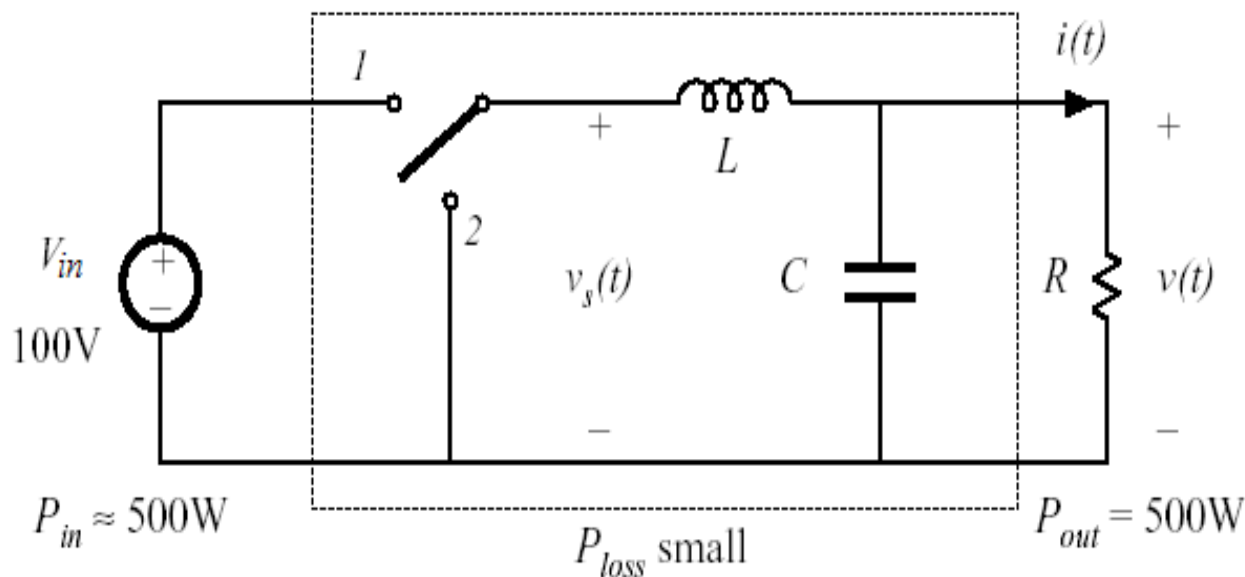
- Μηδενική απώλεια ισχύος (ιδανικός διακόπτης)
- 100% απόδοση του μετατροπέα

❖ ΌΜΩΣ:

- ❑ Η κυματομορφή της τάσης δεν είναι σταθερή.
Αποτελείται από μια dc συνιστώσα και μια ac.
- ❑ Η διακύμανση αυτή της τάσης εξόδου είναι αποδεκτή **μόνο** αν η διακοπτική συχνότητα είναι μεγάλη!



Υλοποίηση με διακόπτη



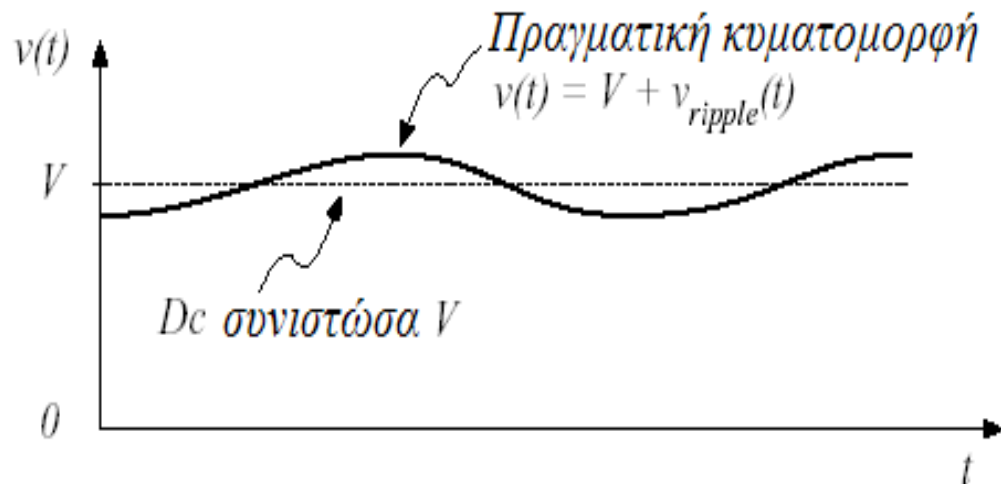
- Εισαγωγή χαμηλοπερατού φίλτρου L-C για αφαίρεση αρμονικών λόγω της διακοπτικής λειτουργίας και εξομάλυνση της τάσης εξόδου (μπλοκάρει την ac συνιστώσα).
- Εισαγωγή συστήματος ελέγχου ανάδρασης για ελεγχόμενη dc τάση εξόδου.



Υλοποίηση με διακόπτη

Πραγματική κυματομορφή
τάσης εξόδου

$$v(t) = V + v_{ripple}(t)$$

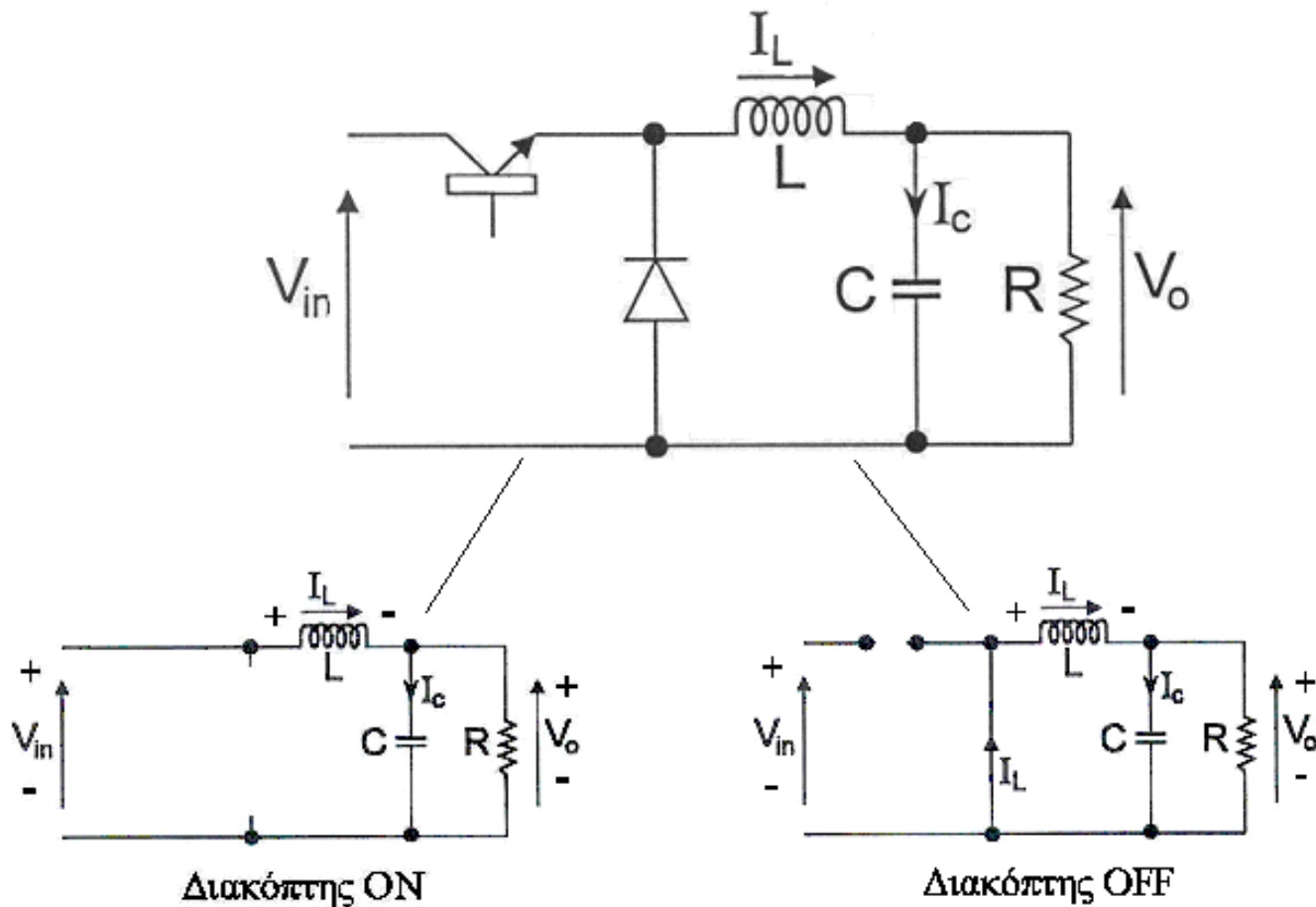


- Για μεγάλη διακοπτική συχνότητα f_s ισχύει ότι:

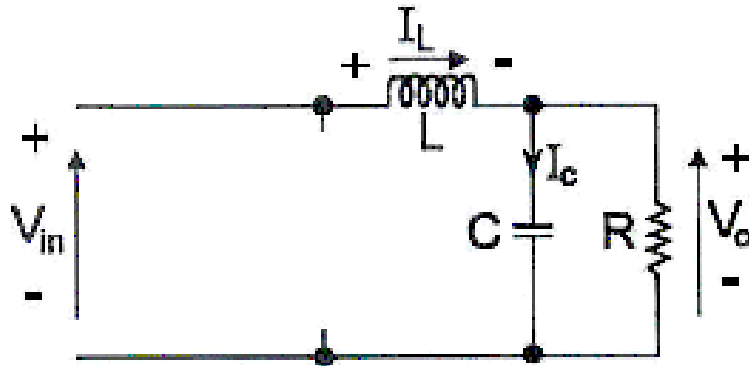
$$|v_{ripple}| \ll V$$

$$v(t) \approx V$$

Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck/Step-Down converter)



Διακόπτης κλειστός (ON)



Διακόπτης ON

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{dI_L}{dt}$$

Γραμμική αύξηση του
ρεύματος πηνίου

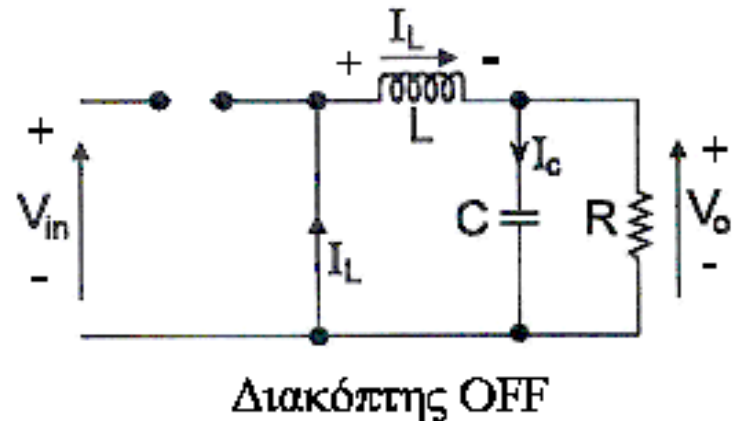
$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT_s} = \frac{V_{in} - V_o}{L}$$

$$\Delta I_L = \left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT_s$$



Διακόπτης ανοικτός (OFF)

- ο Το ρεύμα ρέει μέσω της διόδου ελευθέρως ροής.



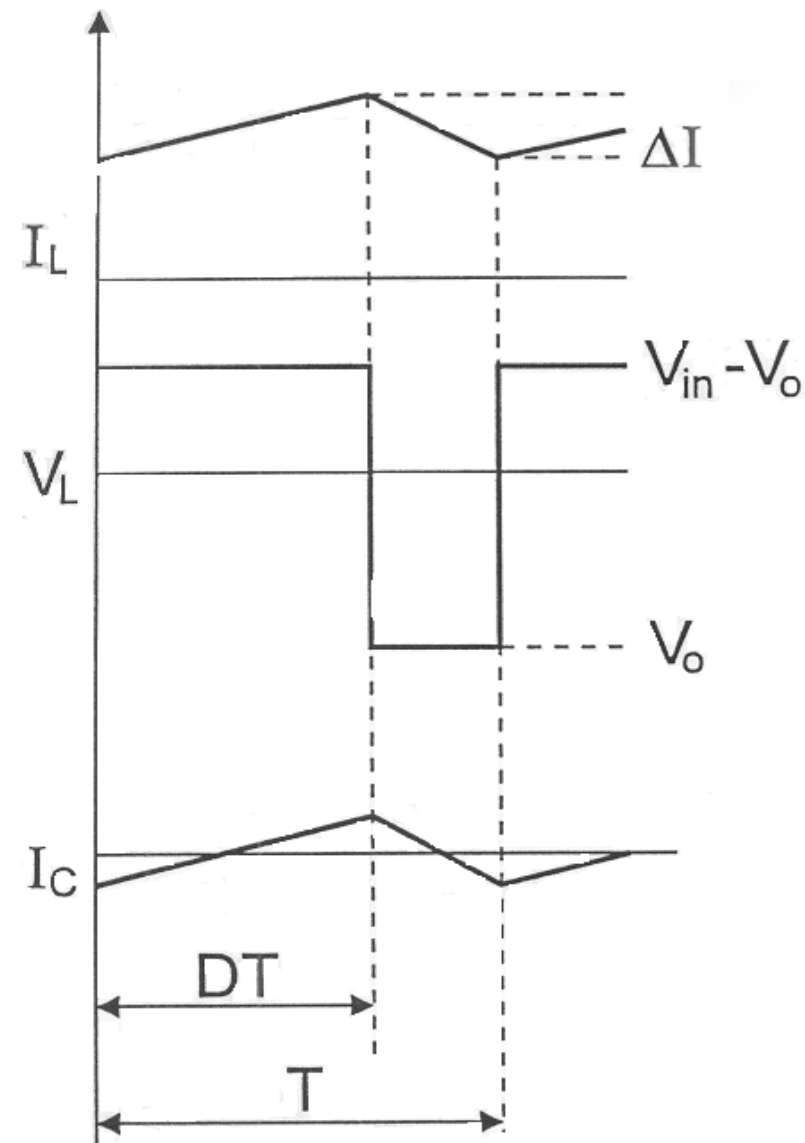
$$V_L = -V_o = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} \Rightarrow \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T_s} = -\frac{V_o}{L}$$

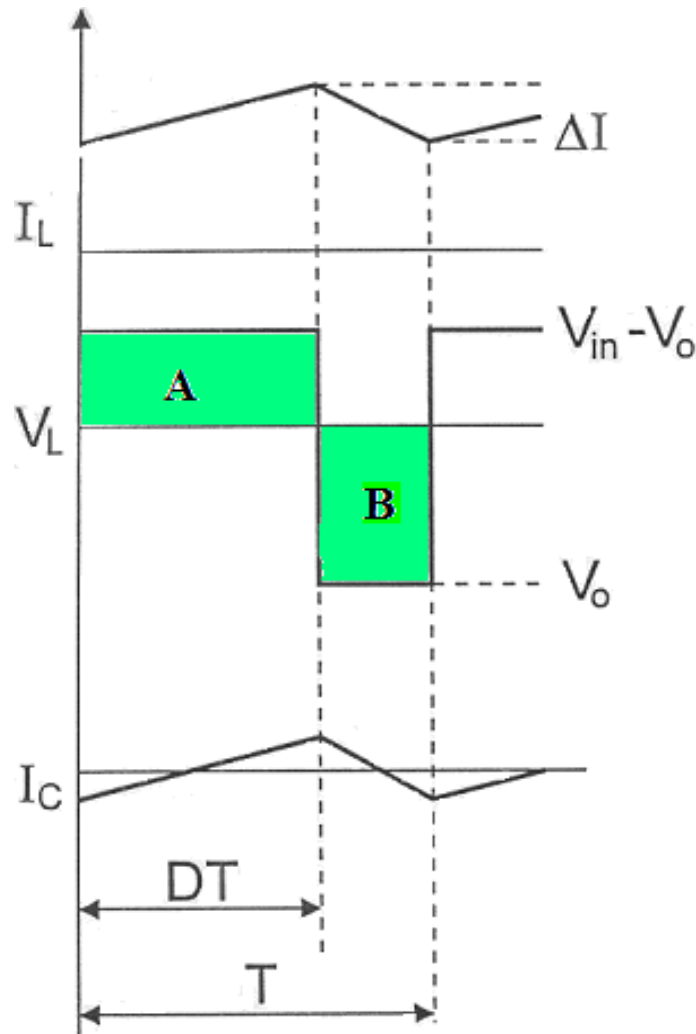
$$\Delta I_L = -(\frac{V_o}{L})(1 - D)T_s$$

Κυματομορφές Μετατροπέα Υποβιβασμού

- Για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα πηνίου στην αρχή κάθε περιόδου είναι ίσο με το ρεύμα στο τέλος. (το πηνίο είναι παθητικό στοιχείο)
- Θεωρώντας ότι η τάση εξόδου είναι καθαρή dc, το ίδιο συμβαίνει για το ρεύμα εξόδου.
- Ο πυκνωτής απορροφά την κυμάτωση του ρεύματος πηνίου



Κυματομορφές Μετατροπέα Υποβιβασμού



- Επειδή το πηνίο δεν καταναλώνει ενέργεια θα πρέπει τα εμβαδά A, B να είναι ίσα.

Δηλαδή:

$$(V_{in} - V_o)DT_s = V_o(1 - D)T_s$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D$$

Λόγος μετατροπής
εισόδου-εξόδου



Κυματομορφές Μετατροπέα Υποβιβασμού

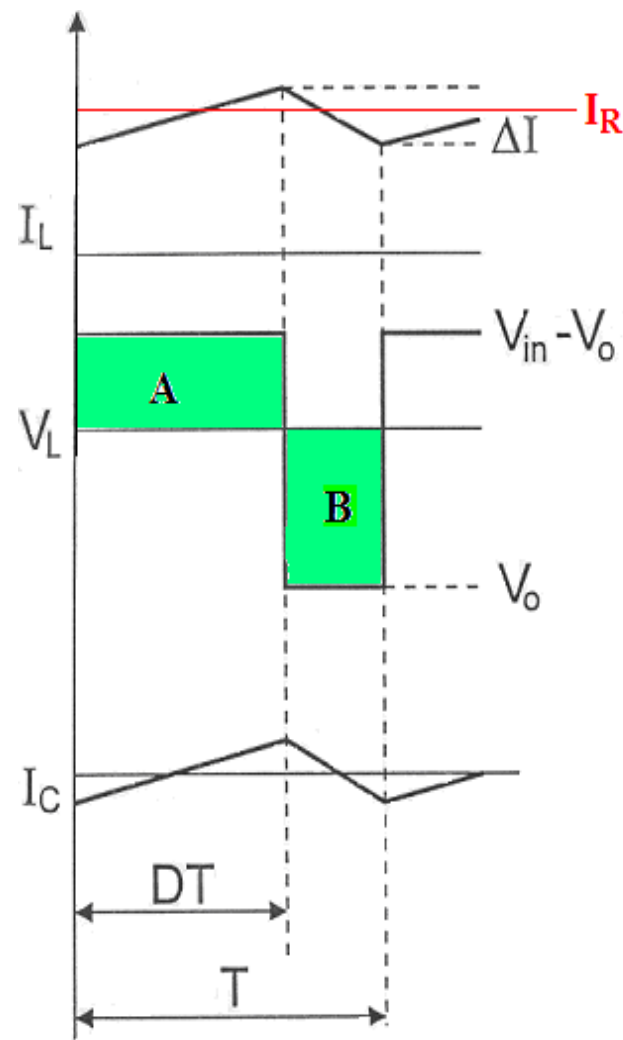
- Το μέσο ρεύμα πηνίου είναι ίσο με το ρεύμα εξόδου (καθαρό dc):

$$\bar{I}_L = I_R = \frac{V_o}{R}$$

- Το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα πηνίου προκύπτει από το σχήμα:

$$I_{\max} = \bar{I}_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1-D) T_s \right]$$

$$I_{\min} = \bar{I}_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1-D) T_s \right]$$



Όριο μεταξύ συνεχόμενης-διακοπτόμενης λειτουργίας

- Για να έχουμε λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου πρέπει προφανώς το $I_{min} > 0$.
- Συνεπώς το όριο για δεδομένη διακοπτική συχνότητα f_s , είναι:

$$I_{min} = 0 = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf_s} \right]$$

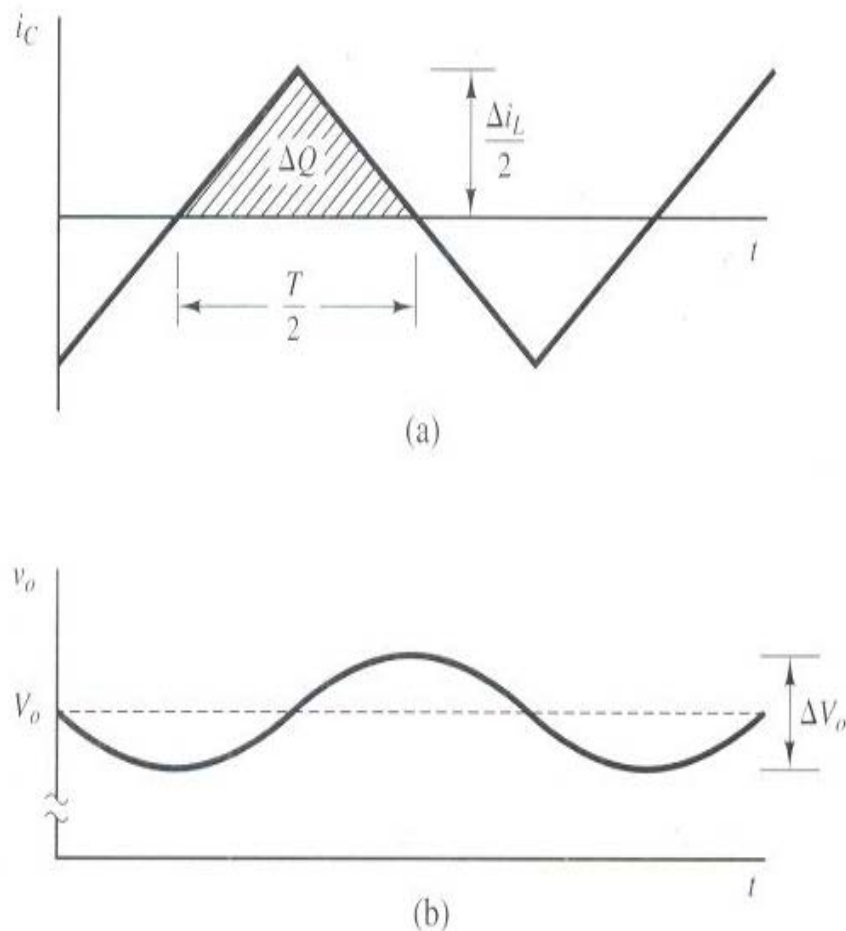
$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f_s}$$

- Δηλαδή, αυτή είναι η ελάχιστη αυτεπαγωγή του φίλτρου για λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου



Κυμάτωση τάσης εξόδου

- Πρακτικά η τάση εξόδου δεν είναι καθαρή dc, αλλά έχει μικρή κυμάτωση
- Η τάση εξόδου αυξάνει ελαφρά όταν το ρεύμα πυκνωτή είναι θετικό, ενώ μειώνεται ελαφρά όταν είναι αρνητικό.
- Ο πυκνωτής φορτίζεται όταν το ρεύμα είναι θετικό. Η αλλαγή στο φορτίο του είναι ίση με το σκιασμένο τμήμα ΔQ .
- Θυμηθείτε ότι ο πυκνωτής παίρνει την κυμάτωση του ρεύματος πηνίου



Κυμάτωση τάσης εξόδου

- Το σκιασμένο εμβαδό είναι: $\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T_s}{2} \right) \left(\frac{\Delta I_L}{2} \right) = \frac{T_s \Delta I_L}{8}$

$$\Delta V_o = \frac{T_s \Delta I_L}{8C}$$

- Χρησιμοποιώντας τη σχέση για την κυμάτωση του ρεύματος πηνίου, προκύπτει:

$$\Delta V_o = \frac{V_o (1-D) T_s^2}{8LC} = \frac{V_o (1-D)}{8LC f_s^2}$$

- Ως ποσοστό της τάσης εξόδου:

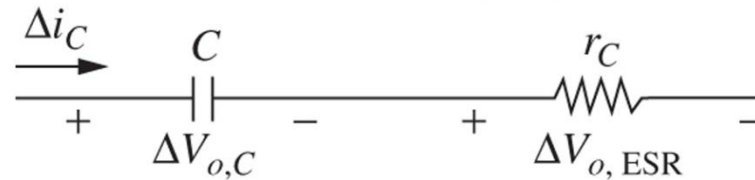
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D) T_s^2}{8LC} = \frac{(1-D)}{8LC f_s^2}$$

- Τυπική τιμή για το ποσοστό της κυμάτωσης είναι το 1-2%



Αντίσταση πυκνωτή – επίδραση στην κυμάτωση τάσης εξόδου

- Η προηγούμενη σχέση για ΔV_o θεωρεί ιδανικό πυκνωτή
- Στην πράξη, ο πυκνωτής μοντελοποιείται επιπλέον με μια αντίσταση σε σειρά (ESR) και μια αυτεπαγωγή (ESL)



- Για την κυμάτωση παίζει ρόλο μόνο η ESR
- Για συνεχόμενη αγωγή I_L , το ρεύμα πυκνωτή είναι τριγωνικό και η κυμάτωση τάσης στα άκρα της ESR είναι:

$$\Delta V_{o,ESR} = \Delta i_C r_C = \Delta i_L r_C$$

- Η συνολική κυμάτωση εξόδου αποτελείται από έναν όρο που οφείλεται στον πυκνωτή και έναν στην ESR

$$\Delta V_o < \Delta V_{o,C} + \Delta V_{o,ESR}$$



Αντίσταση πυκνωτή – επίδραση στην κυμάτωση τάσης εξόδου

- Η συνολική κυμάτωση εξόδου αποτελείται από έναν όρο που οφείλεται στον πυκνωτή και έναν στην ESR

$$\Delta V_o < \Delta V_{o,C} + \Delta V_{o,ESR}$$

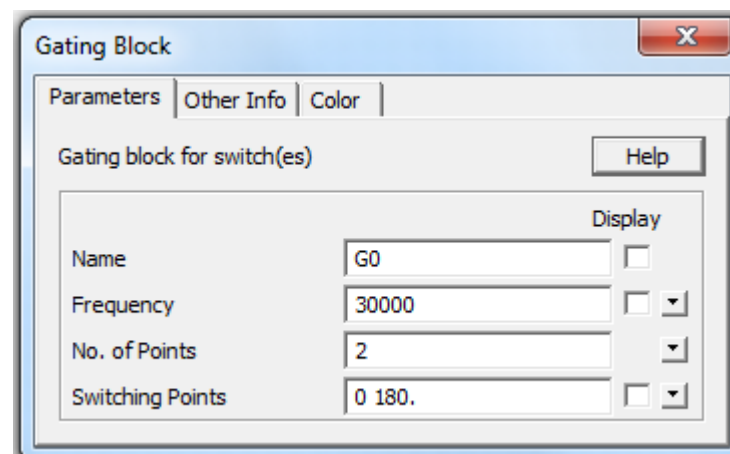
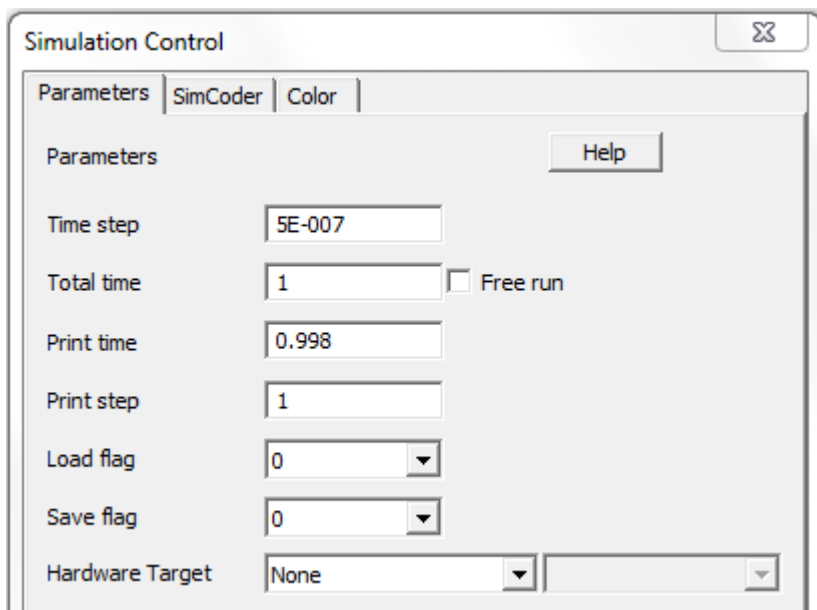
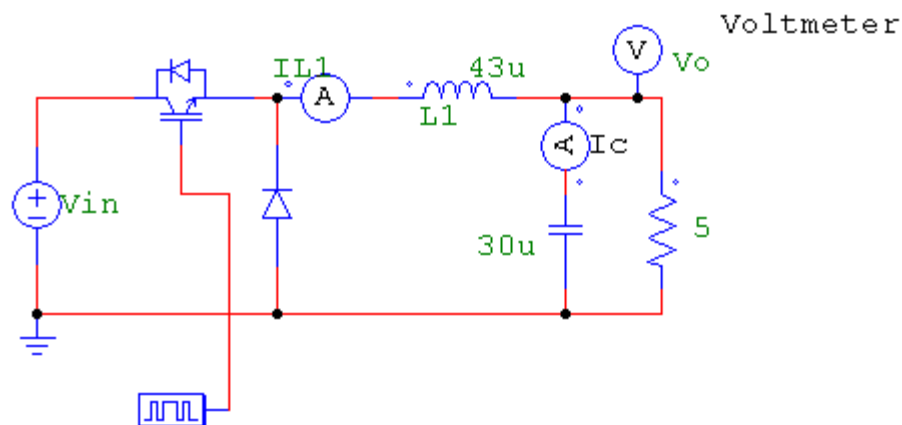
- Ωστόσο, πολλές φορές η $\Delta V_{o,ESR} \gg \Delta V_{o,C}$ οπότε ο πυκνωτής επιλέγεται στη βάση της ESR και όχι μόνο του μεγέθους του

$$\Delta V_o \approx \Delta V_{o,ESR} = \Delta i_C r_C$$

- Η ESR είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής χωρητικότητας
- Αρκετοί κατασκευαστές έχουν ειδικούς πυκνωτές με χαμηλή ESR για τροφοδοτικά (low-ESR capacitors)



Προσομοίωση PSIM



Ιδανικός Μετατροπέας

- Επειδή θεωρούμε ιδανικό μετατροπέα, δεν έχουμε απώλειες και συνεπώς η ισχύς εισόδου πρέπει να είναι ίση με την ισχύ εξόδου:

$$P_{in} = P_o$$

$$V_{in} I_{in} = V_o I_o$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o}$$

- Δηλαδή ο μετατροπέας υποβιβασμού είναι ισοδύναμος με ένα dc μετασχηματιστή.



Σχεδίαση

- Επιθυμητή η λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου.
- Η επιλογή τιμών L και C γίνεται έτσι ώστε να έχουμε μια συγκεκριμένη κυμάτωση (μικρή) τάσης εξόδου, που ορίζεται από το γινόμενο LC .
- Ύστερα, το L γίνεται όσο μεγάλο χρειάζεται για να αποφύγουμε τη διακοπτόμενη λειτουργία ή για να μειωθεί το μέγιστο ρεύμα του κυκλώματος.
- Όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο μειώνεται το μέγεθος του πηνίου και του πυκνωτή που χρειάζεται, **αλλά** αυξάνονται οι απώλειες λόγω διακοπτικής λειτουργίας.
- Τυπικές συχνότητες λειτουργίας είναι τα 20-50kHz, αλλά ακόμη και μέχρι 500kHz δεν είναι σπάνιες.



Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Το ρεύμα πηνίου πέφτει στο μηδέν κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης είναι ανοικτός (OFF) και παραμένει μηδέν μέχρι την επόμενη φορά που θα αρχίσει να άγει ξανά.
- Στο διάστημα που το ρεύμα πηνίου είναι μηδέν, το ρεύμα στο φορτίο το δίνει ο πυκνωτής.
- Στη λειτουργία αυτή, η κυμάτωση του ρεύματος πυκνωτή είναι πολύ πιο μεγάλη, επειδή για ένα μέρος της περιόδου το ρεύμα φορτίου δίνεται από τον πυκνωτή.
- Επίσης, το μέγιστο ρεύμα είναι συνήθως μεγαλύτερο.
- Ο λόγος μετατροπής εξαρτάται από το φορτίο
- Γι' αυτούς τους λόγους, αποφεύγεται η λειτουργία αυτή.



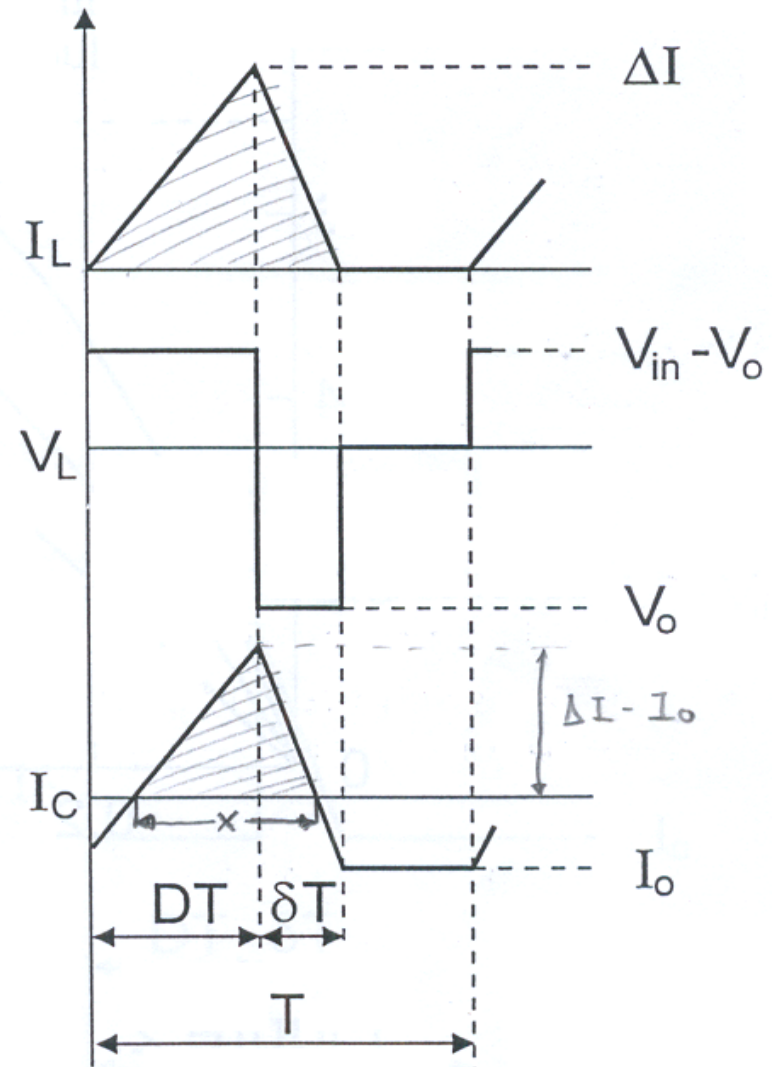
Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Ο λόγος μετατροπής εισόδου-εξόδου βρίσκεται εξισώνοντας τις ισχείς εισόδου-εξόδου

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4k / D^2}}$$

$\mu\epsilon$

$$k = \frac{2L}{RT}$$



Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Ο λόγος μετατροπής δεν εξαρτάται μόνο από το D αλλά είναι συνάρτηση των L , T_s και R .
- Το όριο για τη διακοπτόμενη λειτουργία προκύπτει και από τη σχέση

$$k < (1 - D)$$

- Για την αποφυγή της διακοπτόμενης λειτουργίας ο συντελεστής k γίνεται μεγάλος με ανάλογη επιλογή της αυτεπαγωγής L .
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι:

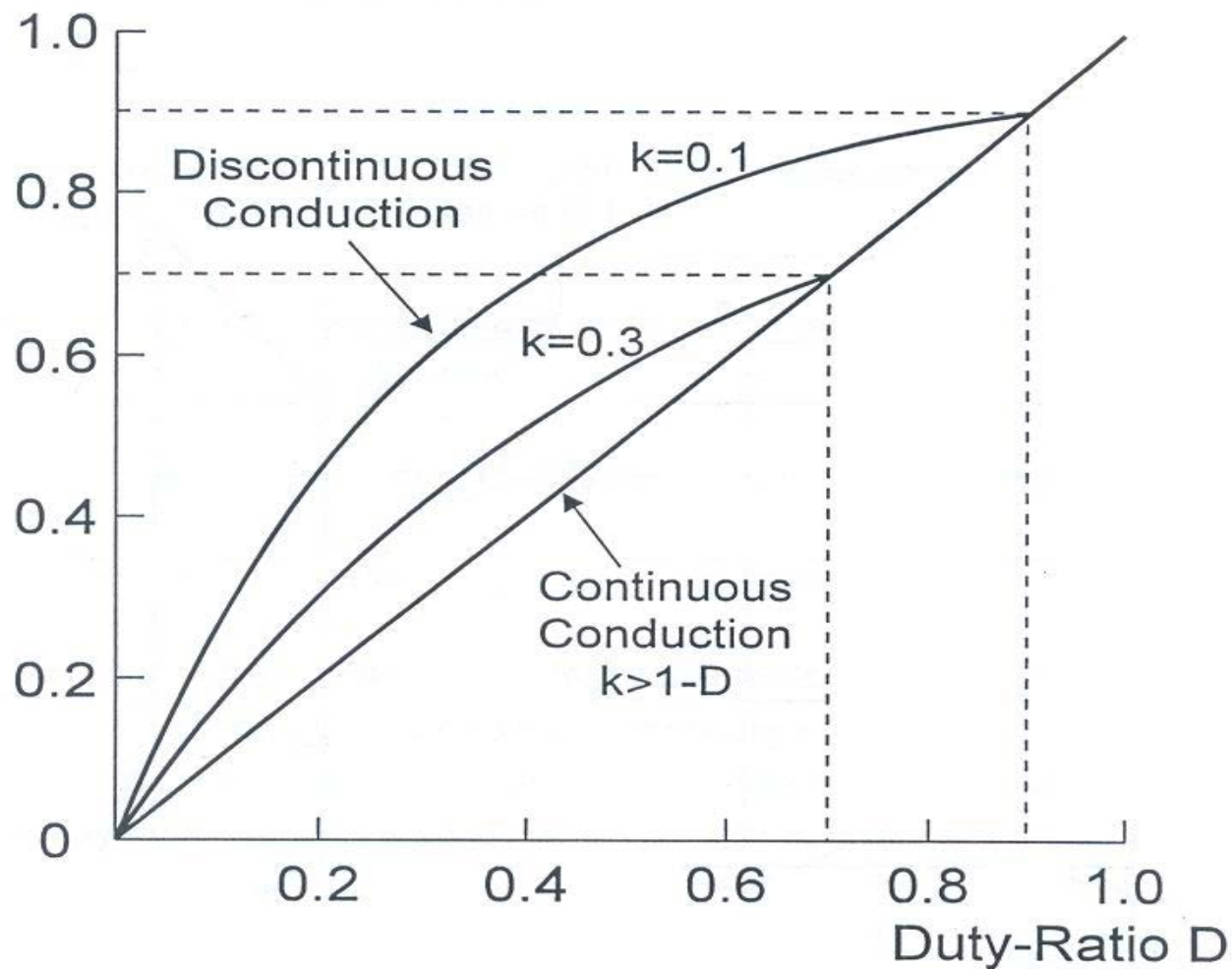
$$\Delta V_o = \frac{(D + \delta)T_s(\Delta I - I_o)^2}{2C\Delta I}$$



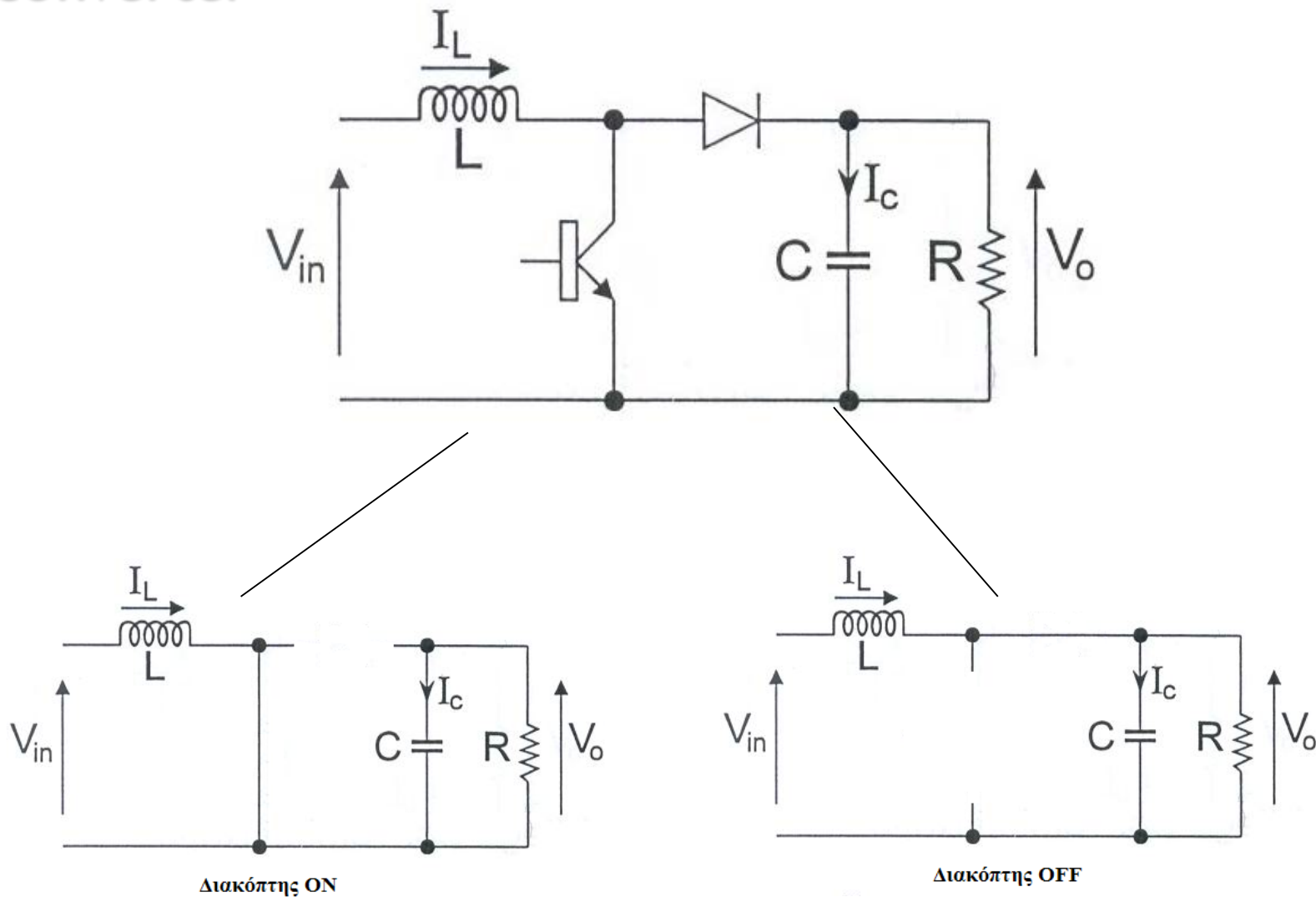
Χαρακτηριστική μετατροπής



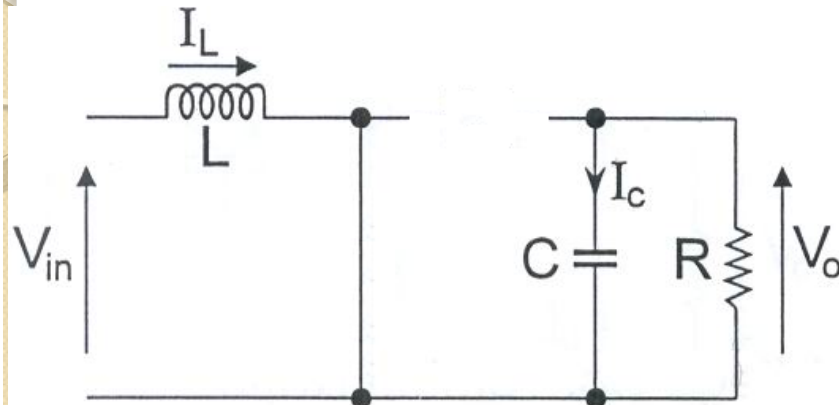
Voltage Conversion Ratio



Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost/Step-Up converter)



Διακόπτης κλειστός (ON)



Διακόπτης ON

$$V_L = V_{in} = L \frac{dI_L}{dt}$$

Δίοδος ανάστροφα
πολωμένη.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT_s} = \frac{V_{in}}{L}$$

Γραμμική αύξηση του
ρεύματος πηνίου.

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} DT_s$$

Ο πυκνωτής δίνει το ρεύμα
φορτίου

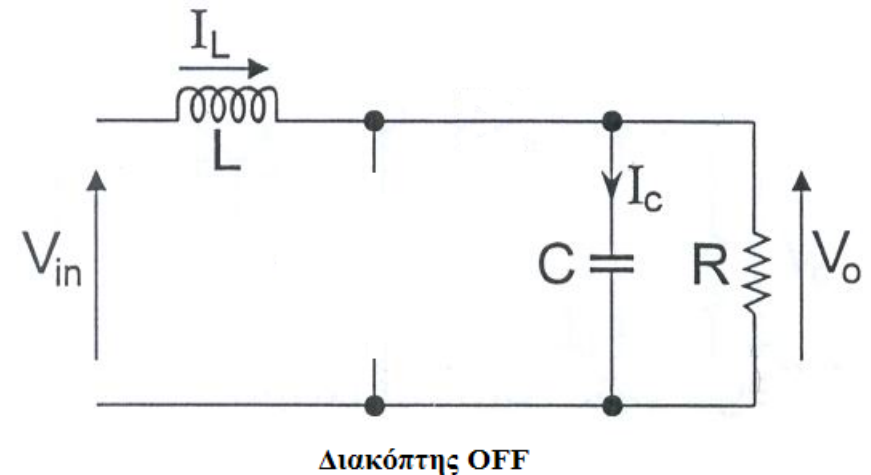


Διακόπτης ανοικτός (OFF)

- Η δίοδος πολώνεται ορθά για να περνά το ρεύμα πηνίου.

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L}$$



$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T_s} = \frac{V_{in} - V_o}{L}$$

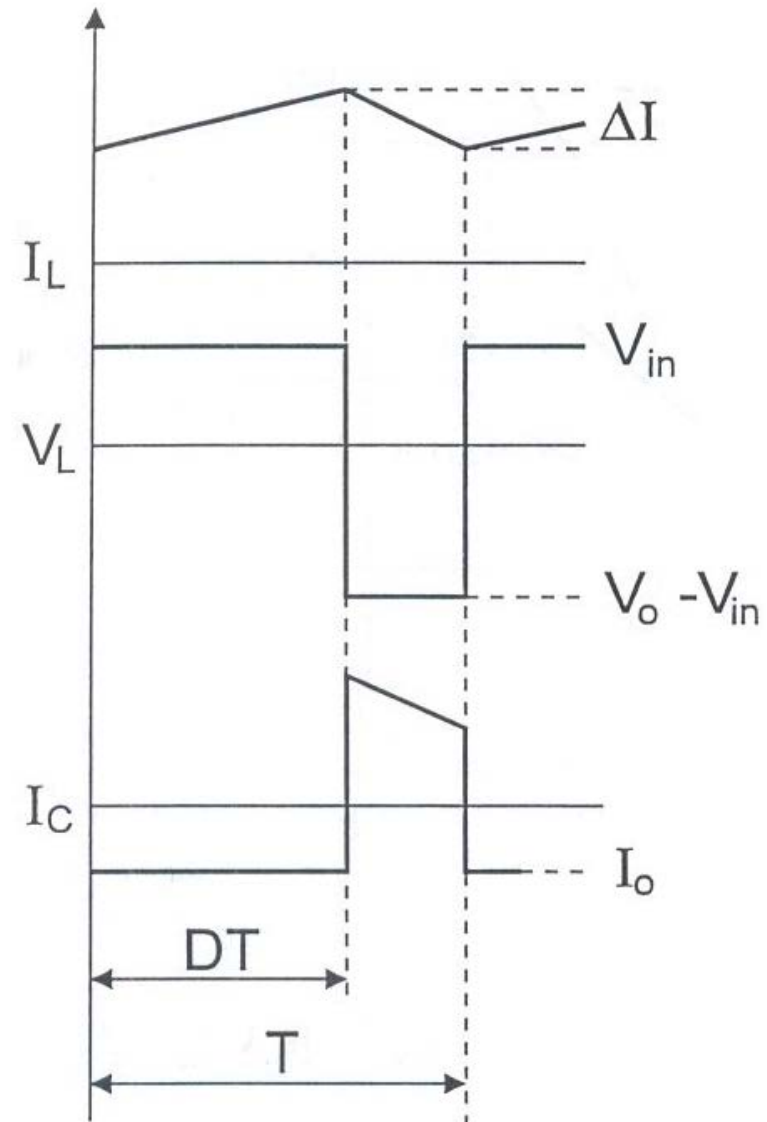
Στο πηνίο εφαρμόζεται τάση $V_{in} - V_o$, δηλαδή το ρεύμα του μειώνεται γραμμικά.

$$\Delta I_L = \left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) (1-D)T_s$$

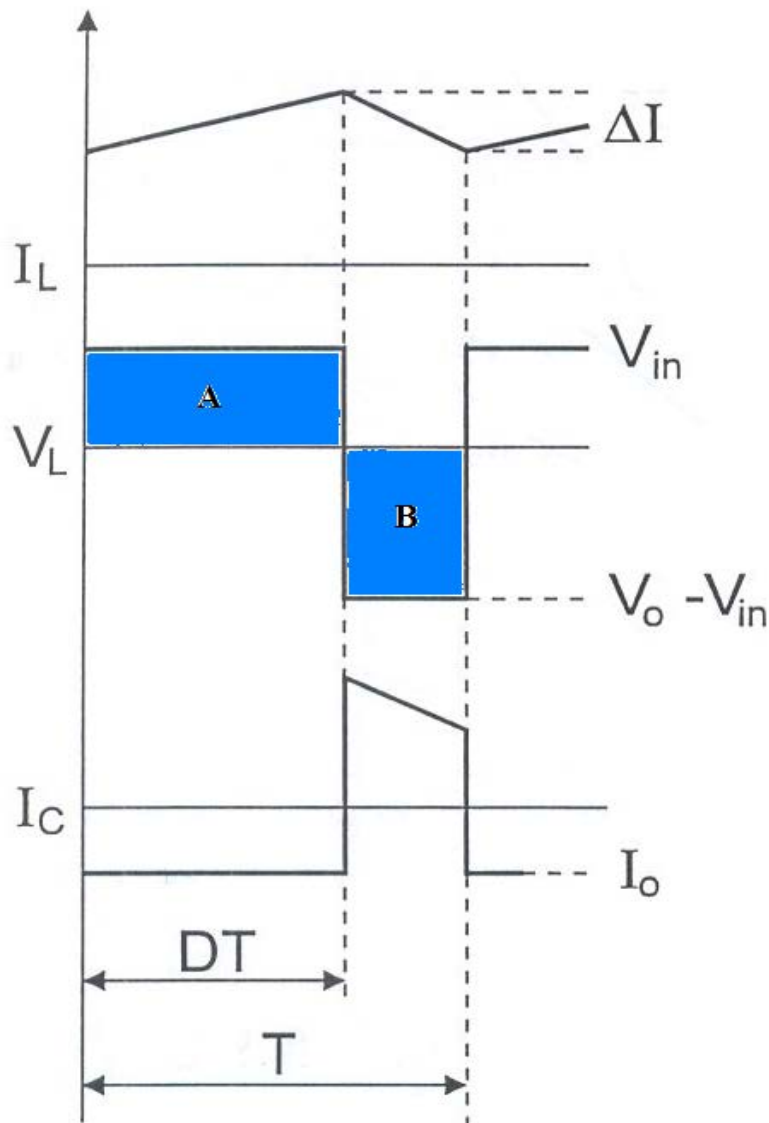


Κυματομορφές Μετατροπέα Ανύψωσης

- Για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα πηνίου στην αρχή κάθε περιόδου είναι ίσο με το ρεύμα στο τέλος. (το πηνίο είναι παθητικό στοιχείο)
- Θεωρώντας ότι η τάση εξόδου είναι καθαρή dc, το ίδιο συμβαίνει για το ρεύμα εξόδου.



Κυματομορφές Μετατροπέα Ανύψωσης



- Επειδή το πηνίο δεν καταναλώνει ενέργεια θα πρέπει τα εμβαδά A, B να είναι ίσα.

Δηλαδή:

$$V_{in}DT_s = (V_o - V_{in})(1 - D)T_s$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D}$$

- Λόγος μετατροπής εισόδου-εξόδου
- Δηλαδή: $V_o > V_{in}$



Ιδανικός Μετατροπέας

- Επειδή δεν έχουμε απώλειες, η ισχύς εισόδου πρέπει να είναι ίση με την ισχύ εξόδου και το μέσο ρεύμα πηνίου προκύπτει:

$$P_{in} = P_o$$

$$V_{in} I_{L,av} = V_o I_o$$

$$I_{L,av} = \frac{V_o}{V_{in}} I_o = \frac{I_o}{1-D}$$

- Για ωμικό φορτίο με αντίσταση R το μέσο ρεύμα πηνίου προκύπτει:

$$I_{L,av} = \frac{I_o}{1-D} = \frac{V_o}{R(1-D)} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R}$$



Κυματομορφές Μετατροπέα Ανύψωσης

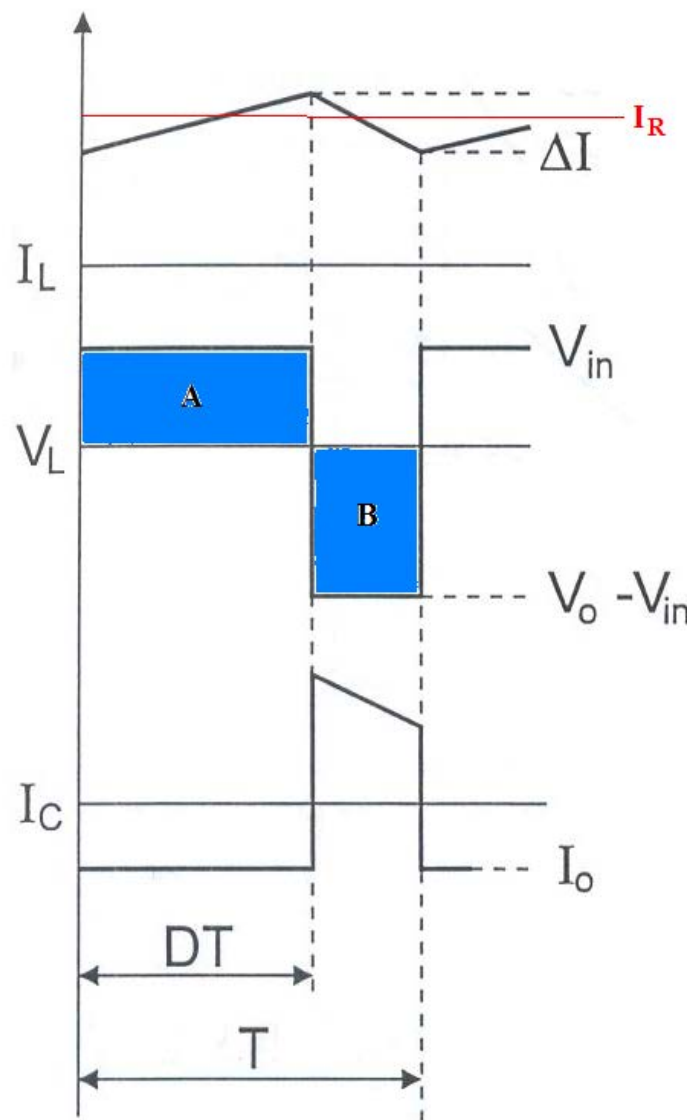
- Το μέσο ρεύμα πηνίου είναι ίσο με το ρεύμα εξόδου (καθαρό dc):

$$\bar{I}_L = I_R = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R}$$

- Το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα πηνίου προκύπτει από το σχήμα:

$$I_{\max} = \bar{I}_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} + \frac{V_{in} D T_s}{2L}$$

$$I_{\min} = \bar{I}_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{in} D T_s}{2L}$$



Όριο μεταξύ συνεχόμενης-διακοπτόμενης λειτουργίας

- Για να έχουμε λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου πρέπει προφανώς το $I_{min} > 0$.
- Συνεπώς το όριο για δεδομένη διακοπτική συχνότητα f_s , είναι:

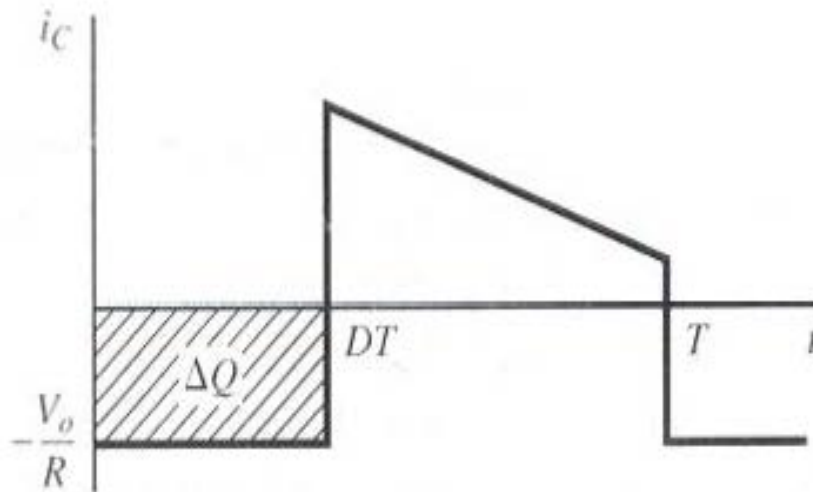
$$I_{min} = 0 = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{in} D T_s}{2L}$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_s}$$

- Δηλαδή, αυτή είναι η ελάχιστη αυτεπαγωγή του φίλτρου για λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου



Κυμάτωση τάσης εξόδου



- Πρακτικά η τάση εξόδου δεν είναι καθαρή dc, αλλά έχει μικρή κυμάτωση.
- Το σκιασμένο εμβαδό είναι:

Ως ποσοστό της τάσης εξόδου:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf_s}$$

$$\Delta Q = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT_s = C \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT_s}{RC} = \frac{V_o D}{RCf_s}$$



Παρατηρήσεις

- Ο λόγος μετατροπής τάσης εξαρτάται μόνο από το D και είναι πάντα μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας.
- Θεωρητικά, η τάση εξόδου γίνεται άπειρη όταν το D γίνει 1. Πρακτικά, όμως, η μέγιστη τάση εξόδου περιορίζεται από τα στοιχεία του κυκλώματος και τις απώλειες.
- Η κυμάτωση του ρεύματος πυκνωτή είναι σημαντική και εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου.
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι ανεξάρτητη από το πηνίο L . Η απαίτηση για μια συγκεκριμένη κυμάτωση δίνει απ' ευθείας το μέγεθος του πυκνωτή.
- Το μέγεθος του πηνίου προσδιορίζεται από το μέγιστο ρεύμα και για την αποφυγή λειτουργίας διακοπτόμενου ρεύματος.
- Χρήση σε ισχύες από μερικά Watts έως MW



Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Το ρεύμα πηνίου πέφτει στο μηδέν κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης είναι ανοικτός (OFF) και παραμένει μηδέν μέχρι την επόμενη φορά που θα αρχίσει να άγει ξανά.
- Στο διάστημα που το ρεύμα πηνίου είναι μηδέν, το ρεύμα στο φορτίο το δίνει ο πυκνωτής, αφού τόσο ο διακόπτης όσο και η δίοδος δεν άγουν.
- Στη λειτουργία αυτή, η μέγιστη τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη απ' τη συνεχόμενη λειτουργία για το ίδιο D .
- δT είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να μηδενιστεί το ρεύμα πηνίου, μετά τη σβέση του τρανζίστορ.



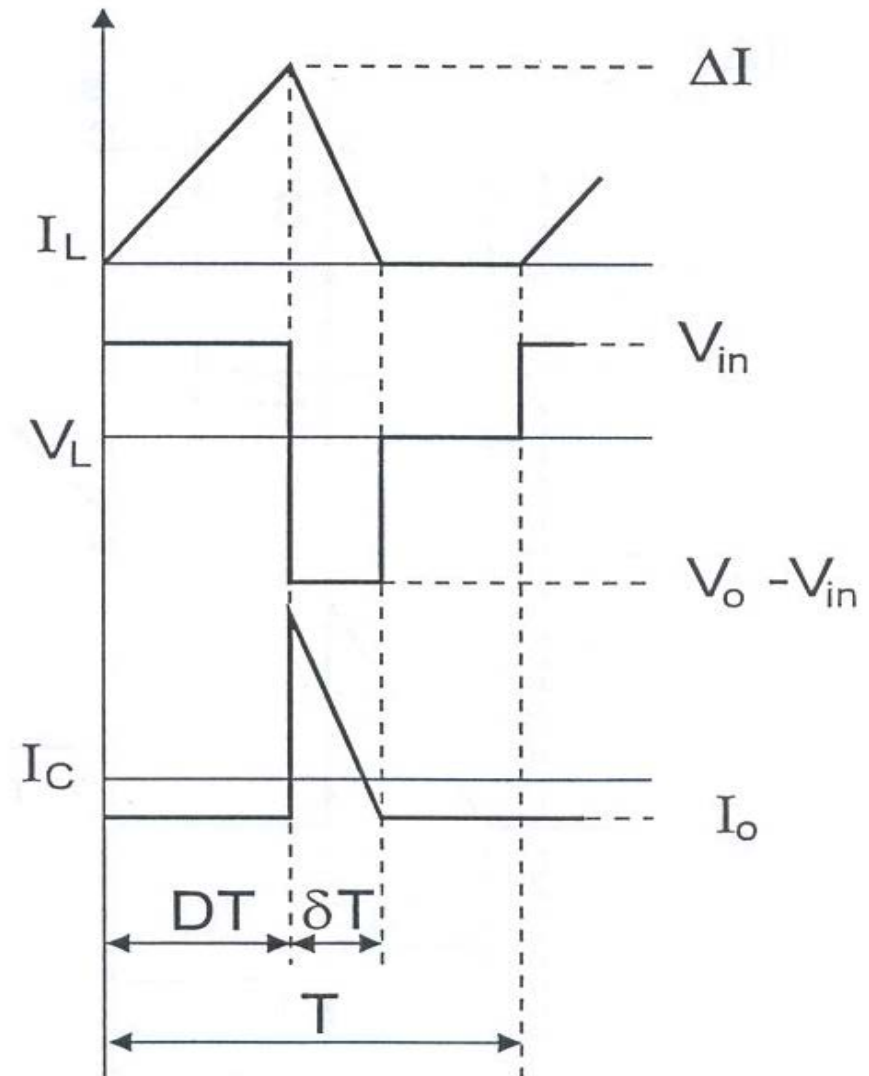
Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Ο λόγος μετατροπής εισόδου-εξόδου βρίσκεται εξισώνοντας τις ισχύες εισόδου-εξόδου:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4D^2 / k}}{2}$$

με

$$k = \frac{2L}{RT}$$



Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Ο λόγος μετατροπής δεν εξαρτάται μόνο από το D αλλά είναι συνάρτηση των L , T_s και R .
- Το όριο για τη διακοπτόμενη λειτουργία προκύπτει και από τη σχέση:

$$\delta < (I - D)$$

- Ύστερα από πράξεις, αντικαθιστώντας το δ προκύπτει:

$$k < D(I - D)^2$$

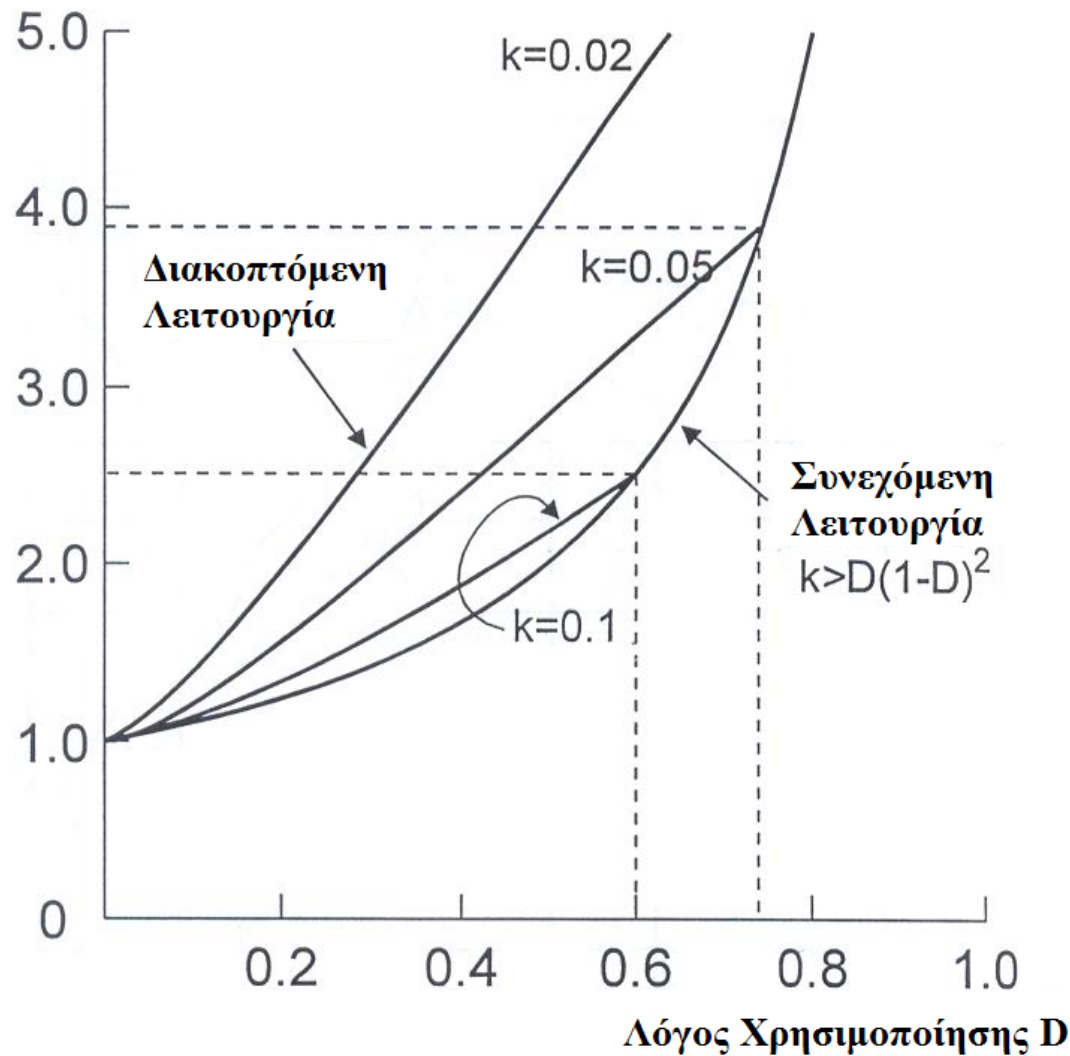
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι:

$$\Delta V_o = \frac{\delta T_s (\Delta I - I_o)^2}{2C \Delta I}$$



Χαρακτηριστική μετατροπής

Λόγος Μετατροπής Τάσης



Παρατηρήσεις

- Ο λόγος μετατροπής μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με το D .
- Χωρίς φορτίο, $k=0$, η τάση εξόδου είναι θεωρητικά άπειρη. Συνεπώς, πρέπει να διασφαλίζεται ότι έστω και ένα ελάχιστο φορτίο υπάρχει στην έξοδο.
- Η λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος αποφεύγεται λόγω του μεγαλύτερου μέγιστου ρεύματος και κυμάτωσης τάσης εξόδου και της εξάρτησης της τάσης εξόδου από το φορτίο.
- Ο σχεδόν γραμμικός λόγος μετατροπής, όμως, επιτρέπει ευκολότερο έλεγχο κλειστού βρόχου και γι' αυτό η λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται περιστασιακά.

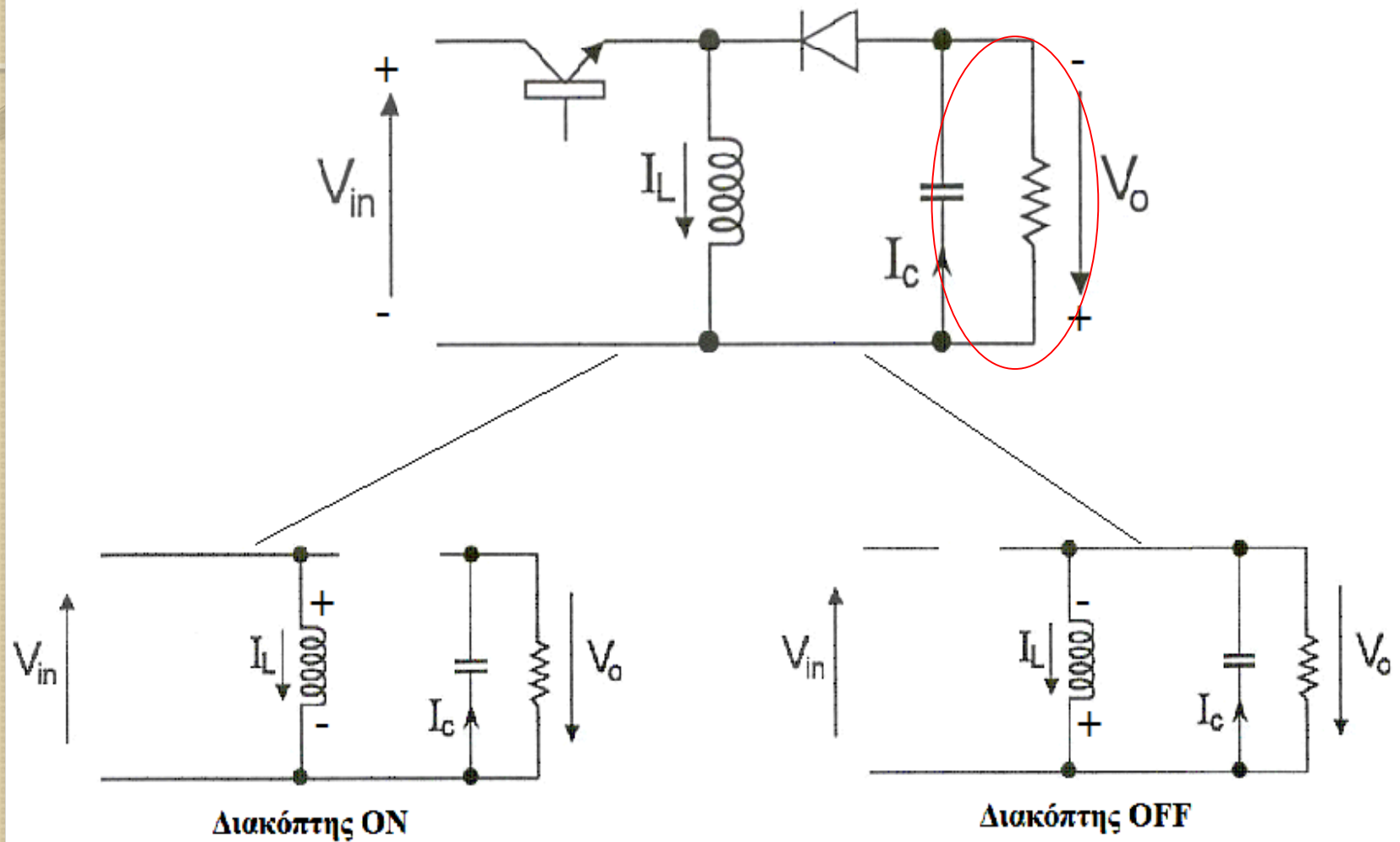


Μικτός μετατροπέας (Buck/Boost Converter)

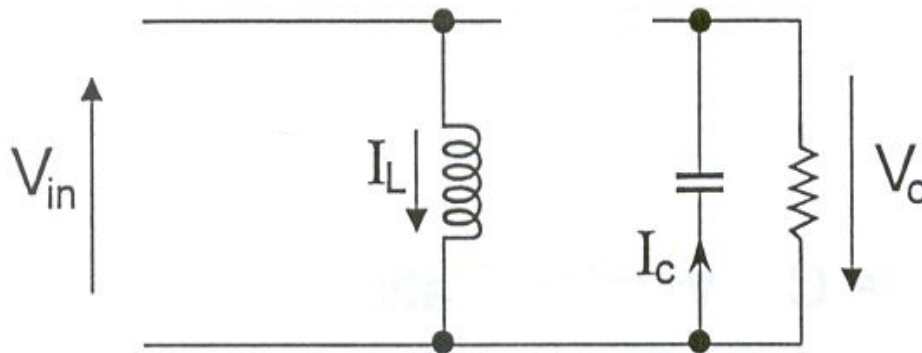
- Σειριακή σύνδεση μετατροπέα υποβιβασμού και ανύψωσης.
- Λειτουργίες ανύψωσης & υποβιβασμού σε ένα κύκλωμα.
- Η τάση εξόδου έχει αντίθετο πρόσημο (αντιστρέφεται).
- ΑΛΛΑ, αυξημένες τάσεις και ρεύματα στα στοιχεία του κυκλώματος.
- Συνεπώς, η χρήση του περιορίζεται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος (έως 200W).



Μικτός Μετατροπέας



Διακόπτης κλειστός (ON)



Διακόπτης ON

$$V_L = V_{in} = L \frac{dI_L}{dt}$$

Δίοδος ανάστροφα
πολωμένη.

Γραμμική αύξηση του
ρεύματος πηνίου, όπως στον
μετατροπέα ανύψωσης.

Ο πυκνωτής δίνει το ρεύμα
φορτίου

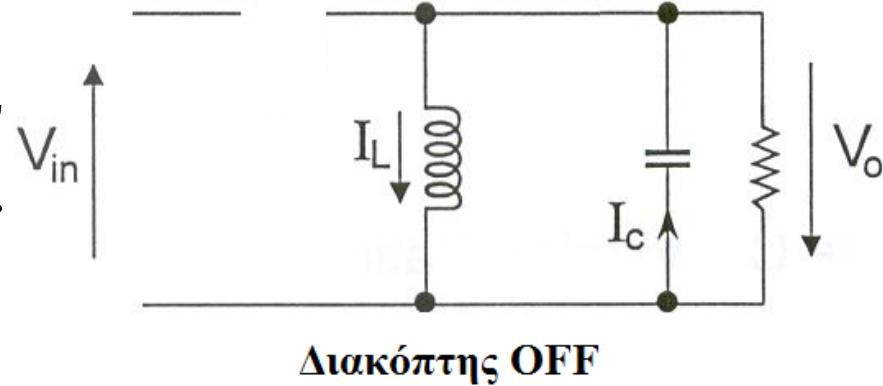
$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT_s} = \frac{V_{in}}{L}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} DT_s$$



Διακόπτης ανοικτός (OFF)

Η πολικότητα της τάσης της επαγωγής αλλάζει και η δίοδος πολώνεται ορθά όταν γίνει ίση με την τάση εξόδου.



$$V_L = -V_o = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_o}{L}$$



$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T_s} = -\frac{V_o}{L}$$

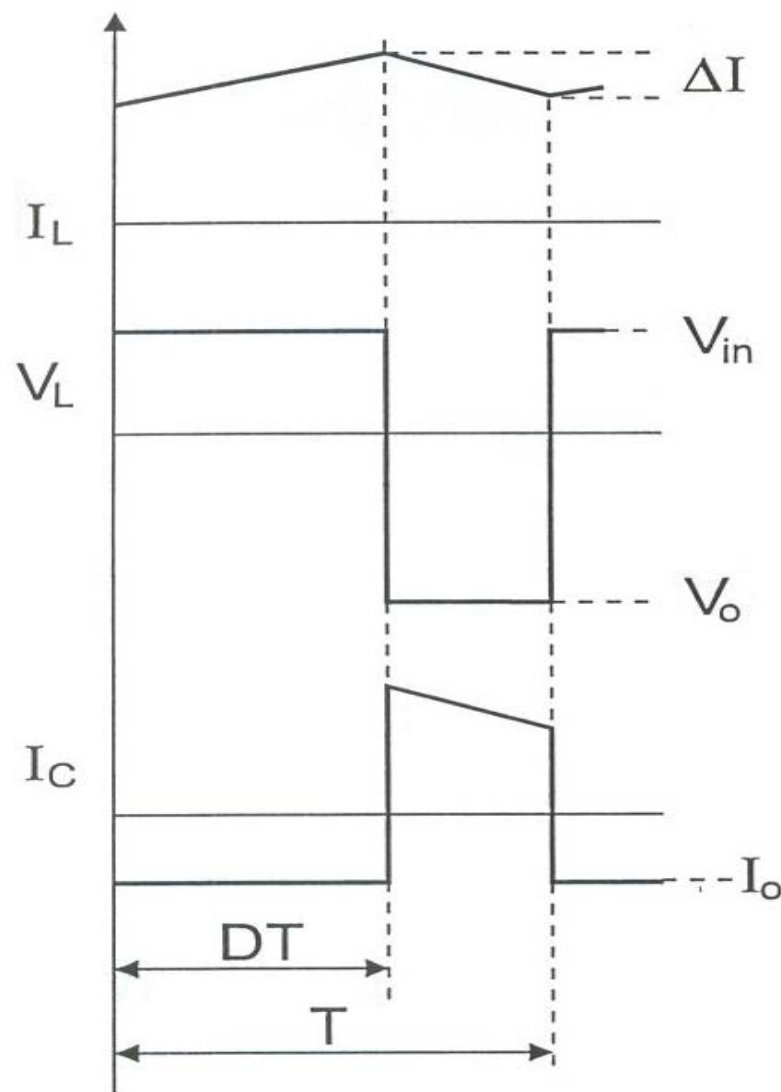
- Στο πηνίο εφαρμόζεται τάση $-V_o$, δηλαδή το ρεύμα του μειώνεται γραμμικά.

$$\Delta I_L = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T_s$$

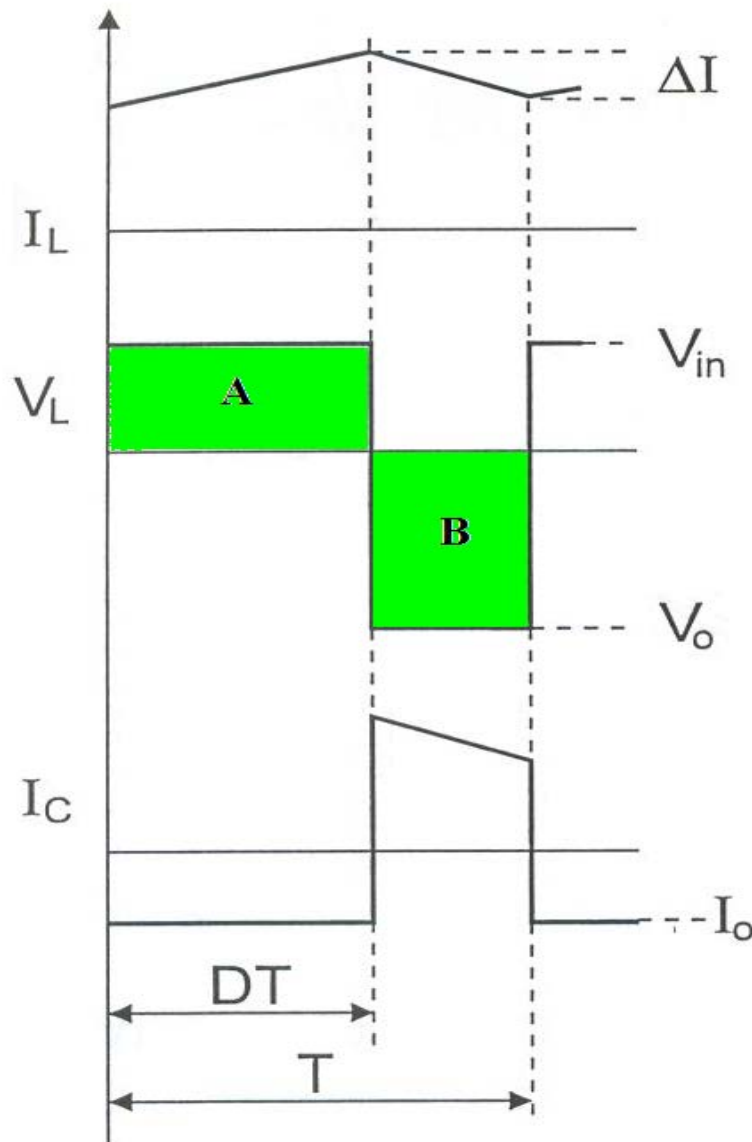


Κυματομορφές Μικτού Μετατροπέα

- Για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα πηνίου στην αρχή κάθε περιόδου είναι ίσο με το ρεύμα στο τέλος. (το πηνίο είναι παθητικό στοιχείο)
- Θεωρώντας ότι η τάση εξόδου είναι καθαρή dc, το ίδιο συμβαίνει για το ρεύμα εξόδου.



Κυματομορφές Μικτού Μετατροπέα



- Επειδή το πηνίο δεν καταναλώνει ενέργεια θα πρέπει τα εμβαδά A, B να είναι ίσα. Δηλαδή:

$$V_{in}DT_s = V_o(1-D)T_s$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D}$$

- Αν $D > 0.5$ η τάση εξόδου μεγαλύτερη
- Αν $D < 0.5$ η τάση εξόδου μικρότερη!



Ιδανικός Μετατροπέας

- Επειδή δεν έχουμε απώλειες, η ισχύς εισόδου πρέπει να είναι ίση με την ισχύ εξόδου και το μέσο ρεύμα πηνίου προκύπτει:

$$P_{in} = P_o$$

$$V_{in} I_{in} = V_o I_o$$

$$I_{in} = \frac{V_o}{V_{in}} I_o = \frac{I_o D}{1 - D}$$

- Αλλά: $I_{in} = D I_{L,av}$
- Για ωμικό φορτίο με αντίσταση R το μέσο ρεύμα πηνίου προκύπτει:

$$I_{L,av} = \frac{I_o}{1 - D} = \frac{V_o}{R(1 - D)} = \frac{V_{in} D}{(1 - D)^2 R}$$

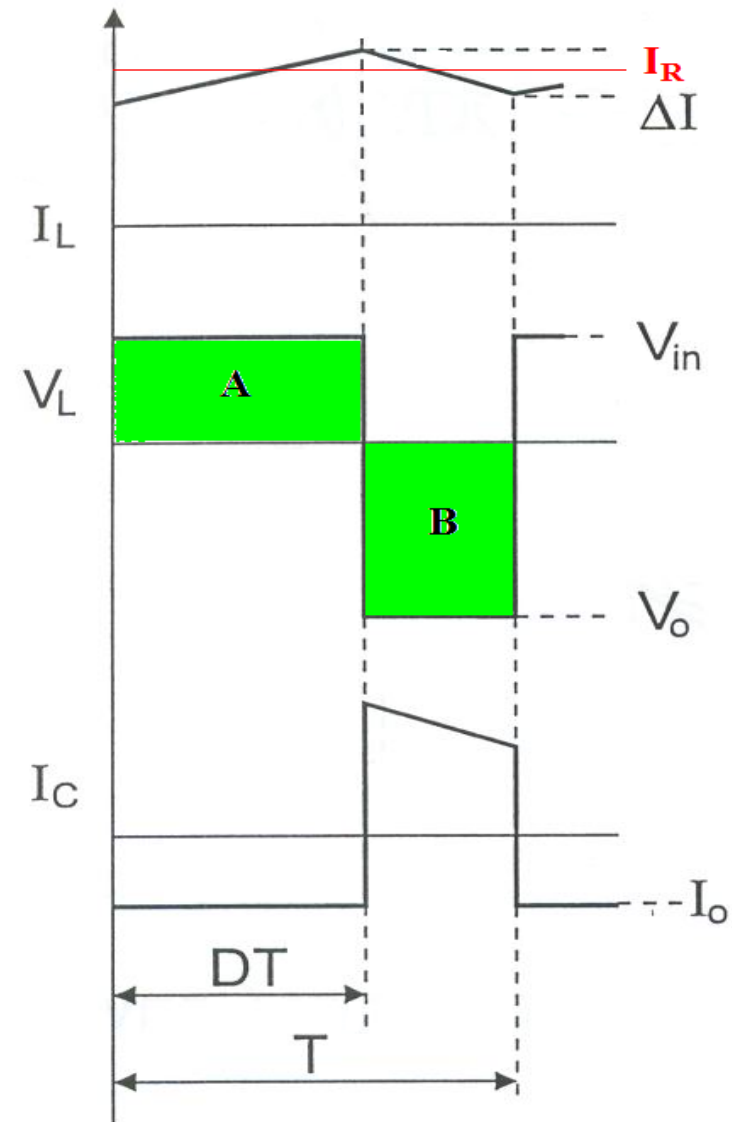


Κυματομορφές Μικτού Μετατροπέα

- Το μέσο ρεύμα πηνίου είναι ίσο με το άθροισμα του μέσου ρεύματος εισόδου και του ρεύματος εξόδου
- Το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα πηνίου προκύπτει από το σχήμα:

$$I_{\max} = \bar{I}_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_{in} D}{(1-D)^2 R} + \frac{V_{in} D T_s}{2L}$$

$$I_{\min} = \bar{I}_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_{in} D}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{in} D T_s}{2L}$$



Όριο μεταξύ συνεχόμενης-διακοπτόμενης λειτουργίας

- Για να έχουμε λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου πρέπει προφανώς το $I_{min} > 0$.
- Συνεπώς το όριο για δεδομένη διακοπτική συχνότητα f_s , είναι:

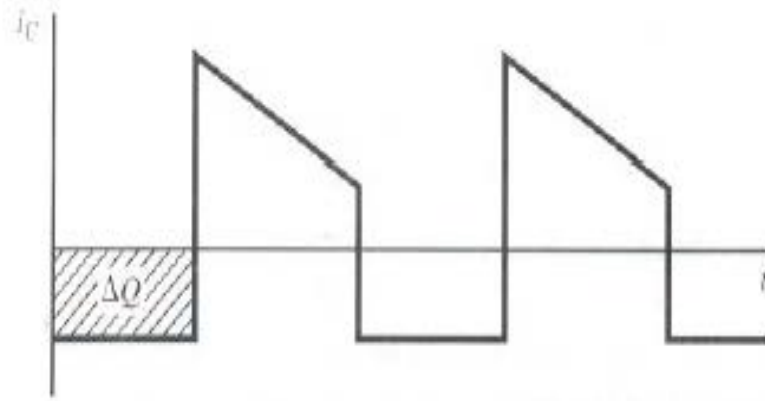
$$I_{min} = 0 = \frac{V_{in} D}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{in} D T_s}{2L}$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2 f_s}$$

- Δηλαδή, αυτή είναι η ελάχιστη αυτεπαγωγή του φίλτρου για λειτουργία συνεχόμενου ρεύματος πηνίου



Κυμάτωση τάσης εξόδου



Ως ποσοστό της τάσης
εξόδου:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf_s}$$

Το σκιασμένο εμβαδό
είναι:

$$\Delta Q = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT_s = C \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT_s}{RC} = \frac{V_o D}{RCf_s}$$



Παρατηρήσεις

- Ο μέγιστος λόγος μετατροπής τάσης περιορίζεται από τις απώλειες του κυκλώματος.
- Τα στοιχεία του κυκλώματος υπόκεινται υπό τάση $V_{in} + V_o$.
- Η κυμάτωση του ρεύματος πυκνωτή είναι σημαντική, όπως στον ανύψωσης και εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου.
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι ανεξάρτητη από το πηνίο L . Η απαίτηση για μια συγκεκριμένη κυμάτωση δίνει απ'ευθείας το μέγεθος του πυκνωτή.
- Το μέγεθος του πηνίου προσδιορίζεται από το μέγιστο ρεύμα και για την αποφυγή λειτουργίας διακοπτόμενου ρεύματος.



Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Το ρεύμα πηνίου πέφτει στο μηδέν κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης είναι ανοικτός (OFF) και παραμένει μηδέν μέχρι την επόμενη φορά που θα αρχίσει να άγει ξανά.
- Στο διάστημα που το ρεύμα πηνίου είναι μηδέν, το ρεύμα στο φορτίο το δίνει ο πυκνωτής, αφού τόσο ο διακόπτης όσο και η δίοδος δεν άγουν.
- Στη λειτουργία αυτή, η μέγιστη τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη απ' τη συνεχόμενη λειτουργία για το ίδιο D .
- δT είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να μηδενιστεί το ρεύμα πηνίου, μετά τη σβέση του τρανζίστορ.



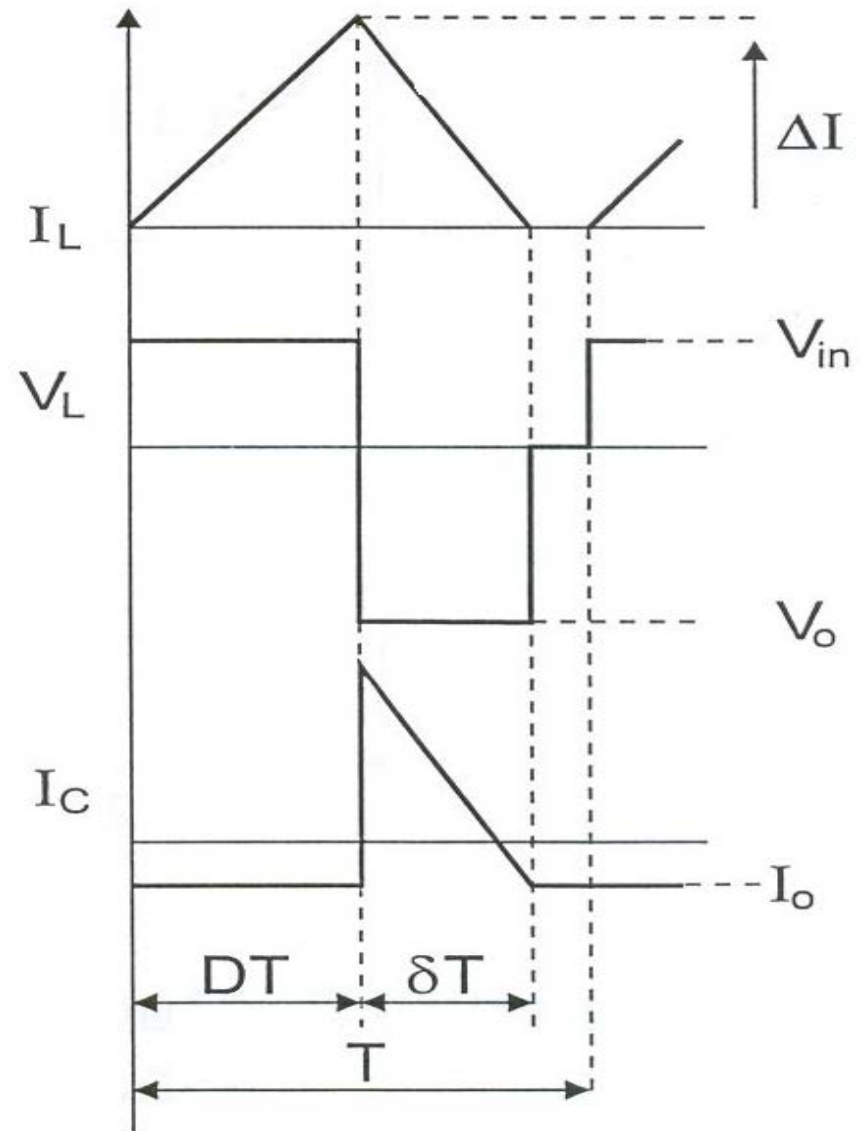
Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Ο λόγος μετατροπής εισόδου-εξόδου βρίσκεται εξισώνοντας τις ισχύες εισόδου-εξόδου:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{\sqrt{k}}$$

μΕ

$$k = \frac{2L}{RT}$$



Λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου

- Το όριο για τη διακοπτόμενη λειτουργία προκύπτει και από τη σχέση:

$$\delta < (I - D)$$

- Ύστερα από πράξεις, αντικαθιστώντας το δ προκύπτει:

$$k < (I - D)^2$$

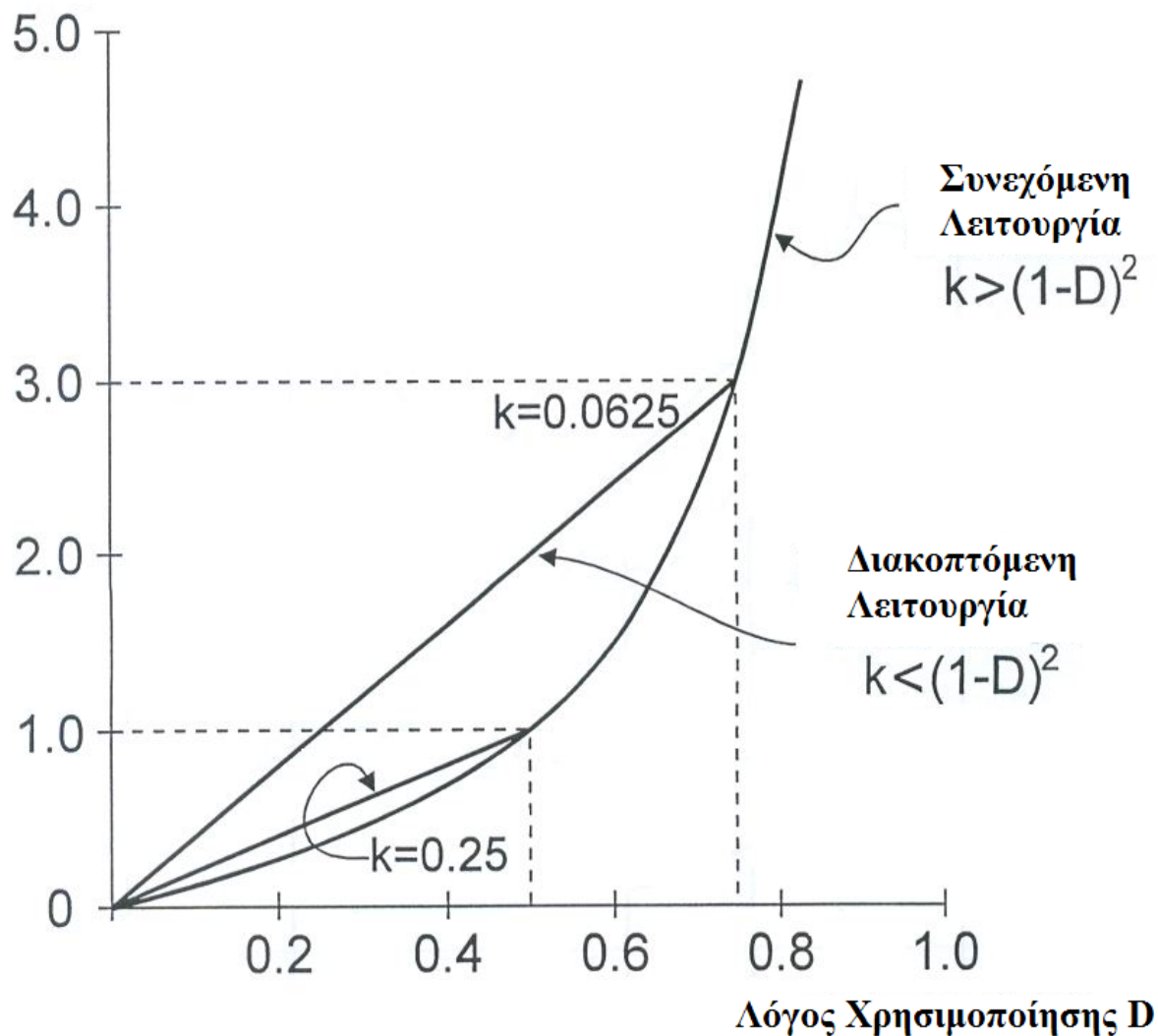
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι:

$$\Delta V_o = \frac{\delta T_s (\Delta I - I_o)^2}{2C\Delta I}$$

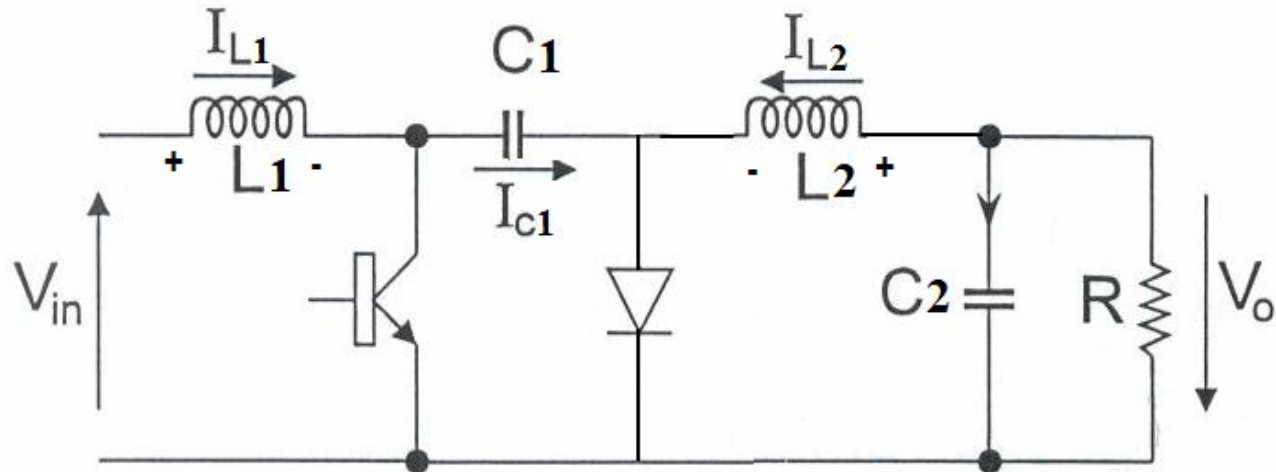


Χαρακτηριστική μετατροπής

Λόγος Μετατροπής Τάσης



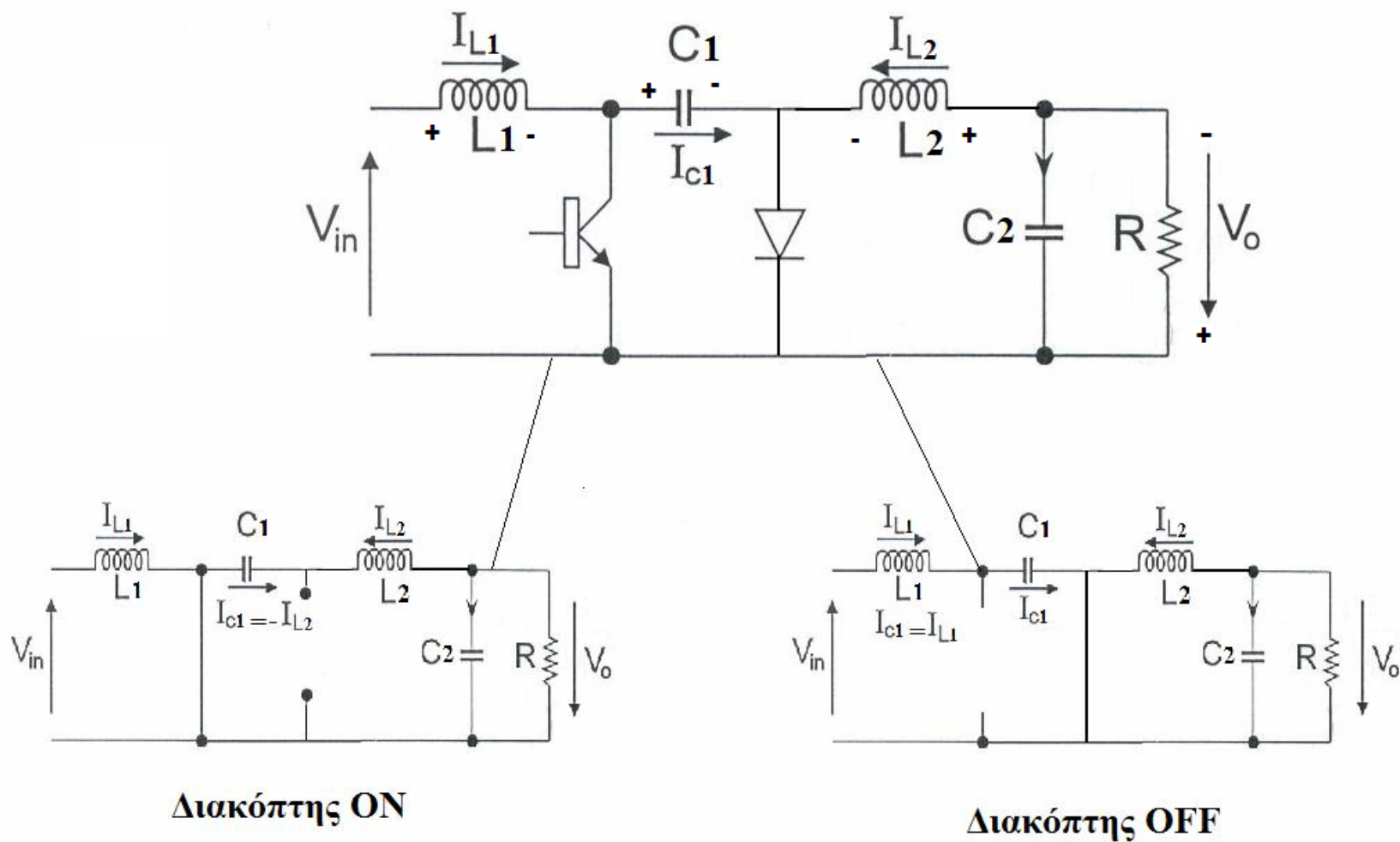
Μετατροπέας Cuk



- Όπως στον μεικτό μετατροπέα, η τάση εξόδου αλλάζει πολικότητα.
- Ο πυκνωτής C_1 είναι κυρίως υπεύθυνος για την αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας από την είσοδο προς την έξοδο.
- Στη στάσιμη κατάσταση λειτουργίας, το άθροισμα της μέσης τιμής των τάσεων των πηνίων ($V_{L1} + V_{L2}$) είναι μηδέν
- Ο πυκνωτής C_1 είναι γενικά μεγάλος και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι η τάση V_{C1} έχει αμελητέα κυμάτωση



Μετατροπέας Cuk

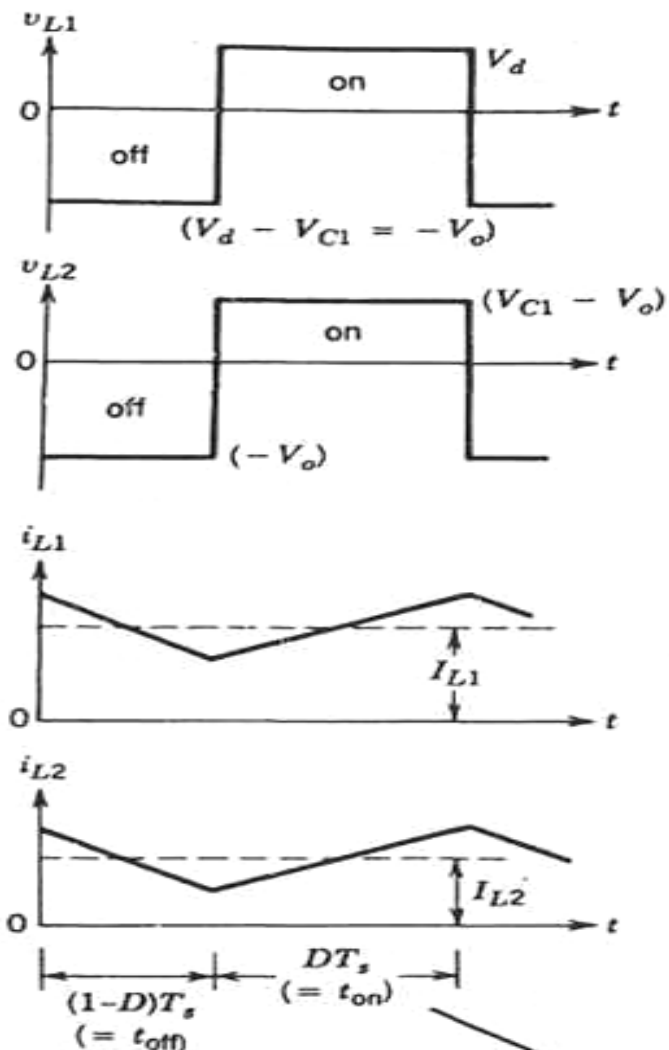
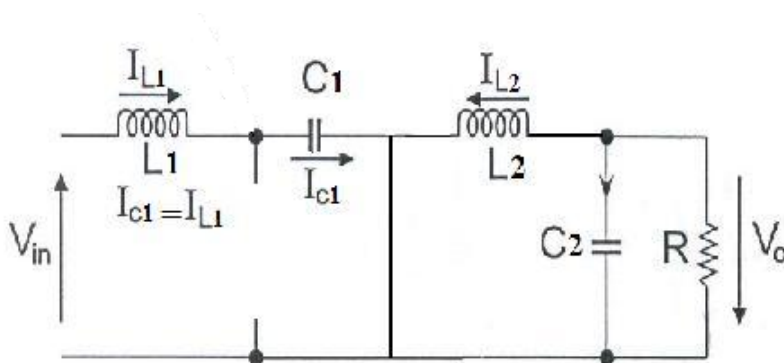


Διακόπτης ανοικτός (OFF)

Η διόδος πολώνεται ορθά για να περνά το ρεύμα πηνίου - ίσο με το ρεύμα του C1.

$$I_{C1} = I_{L1}$$

- Τα I_{L1} και I_{L2} περνάνε μέσα από τη διόδο
- Ο πυκνωτής C1 φορτίζεται, παίρνοντας ενέργεια τόσο από την πηγή όσο και το L_1 .
- Τα 2 πηνία εκφορτίζονται
- Το I_{L2} τροφοδοτεί την έξοδο.



Διακόπτης κλειστός (ON)

Το πηνίο L_1 φορτίζεται συνδεδεμένο με την πηγή εισόδου

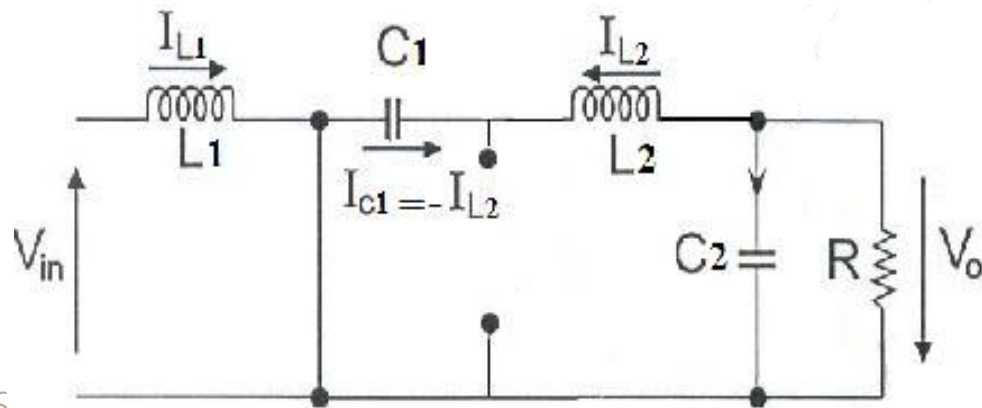
Ο πυκνωτής $C1$ είναι υπεύθυνος για τη μεταφορά ενέργειας σε αντίθεση με τους προηγούμενους μετατροπείς.

$$V_{C1} = V_{in} + V_o \quad I_{C1} = -I_{L2}$$

Η είσοδος παρέχει ενέργεια στο $L1$. Το I_{L1} , αυξάνεται.

Επειδή $V_{C1} > V_o$, ο $C1$ εκφορτίζει στο φορτίο και το $L2$. Έτσι το I_{L2} αυξάνει και το

πηνίο 2 φορτίζεται.



Μεγέθη Μετατροπέα Cuk

- Ο λόγος μετατροπής για τον μετατροπέα Cuk:

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{D}{1-D}$$

- Προκύπτει από τα Volt-sec των πηνίων. Για το L_1 :

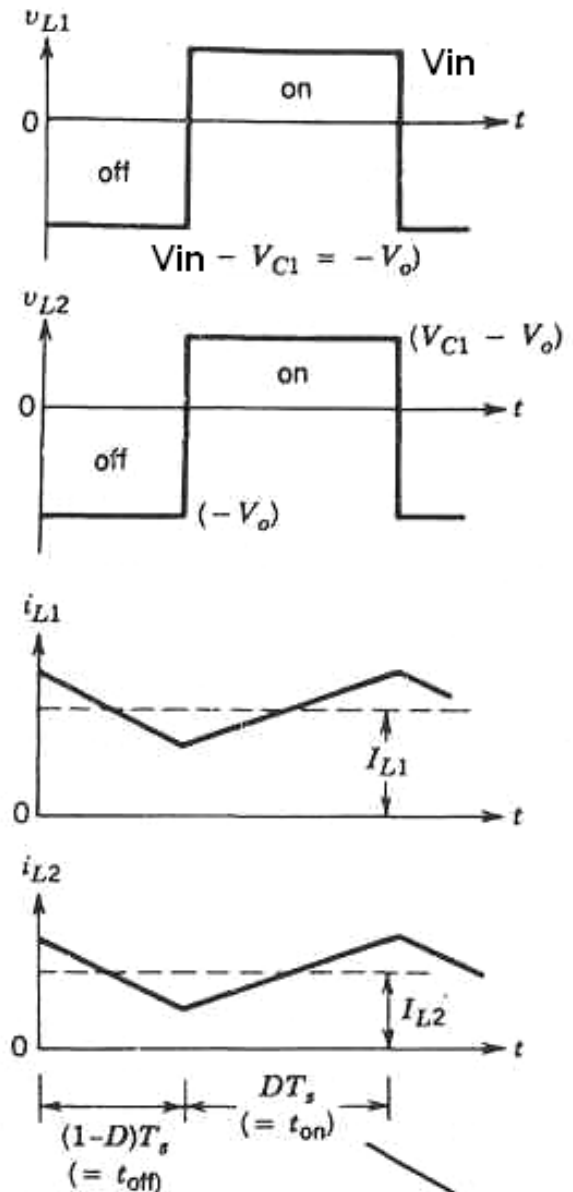
$$V_{in} \cdot D \cdot T_s + (V_{in} - V_{C1})(1-D)T_s = 0$$

$$V_{C1} = \frac{1}{1-D} V_{in}$$

- Για το L_2 :

$$(V_{C1} - V_0)DT_s - V_0(1-D)T_s = 0$$

$$V_{C1} = \frac{1}{D} V_0$$



Χαρακτηριστικά Μετατροπέα Cuk

Κυμάτωση ρεύματος L1

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_{in} D}{L_1 f_s}$$

Κυμάτωση ρεύματος L2

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_{in} D}{L_2 f_s}$$

Για συνεχόμενη λειτουργία πρέπει:

$$L_{1,\min} = \frac{(1-D)^2 R}{2Df_s}$$

$$L_{2,\min} = \frac{(1-D)R}{2f_s}$$

- Κυμάτωση τάσης εξόδου:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8L_2 C_2 f_s^2}$$

- Κυμάτωση τάσης του C1:

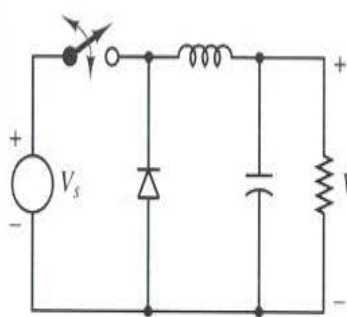
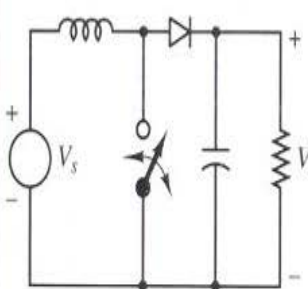
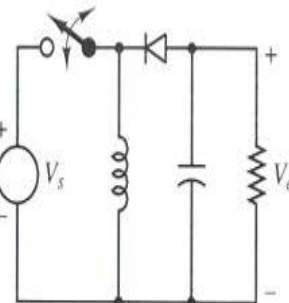
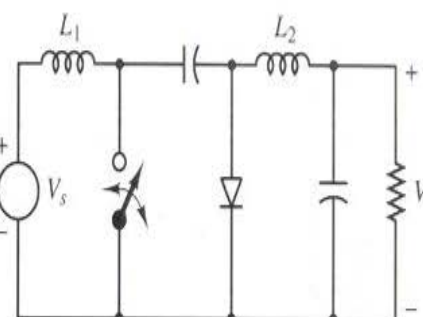
$$\Delta V_{C1} \approx \frac{V_o D}{RC_1 f_s}$$

- Πλεονέκτημα η μικρή κυμάτωση ρεύματος εξόδου

- Μειονέκτημα η ύπαρξη του C1 με μεγάλη τιμή



Σύγκριση Μετατροπών

Converter Type	Buck	Boost	Buck-Boost	Cuk
Circuit				
V_o/V_s	D	$\frac{1}{1-D}$	$-\frac{D}{1-D}$	$-\frac{D}{1-D}$
$\Delta V_o/V_s$	$\frac{1-D}{8LCf^2}$	$\frac{D}{RCf}$	$\frac{D}{RCf}$	$\frac{1-D}{8LCf^2}$
L_{min}	$\frac{(1-D)R}{2f}$	$\frac{D(1-D)^2R}{2f}$	$\frac{(1-D)^2R}{2f}$	$L_1: \frac{(1-D)^2R}{2Df}$ $L_2: \frac{(1-D)R}{2f}$

