



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ - ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

“Μελέτη του Ελέγχου Μέγιστου Ρεύματος σε Δικατευθυντήριο Μετατροπέα Ισχύος”

Ρηγογιάννης Νικόλαος

Επιβλέπων: Νικόλαος Παπανικολάου, Επίκουρος Καθηγητής ΔΠΘ

Περιεχόμενα παρουσίασης

- Μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (DC-DC)
- Δικατευθυντήριοι μετατροπείς ισχύος
- Έλεγχος μετατροπέων ισχύος
- Έλεγχος μέγιστου ρεύματος σε δικατευθυντήριο μετατροπέα
 - Θεωρητική μελέτη
 - Μαθηματική μοντελοποίηση – Ανάλυση μικρού σήματος
- Κατασκευή πειραματικών διατάξεων
- Πειραματικά αποτελέσματα

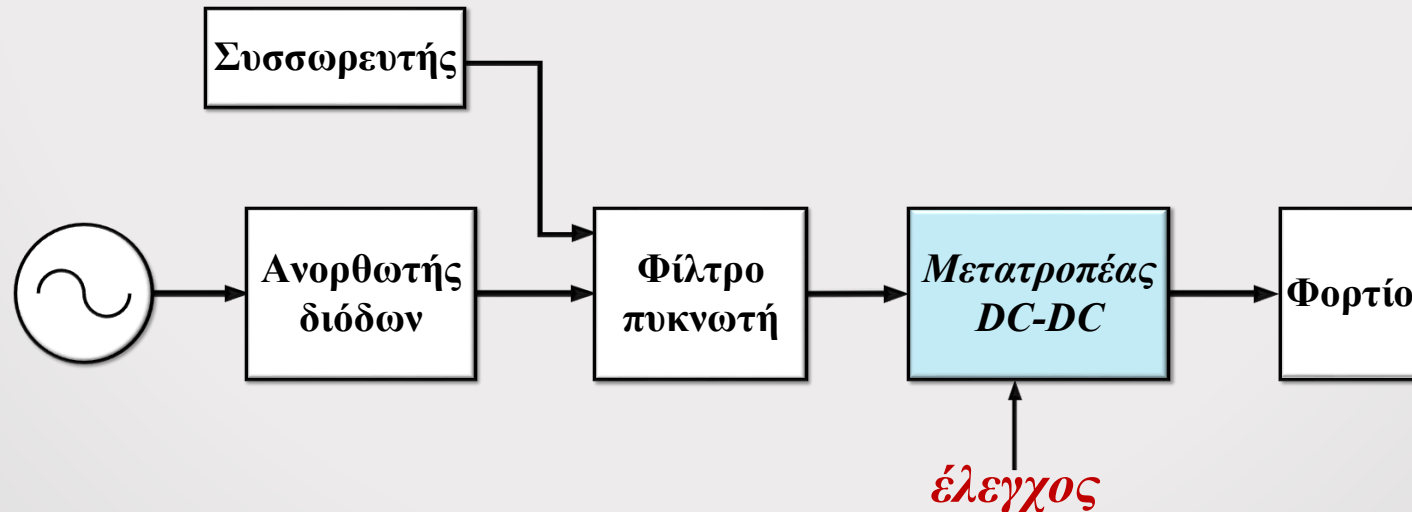
Μετατροπείς ισχύος συνεχούς
τάσης σε συνεχή τάση (DC-DC)

...

Σύστημα DC-DC μετατροπέα

Εφαρμογές

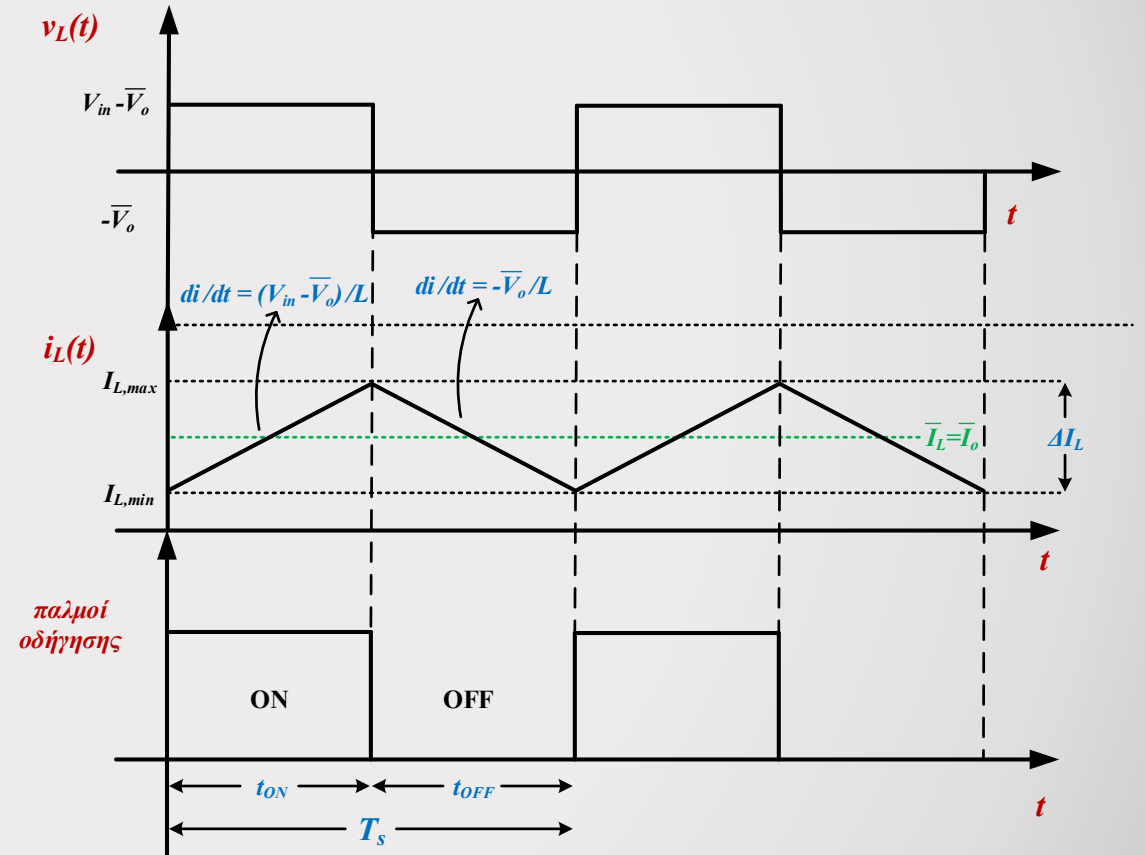
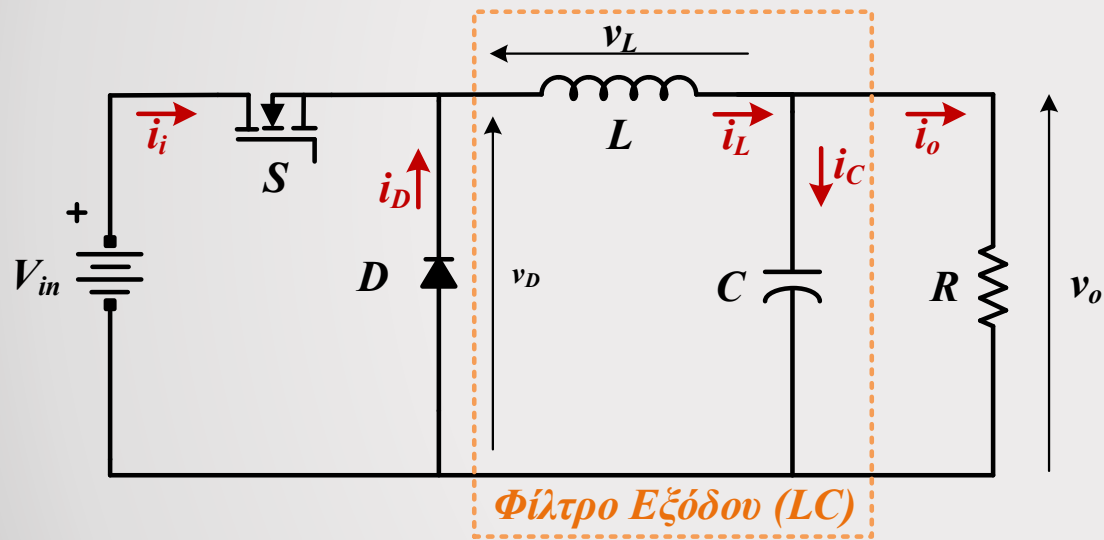
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Φ/Β συστήματα
- Παλμοτροφοδοτικά υψηλής συχνότητας, ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων
- Συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων



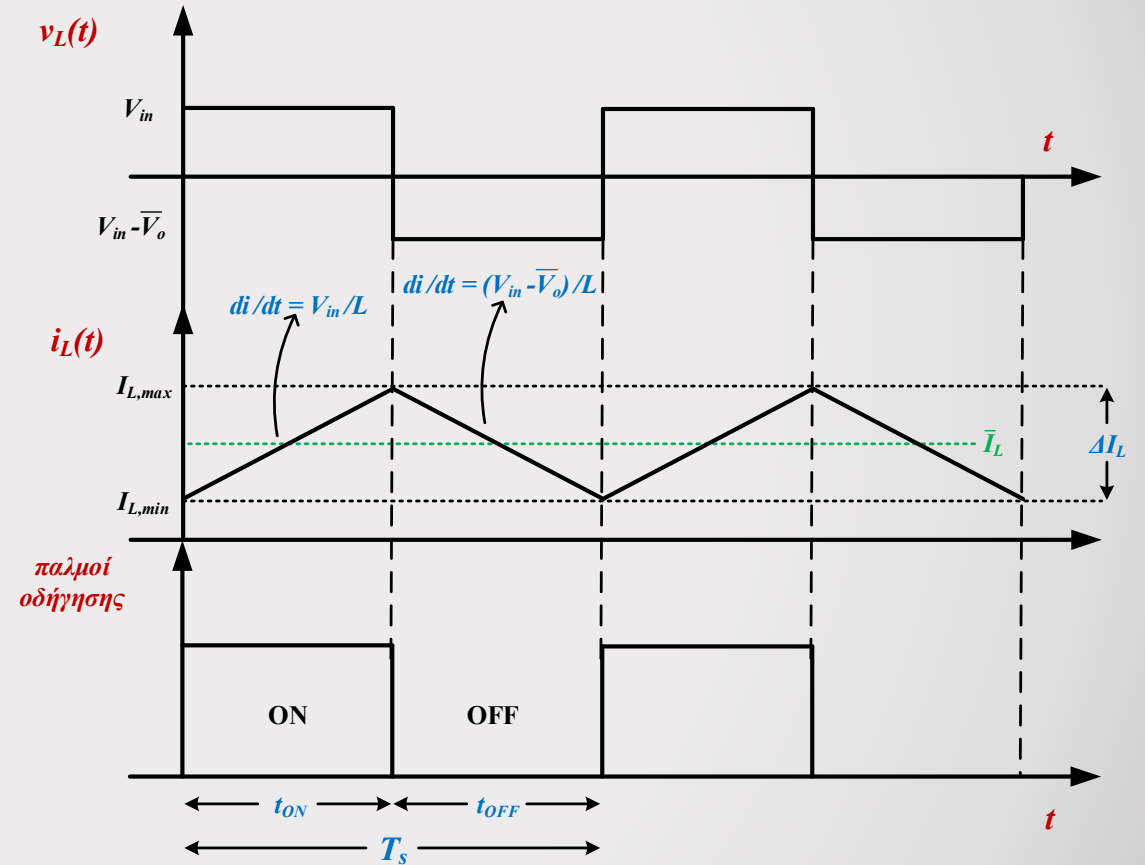
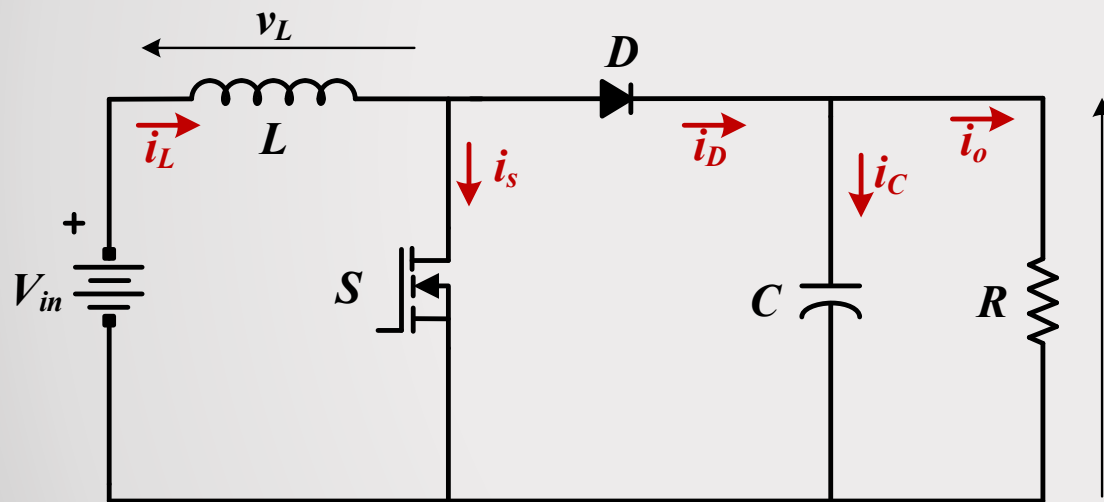
Βασικές τοπολογίες (χωρίς Μ/Σ)

- Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buck Converter)
- Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (Boost Converter)
- Μετατροπέας υποβιβασμού-Ανύψωσης συνεχούς τάσης (Buck-Boost Converter)

Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης



Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης

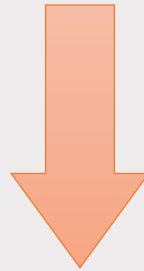


Δικατευθυντήριοι μετατροπείς ισχύος

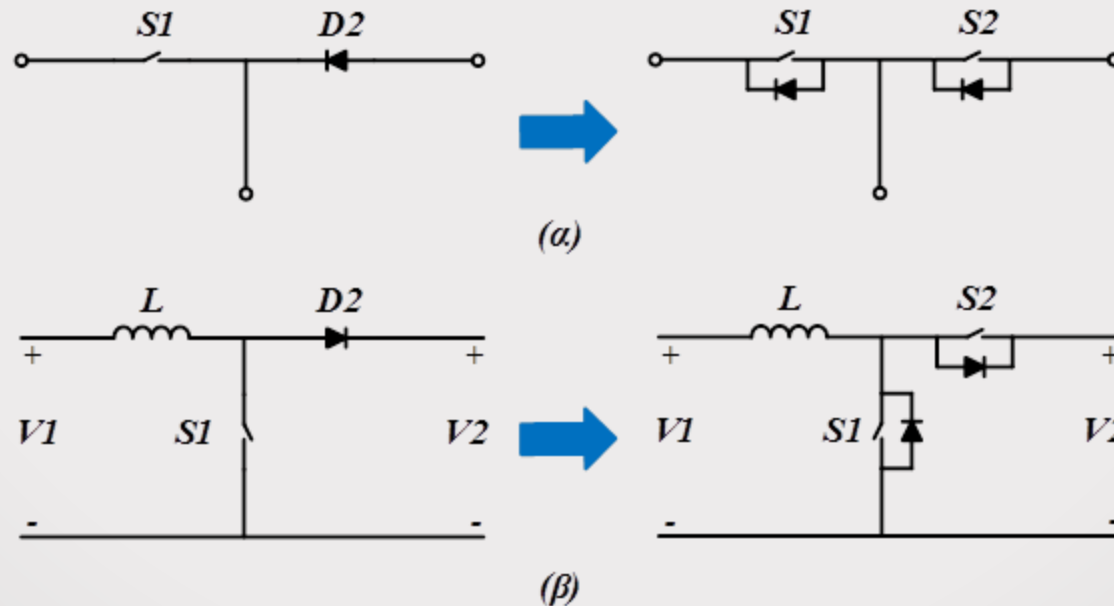
...

Αμφίδρομη ροή ισχύος (1)

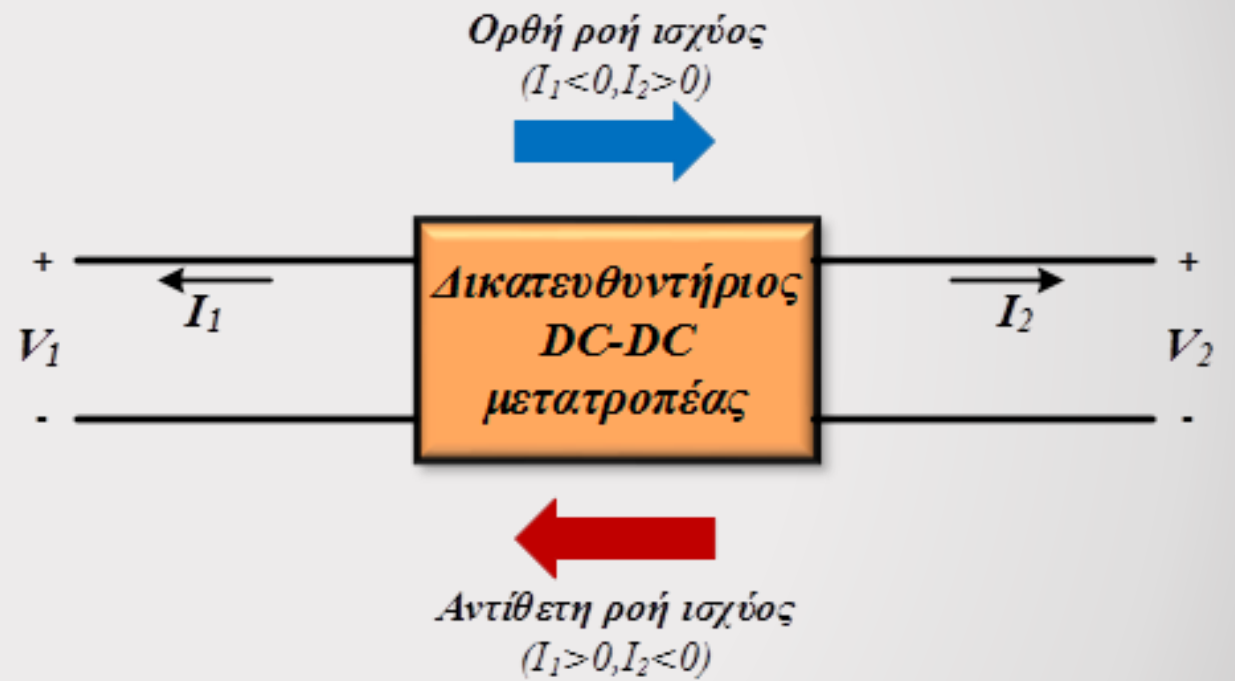
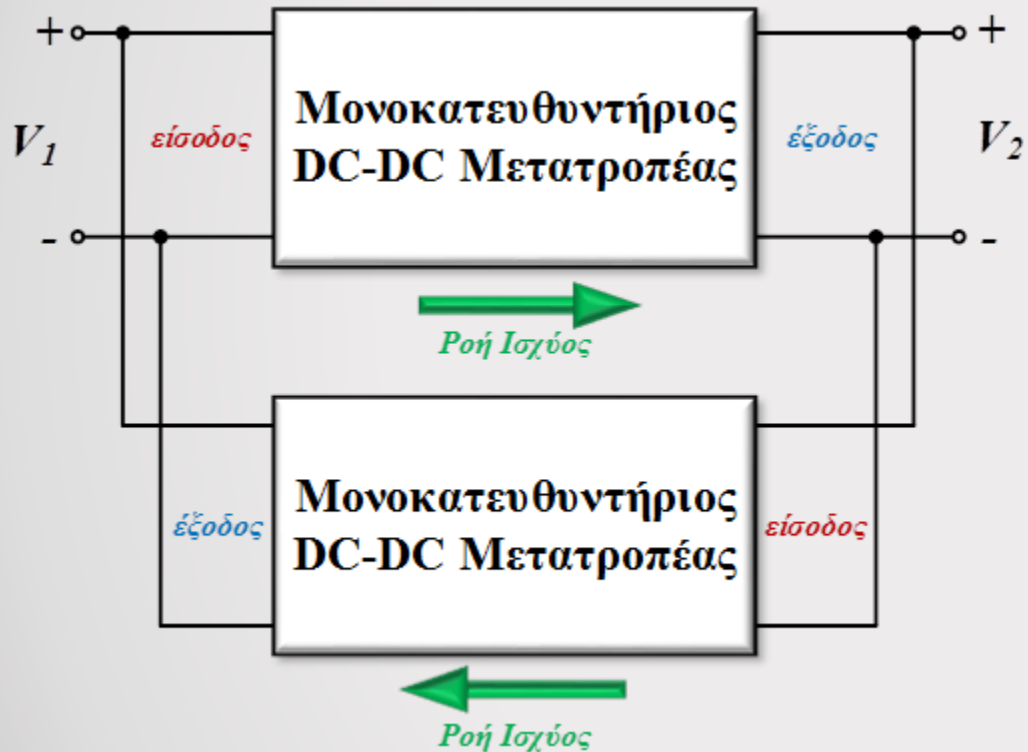
Η παρουσία διόδων, δεν επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος.



Αντικατάσταση των διόδων στους μετατροπείς, με ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες.



Αμφίδρομη ροή ισχύος (2)

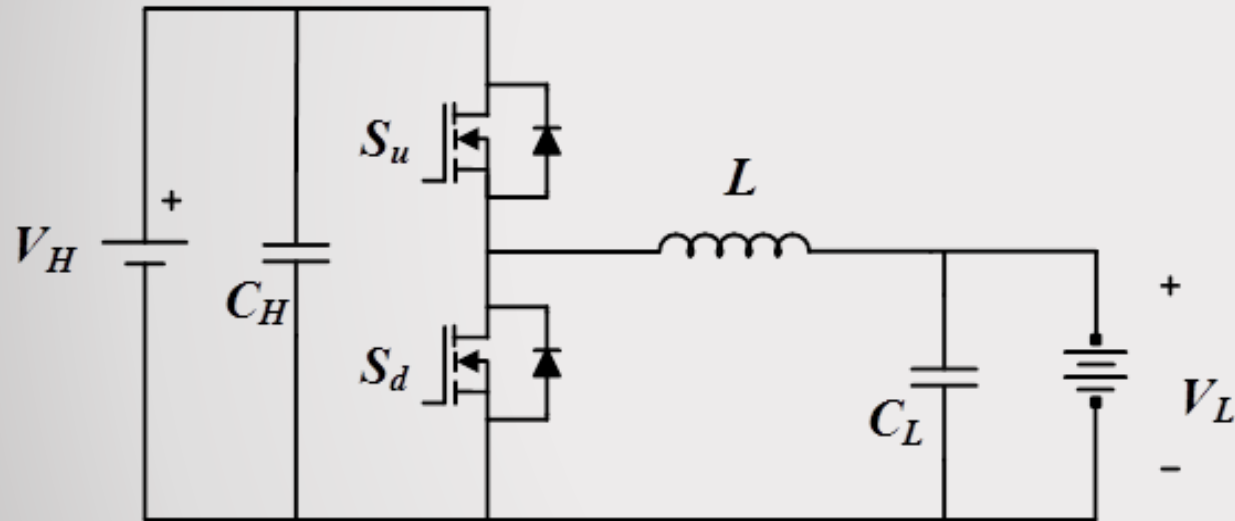


Βασικές τοπολογίες δικατευθυντήριων μετατροπών

- Χωρίς Μ/Σ απομόνωσης
 - Δικατευθυντήριο μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης (2 τεταρτημορίων)
 - Δικατευθυντήριο μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων
- Με Μ/Σ απομόνωσης
 - Δικατευθυντήριο μετατροπέας διπλής γέφυρας

Δικατευθυντήριος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης

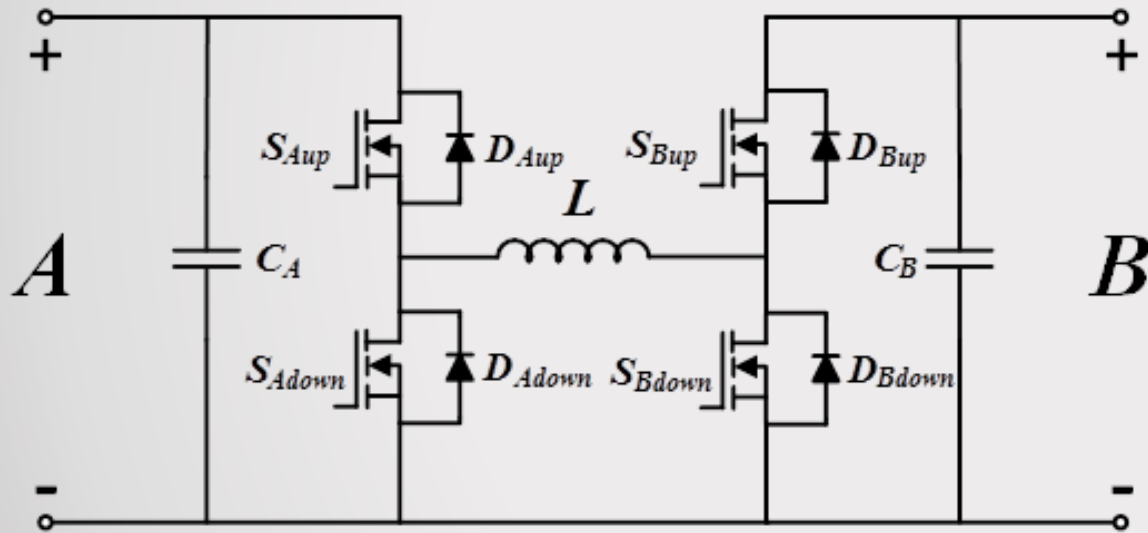
(Bidirectional Buck/Boost Converter)



- Η βασικότερη τοπολογία
- 2 τεταρτημορίων ως προς το ρεύμα
- 2 ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος
- Λειτουργία synchronous rectification

Δικατευθυντήριο μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων

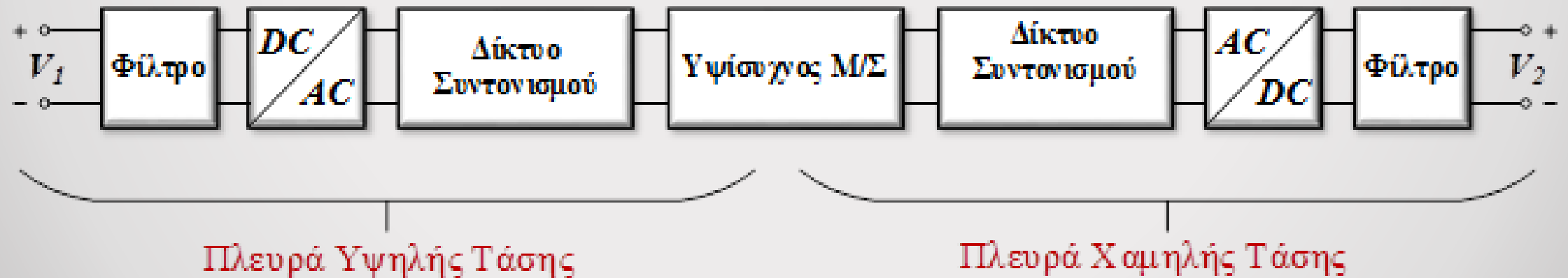
(Quadrant Converter)



- 4 καταστάσεις λειτουργίας
- 4 ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος
- Ανύψωση ή υποβιβασμός τάσης και προς τις δύο κατευθύνσεις

Δικατευθυντήριοι μετατροπείς με Μ/Σ απομόνωσης

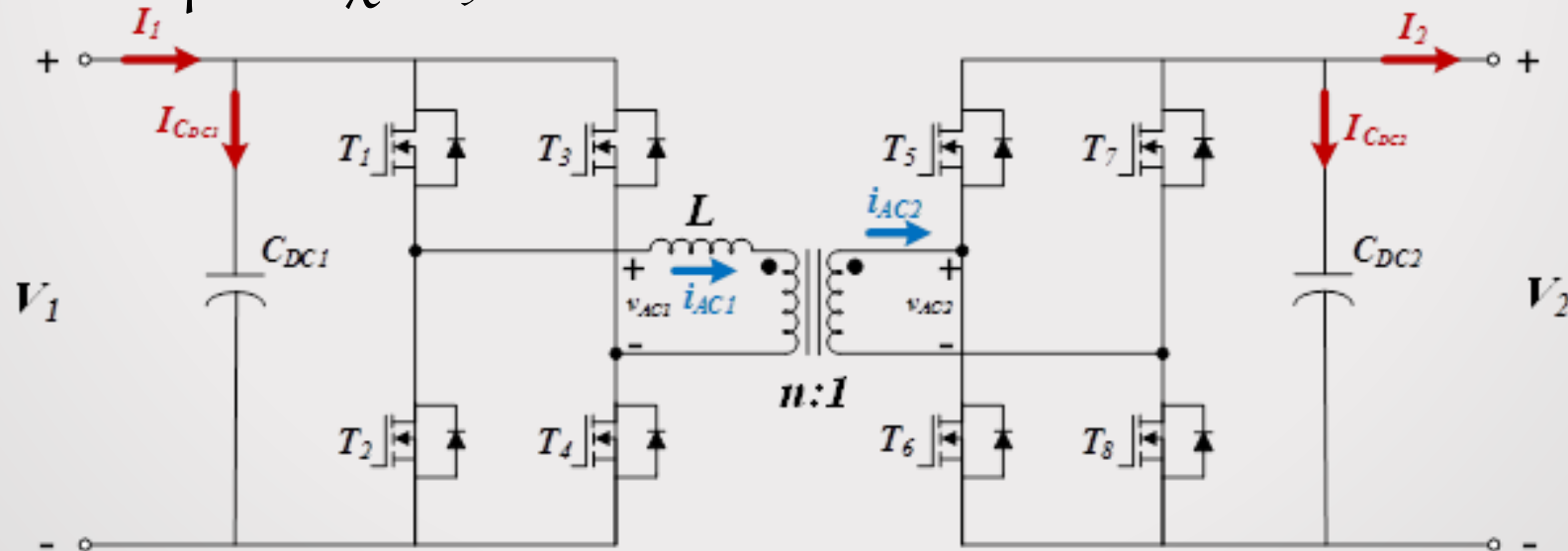
- + Απομόνωση των 2 πηγών τάσης
- + Εξίσωση των σύνθετων αντιστάσεων μεταξύ τους (impedance matching)
- + Προστασία
- Πρόσθετο κόστος και απώλειες



Δικατευθυντήριος μετατροπέας με Μ/Σ απομόνωσης

(Dual Active Bridge-DAB)

- + Μικρός αριθμός παθητικών στοιχείων
- + Ισοκατανομή ρευμάτων στους διακόπτες
- + Δυνατότητα ενσωμάτωσης τεχνικών ομαλής μετάβασης (soft switching)
- + Υψηλή πυκνότητα ισχύος

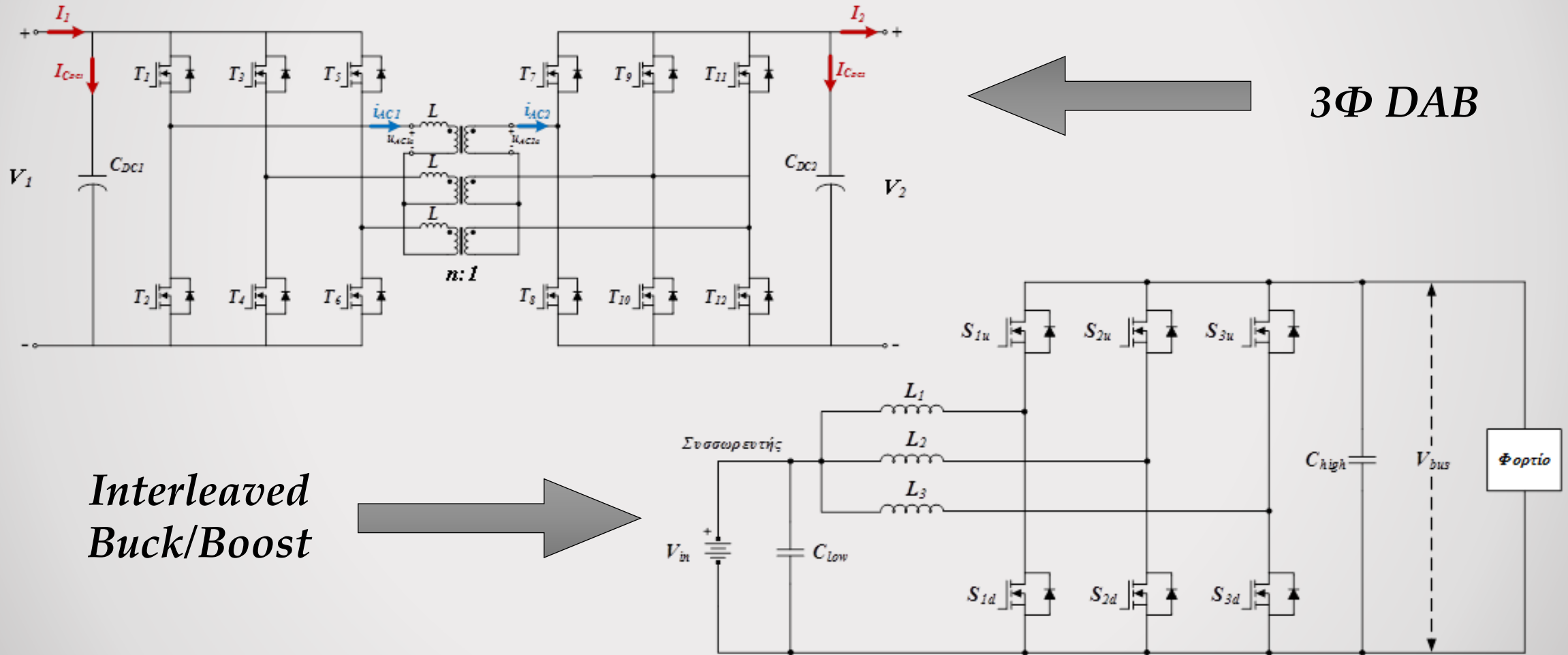


Δικατευθυντήριοι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων (1)

(Multilevel/Multiphase bidirectional converters)

- Παράλληλη σύνδεση (interleaved)
- Αύξηση της πυκνότητας ισχύος
- Μεγάλος αριθμός ημιαγωγικών διακοπών, άρα και κυκλωμάτων οδήγησης

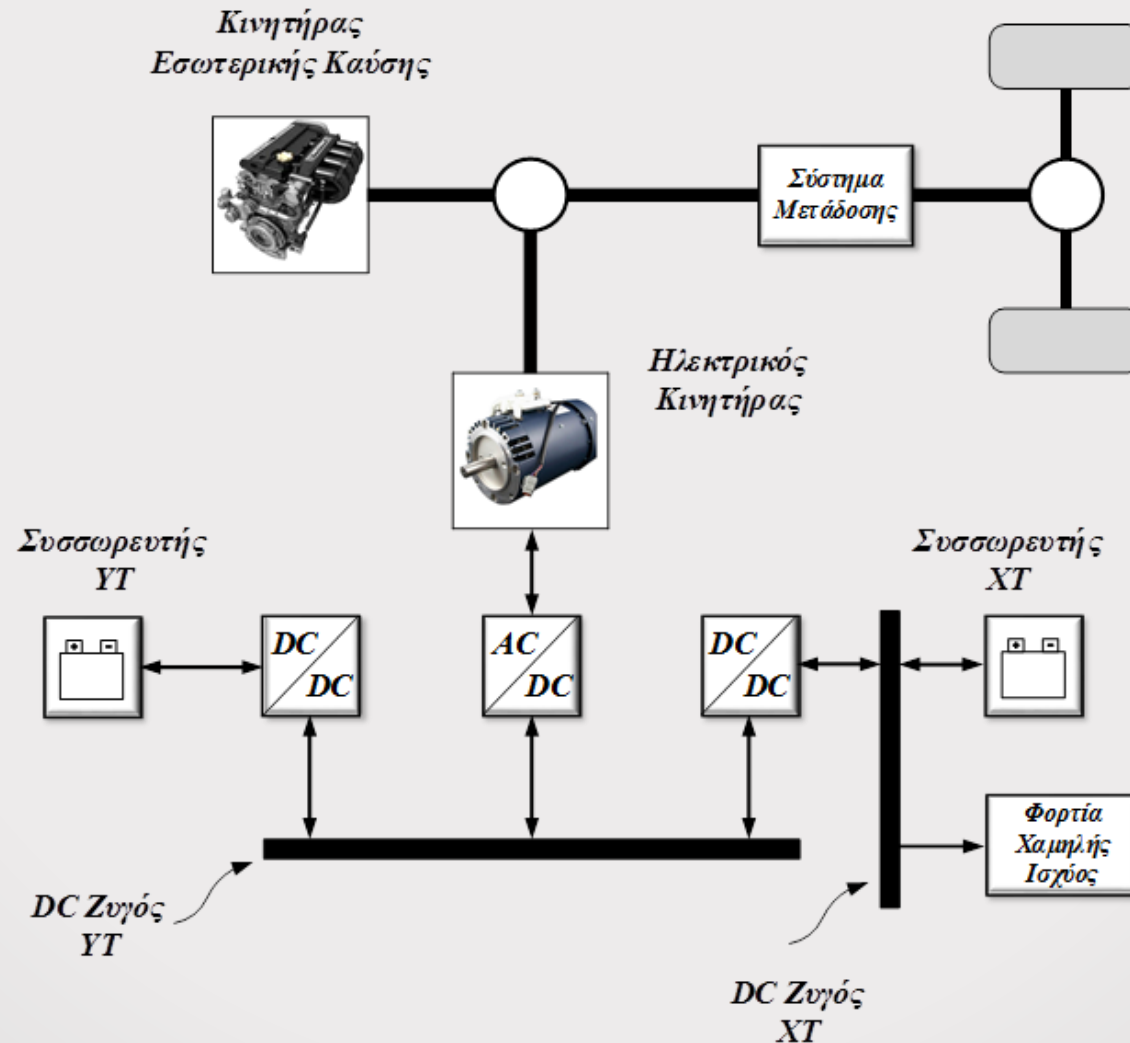
Δικατευθυντήριοι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων (2)



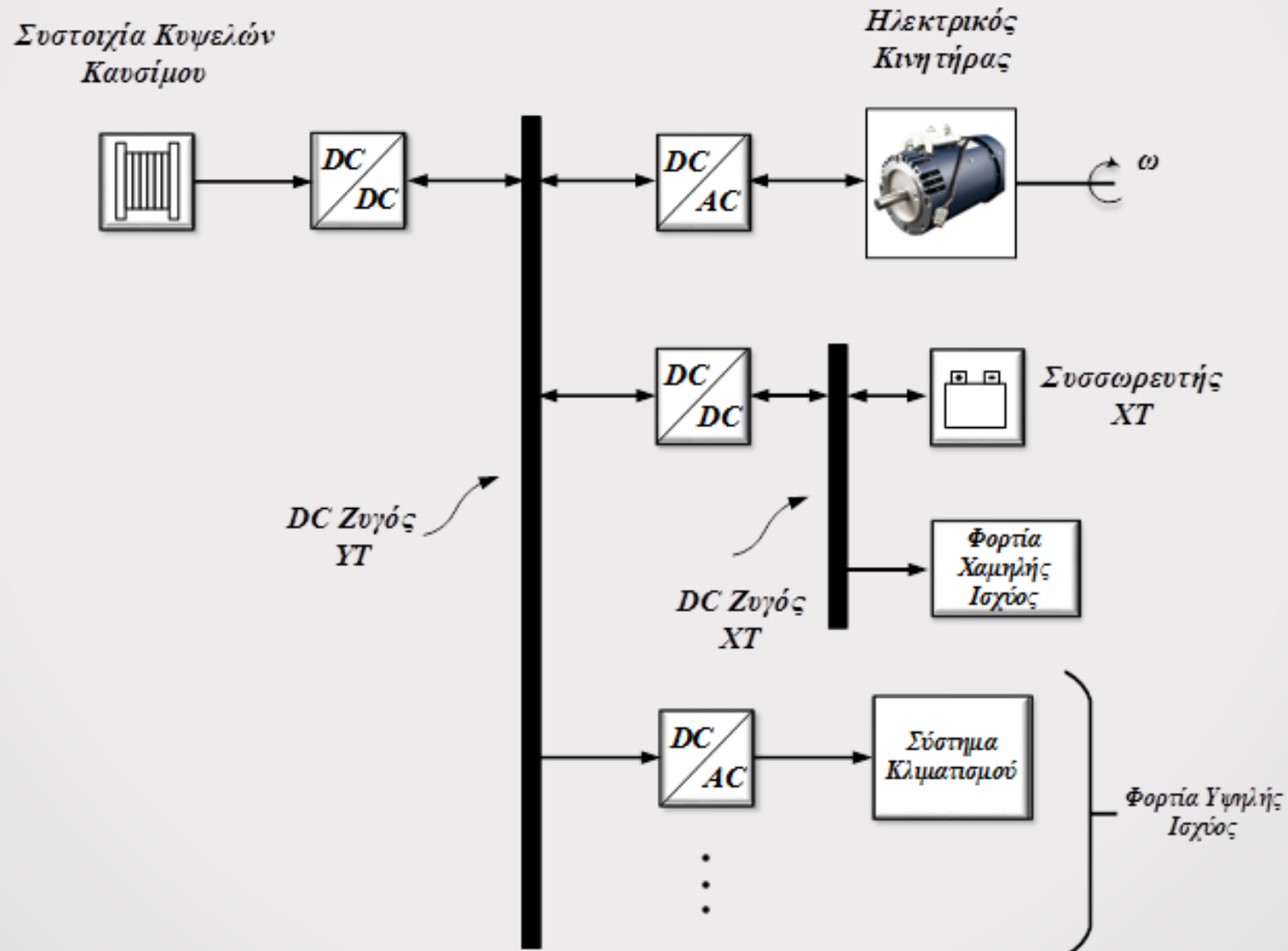
Εφαρμογές δικατευθυντήριων μετατροπών (1)

- Συστήματα ηλεκτρικής κίνησης (Ανάκτηση ενέργειας & Αναγεννητική πέδηση-
Energy recovery & Regenerative braking)
 - Ηλεκτρικά & Υβριδικά οχήματα
 - Οχήματα κυψελών καυσίμου
 - Συστήματα ανελκυστήρων
- Συστήματα φωτισμού LED
- Συστήματα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ
- Διατάξεις διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (PFC), ενεργά φίλτρα
- Διατάξεις αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)

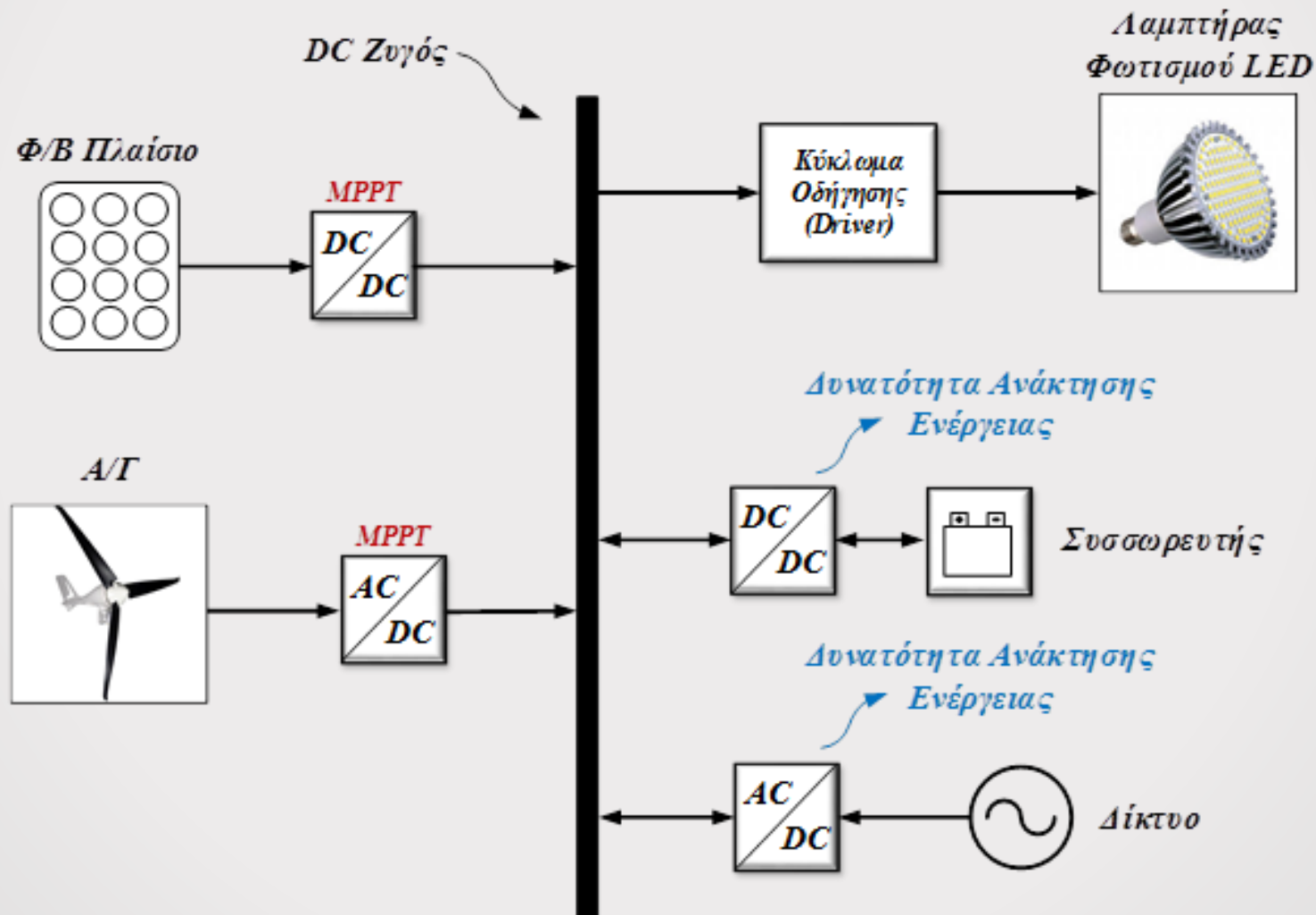
Εφαρμογές δικατευθυντήριων μετατροπών (2)



Εφαρμογές δικατευθυντήριων μετατροπών (3)

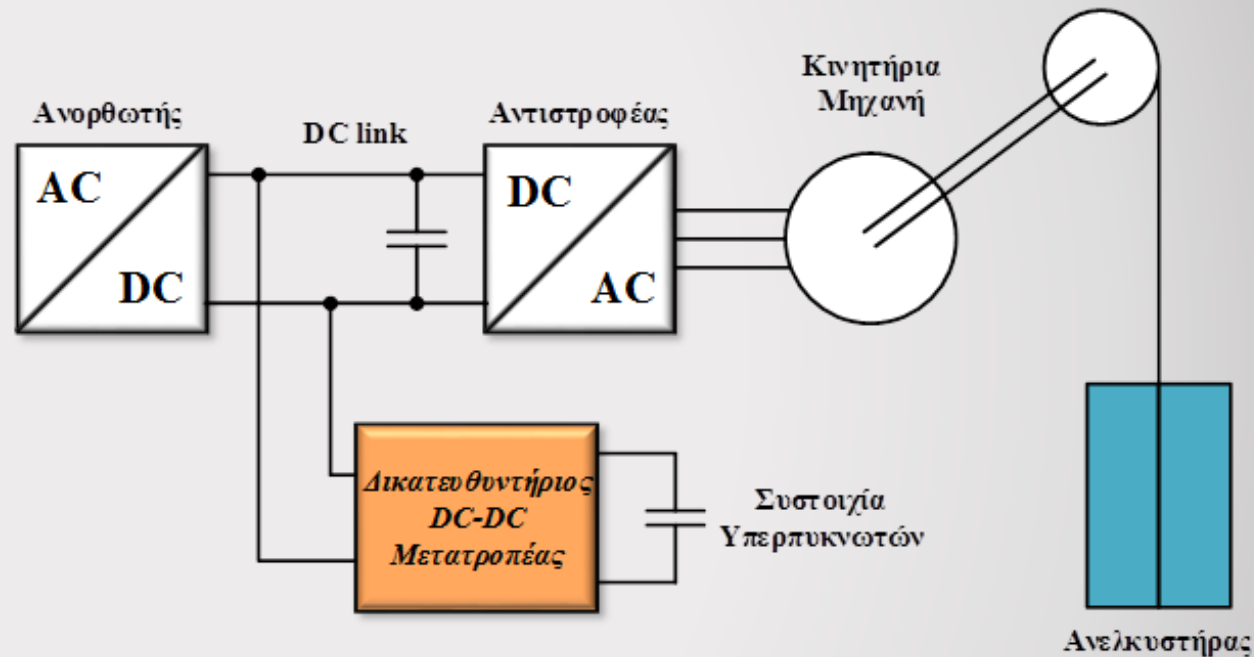
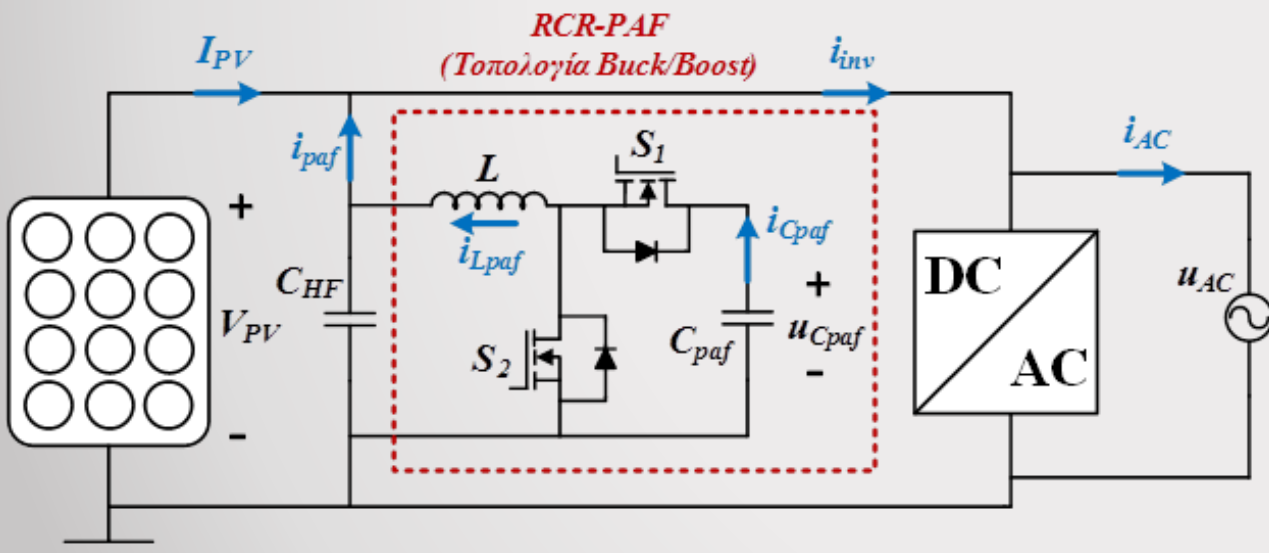


Εφαρμογές δικατευθυντήριων μετατροπέων (4)



Εφαρμογές δικατευθυντήριων μετατροπέων (5)

Παράλληλο ενεργό φίλτρο



Σύστημα ανελκυστήρα

Έλεγχος μετατροπών ισχύος

...

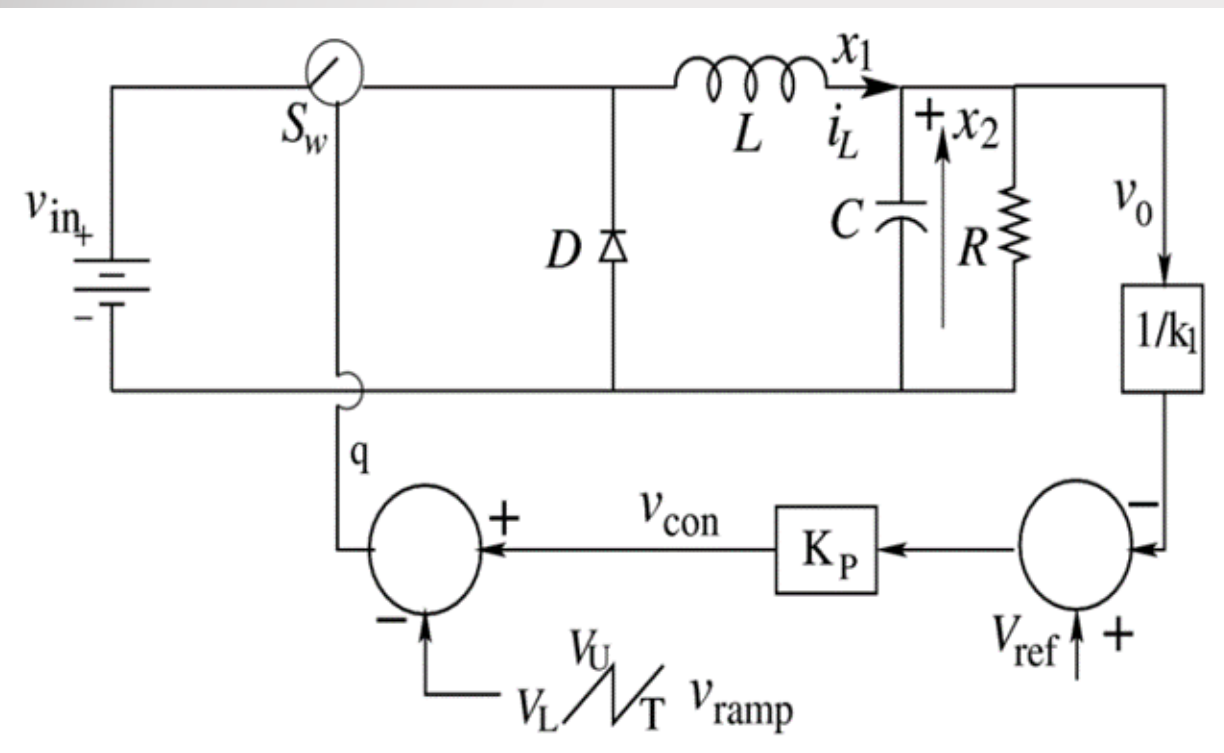
Έλεγχος DC-DC μετατροπών

- Πρέπει η μέση τιμή της τάσης εξόδου να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται.
- Σε έναν DC-DC μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών διακοπών.
- Απαιτείται βρόχος ανάδρασης (feedback loop) – έλεγχος κλειστού βρόχου.

Μέθοδοι ελέγχου DC-DC μετατροπών

- Έλεγχος τάσης (Voltage mode control)
- Έλεγχος ρεύματος (Current mode control)
 - Έλεγχος μέσου ρεύματος (Average current control)
 - Έλεγχος ελάχιστου ρεύματος (Valley current control)
 - Έλεγχος μέγιστου ρεύματος (*Peak current control*)
- Έλεγχος υστέρησης (Hysteresis control)
- Έλεγχος με ολίσθηση στο πεδίο καταστάσεων (Sliding mode control)

Έλεγχος τάσης



- Εφαρμογές χαμηλών επιπέδων τάσης και ισχύος
- Σταθερή διακοπτική συχνότητα
- + Εύκολος σχεδιασμός και υλοποίηση
- + Καλή απόκριση σε διαταραχές της τάσης αναφοράς
- Αλλαγή στην τάση εισόδου επιφέρει αλλαγή στο κέρδος, άρα και στη δυναμική συμπεριφορά
- Οι διαταραχές καθυστερούν να ανιχνευθούν στην έξοδο, καθώς ο πυκνωτής και το πηνίο εισάγουν μια φασική καθυστέρηση

Έλεγχος ρεύματος

- Μέσου Ρεύματος

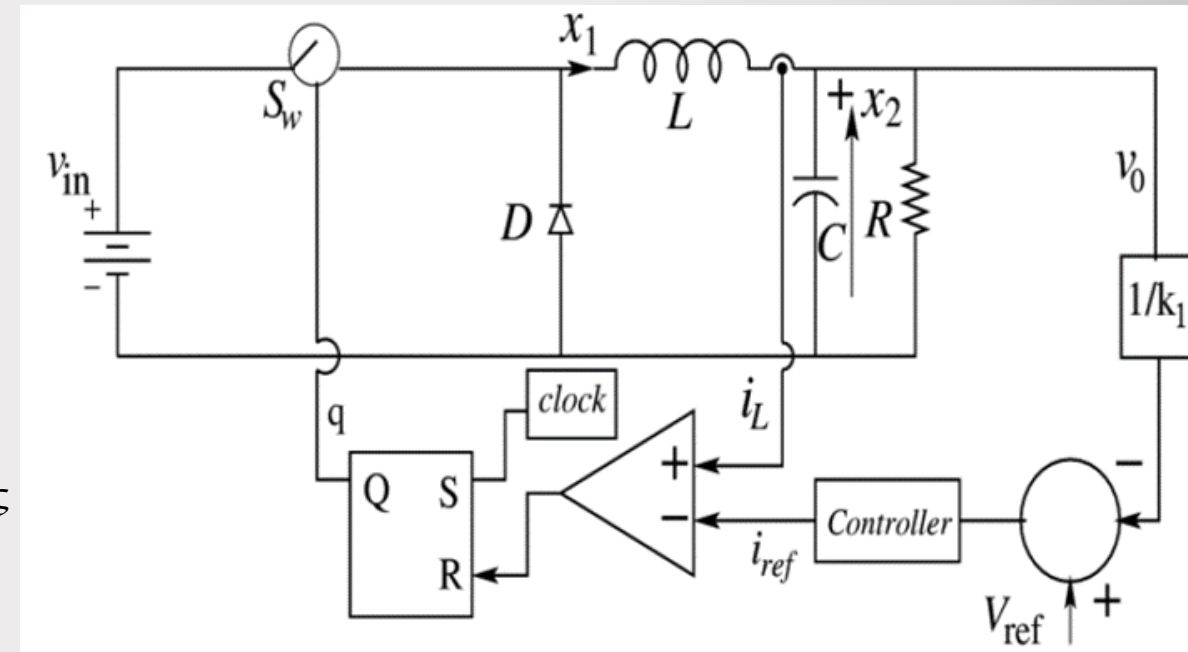
- Δεν υπάρχει ευαισθησία στον θόρυβο
- Περιορισμένη αρμονική παραμόρφωση

- Ελάχιστου ρεύματος

- Επιτρέπει τη λειτουργία οριακής αγωγής

- **Μέγιστου ρεύματος**

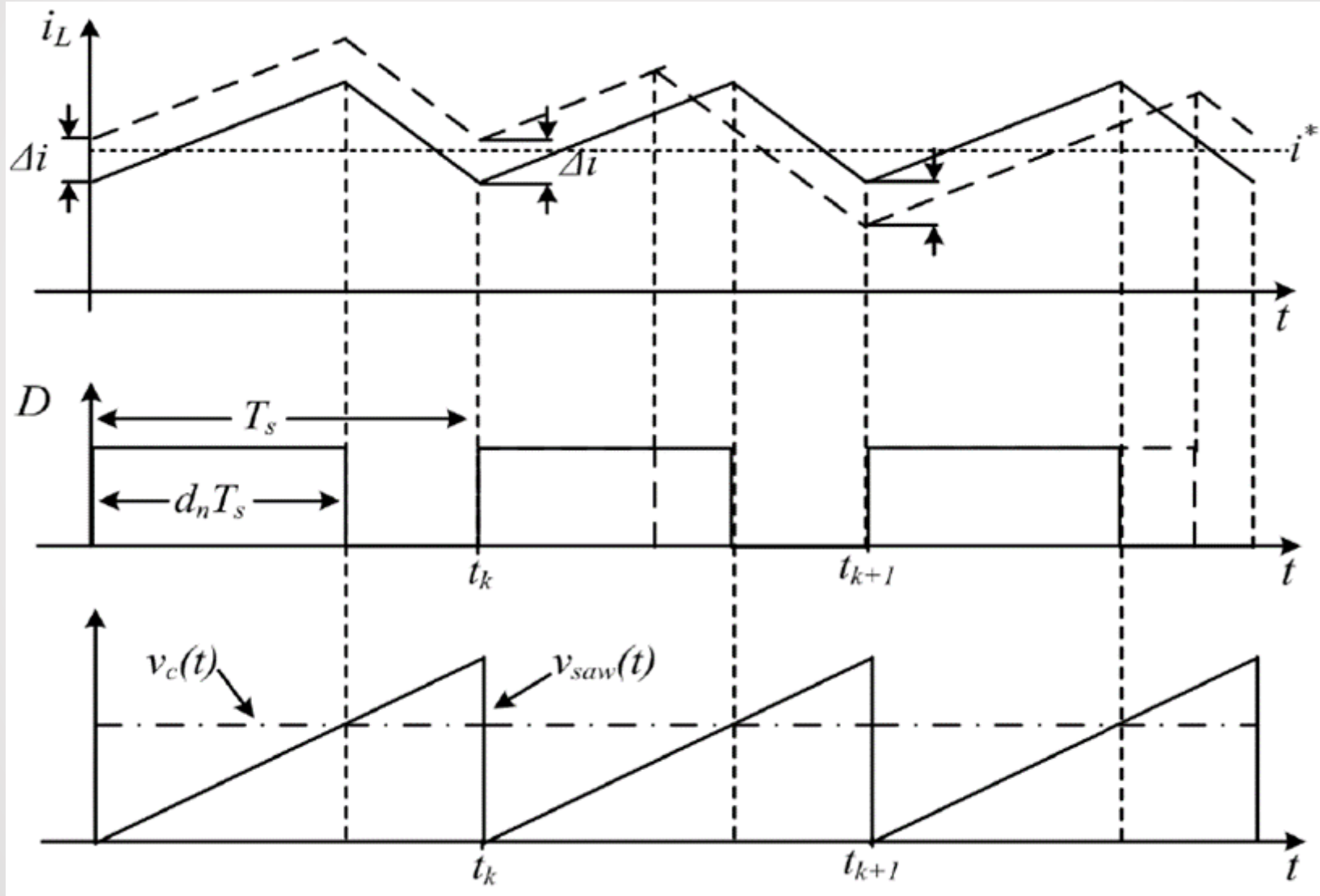
- Η πιο διαδεδομένη και συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος
- Εύκολη αντιστάθμιση του συστήματος ανάδρασης
- Καλή συμπεριφορά στα μεταβατικά φαινόμενα
- Ταχεία προστασία από ρεύματα σφαλμάτων



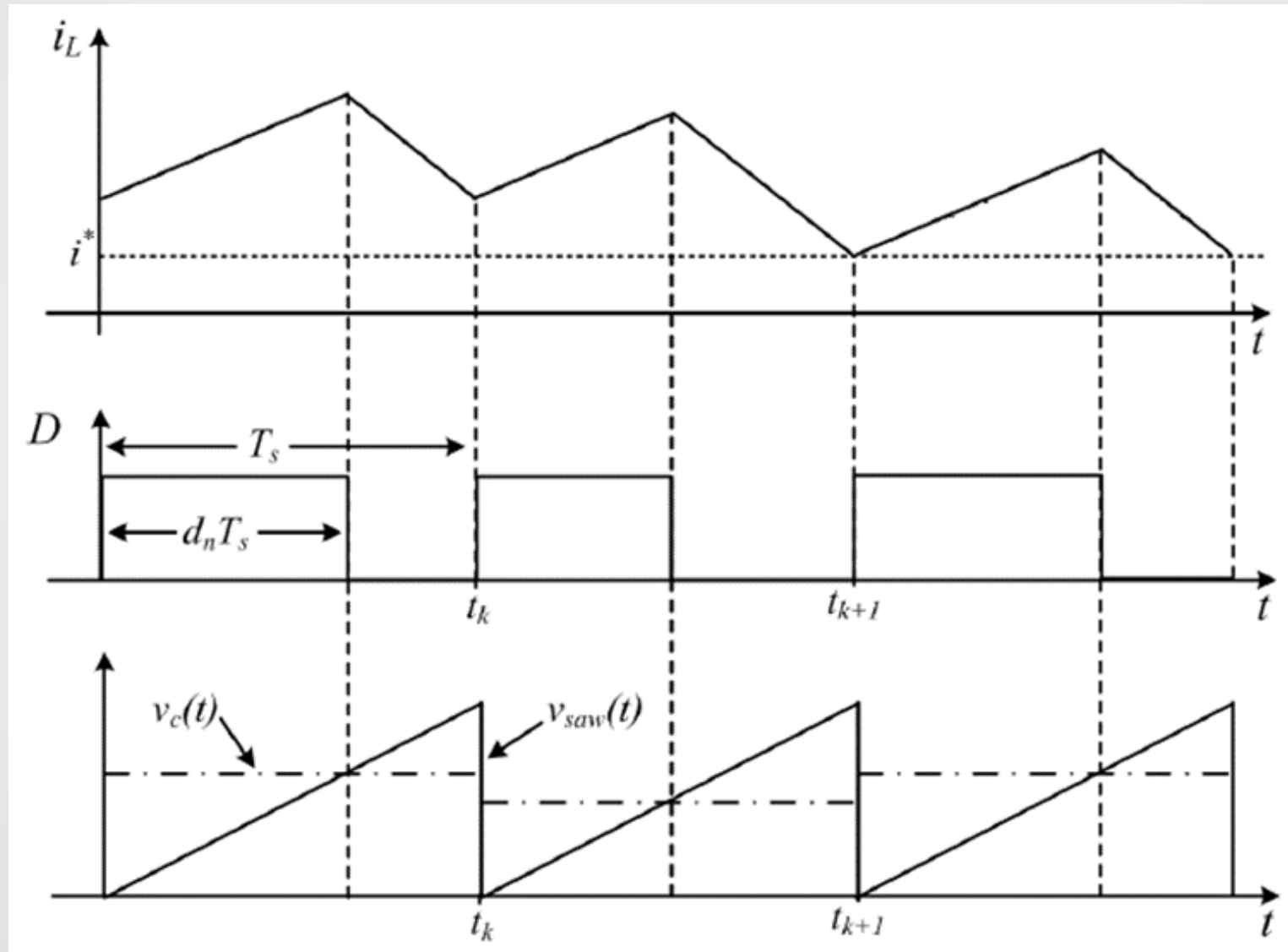
**Σταθερή διακοπτική συχνότητα*

**Εμφάνιση υποαρμονικών ταλαντώσεων για $D > 50\%$*

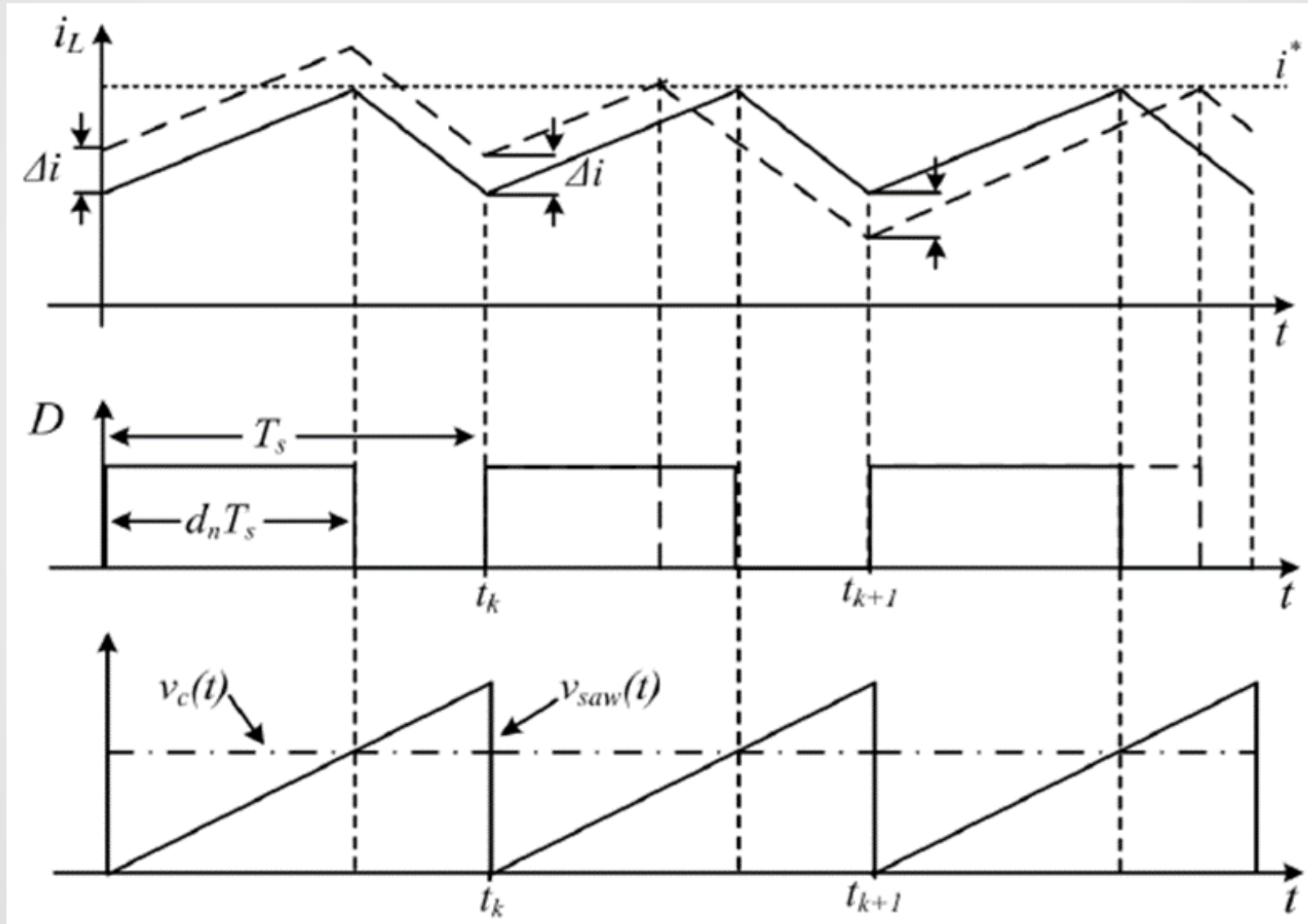
Έλεγχος μέσου ρεύματος



Έλεγχος ελάχιστου ρεύματος

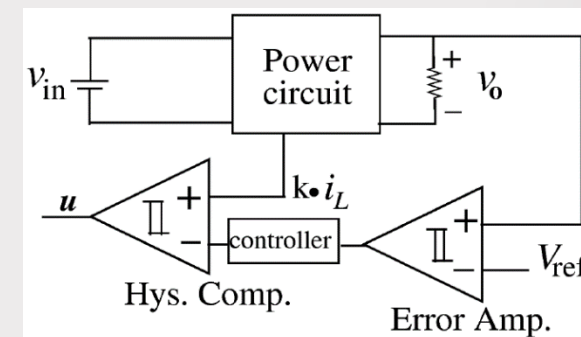
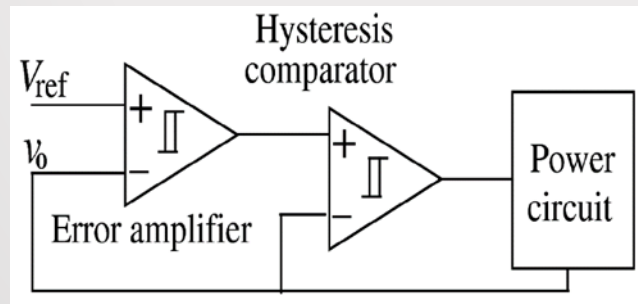


Έλεγχος μέγιστου ρεύματος



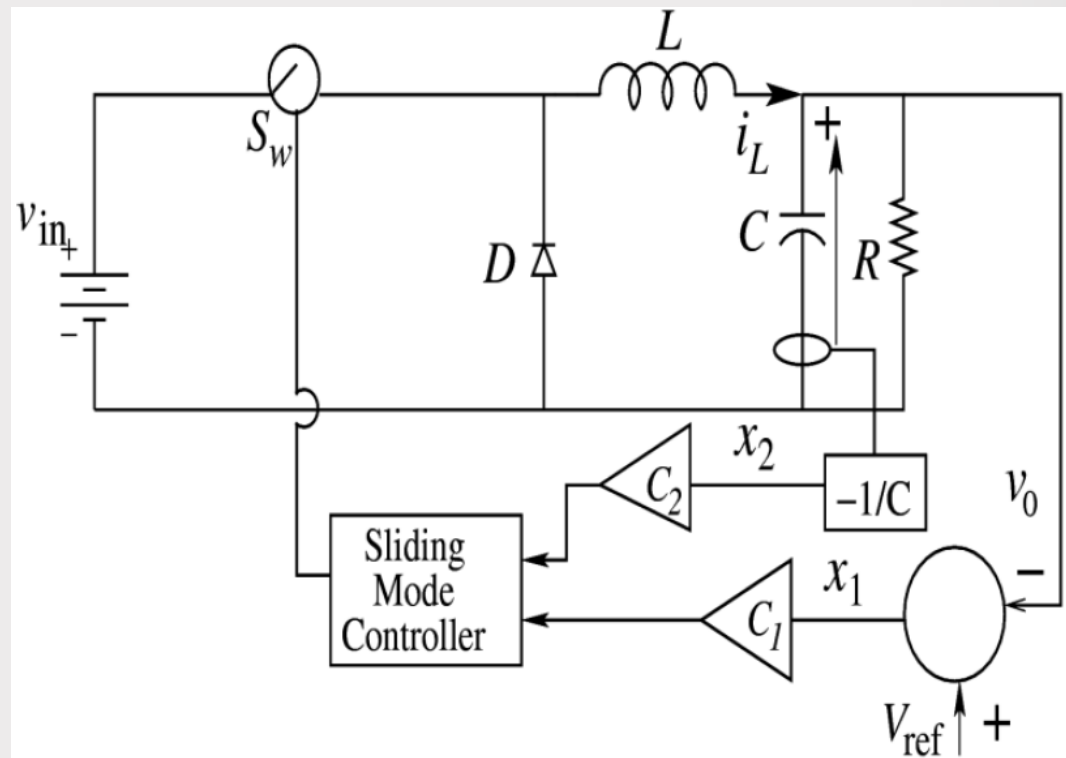
Έλεγχος υστέρησης

- Έλεγχος μέγιστης και ελάχιστης τιμής (ζώνη υστέρησης)
- + Γρήγορη απόκριση
- + Απλός σχεδιασμός και υλοποίηση
- + Δεν απαιτείται αντιστάθμιση του συστήματος ανάδρασης
- Μεταβλητή διακοπτική συχνότητα
- Μη μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης



Έλεγχος με ολίσθηση στο πεδίο καταστάσεων

- Μέτρηση 2 μεγεθών και εφαρμογή ενός ανισοτικού νόμου
- Μεταβλητή διακοπτική συχνότητα
- Μεταβλητοί χρόνοι έναυσης και σβέσης των διακοπών
- Μικρός χρόνος απόκρισης

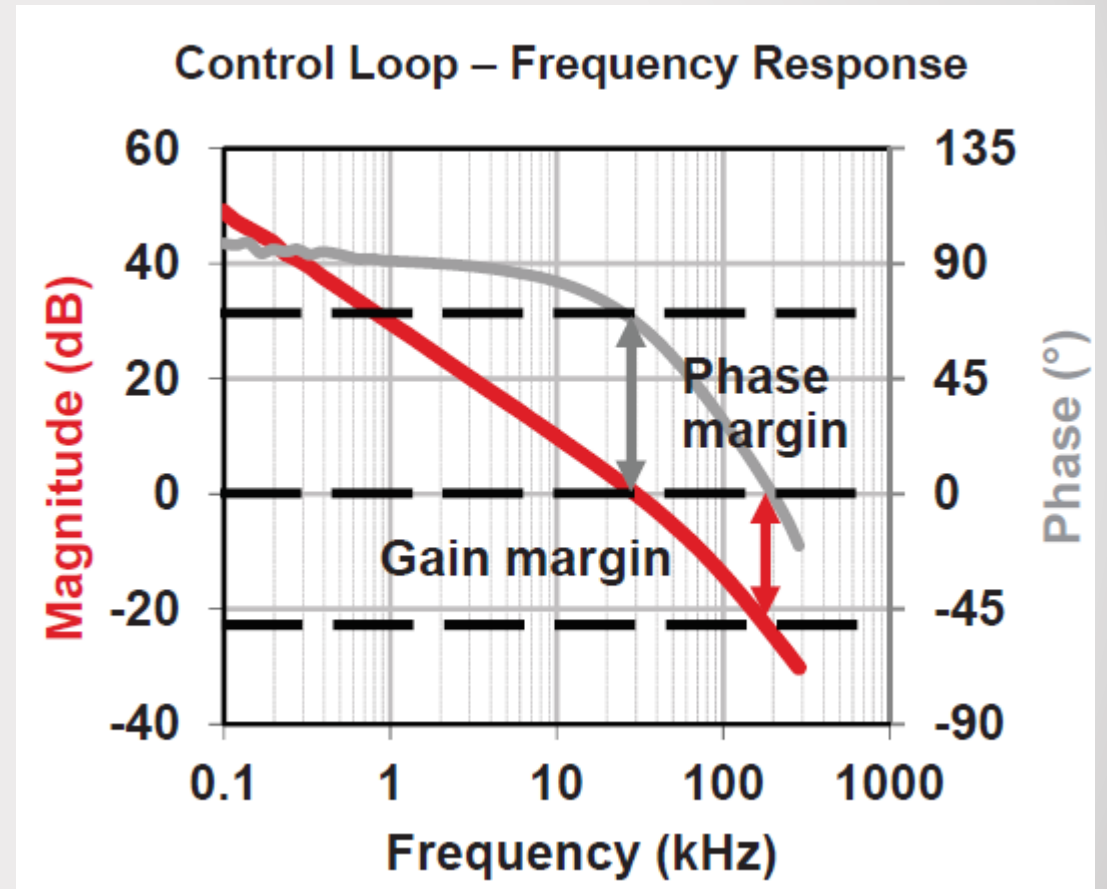


Αντιστάθμιση του συστήματος ανάδρασης (1)

- Αξιολόγηση βρόχου ανάδρασης
 - Περιθώριο φάσης
 - Περιθώριο κέρδους

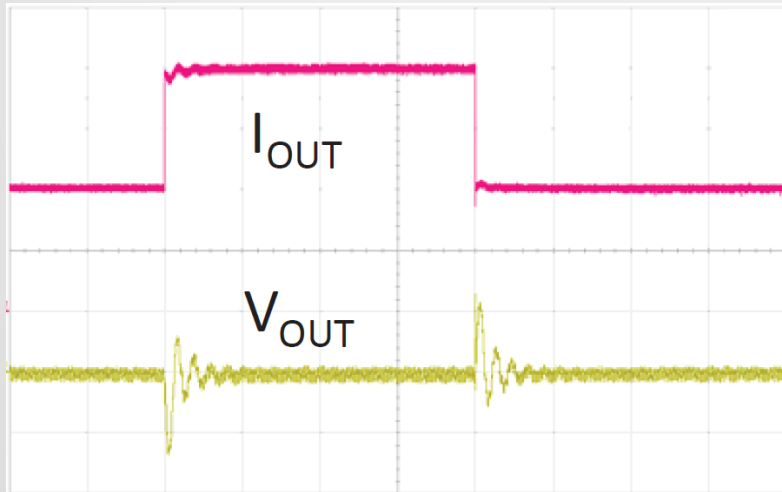
Ένας βρόχος ελέγχου θεωρείται ασταθής, εάν το μοναδιαίο κέρδος (0 dB) συμβαίνει σε συχνότητα χαμηλότερη από αυτή στην οποία η φάση φτάνει τις -180° .

Στόχος του σχεδιασμού → Επαρκές περιθώριο φάσης και κέρδους, έτσι ώστε να μην υπάρχουν ταλαντώσεις.

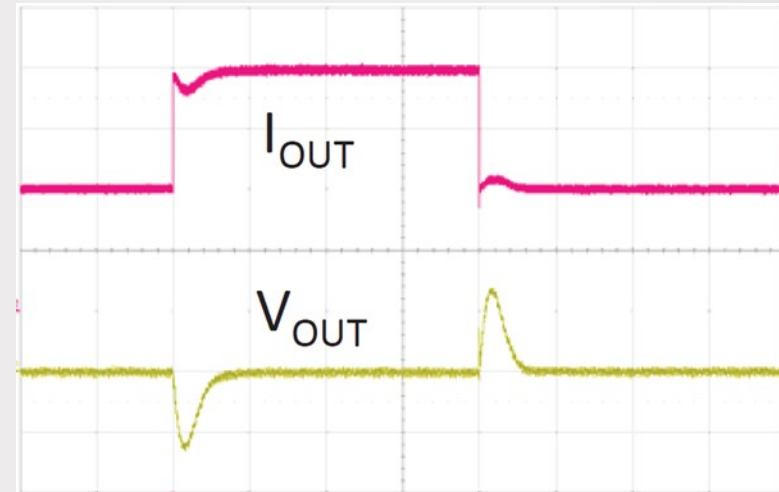


Αντιστάθμιση του συστήματος ανάδρασης (2)

Κακή απόκριση του συστήματος.
Ταλαντώσεις στην τάση εξόδου για μια
βηματική μεταβολή του ρεύματος φορτίου.
(μη επαρκές περιθώριο φάσης)



Σωστή απόκριση του συστήματος, χωρίς
ταλαντώσεις στην τάση εξόδου.
(επαρκές περιθώριο φάσης)

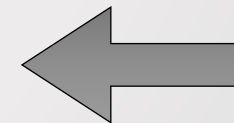
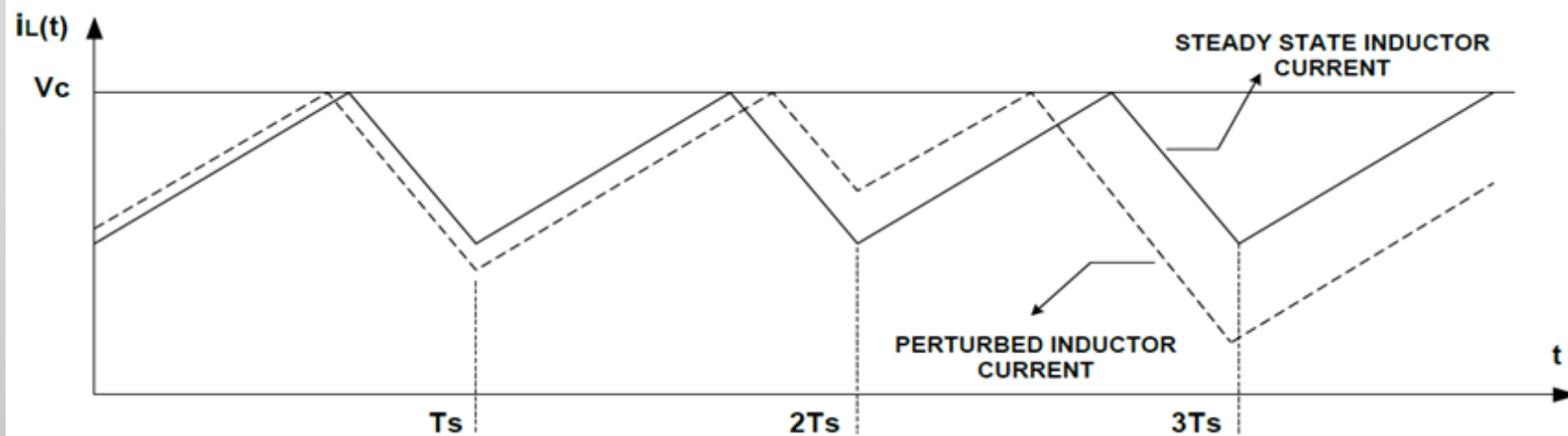
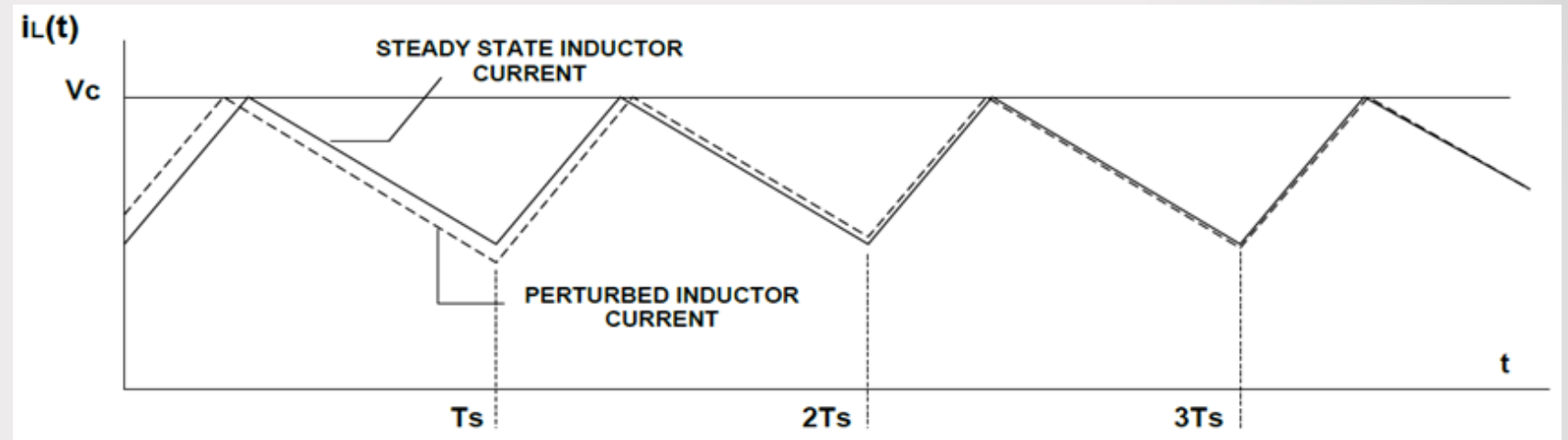
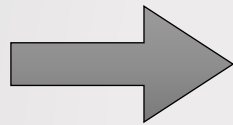


Έλεγχος μέγιστου ρεύματος σε
δικατευθυντήριο μετατροπέα

...

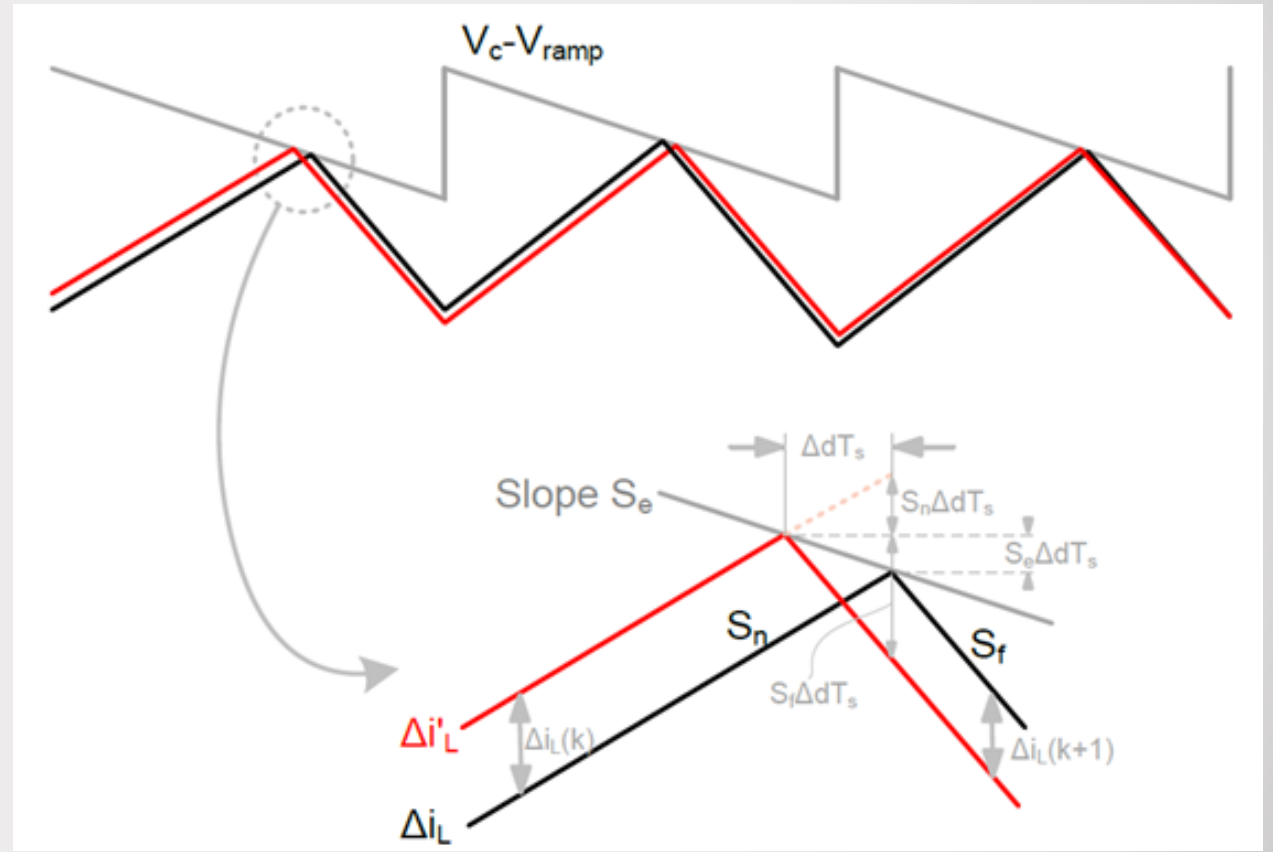
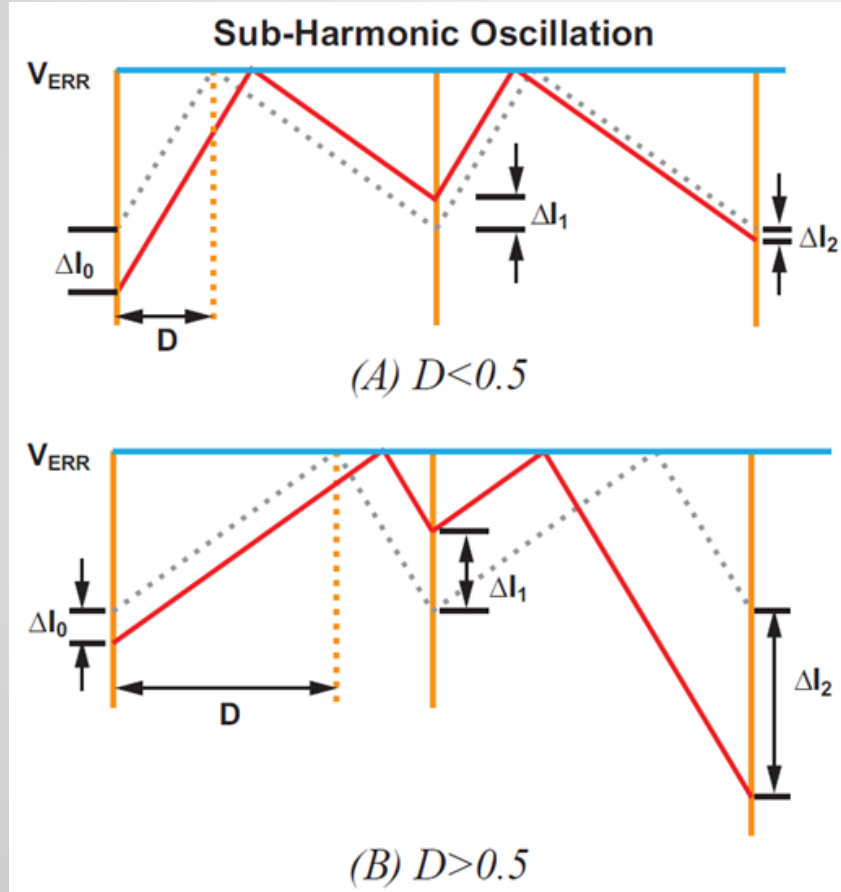
Φαινόμενο υποαρμονικών ταλαντώσεων (1)

$D < 50\%$



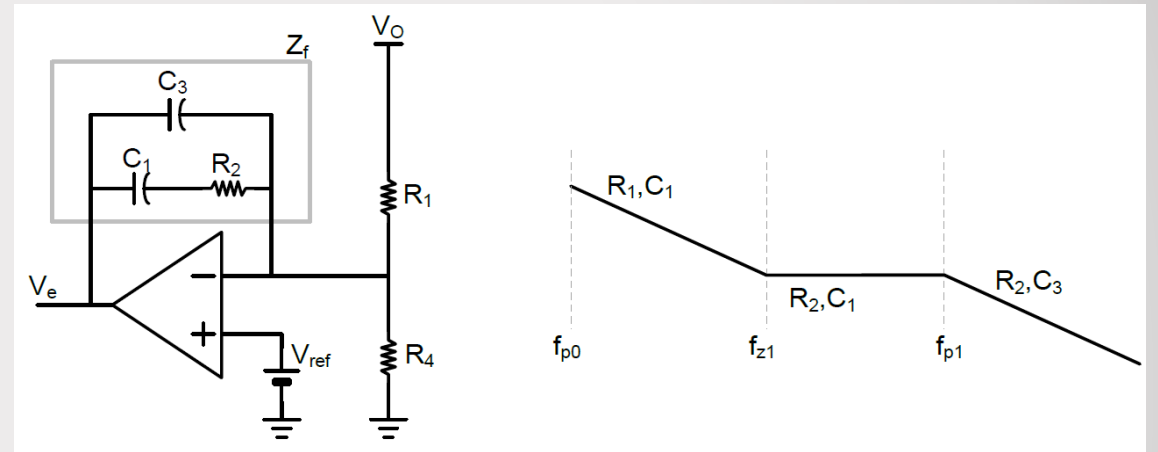
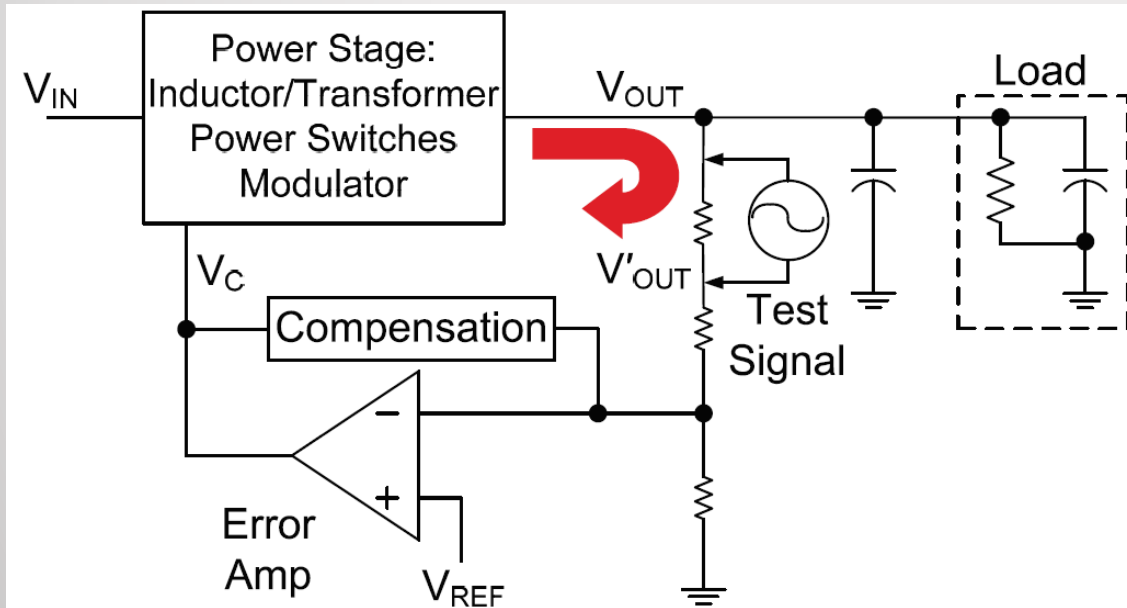
$D > 50\%$

Φαινόμενο υποαρμονικών ταλαντώσεων (2)



Σύστημα ανάδρασης

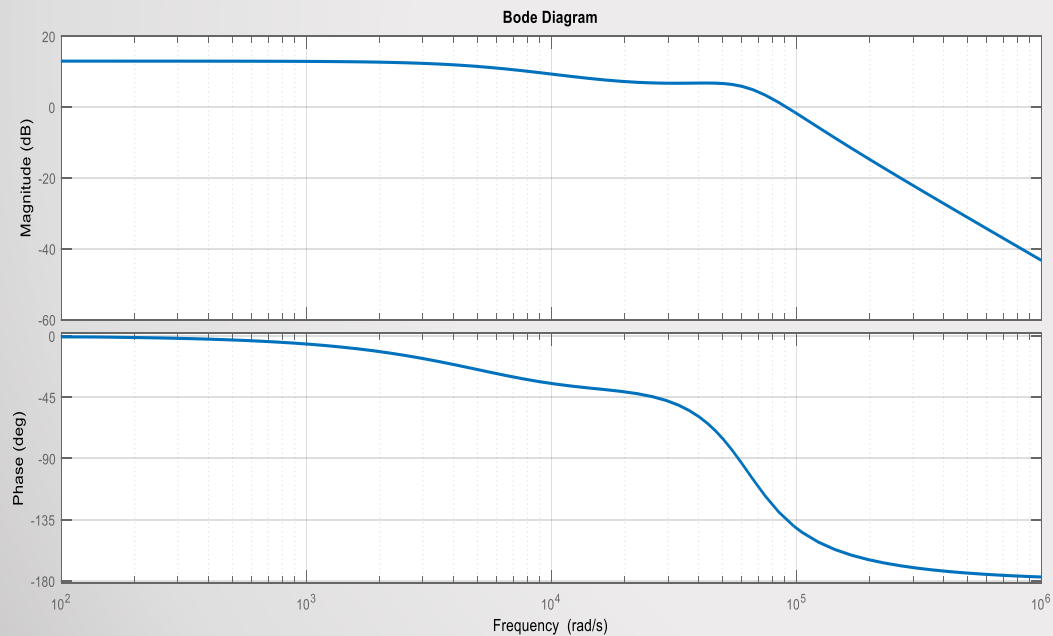
$$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = H_{dc} F_p(s) F_H(s)$$



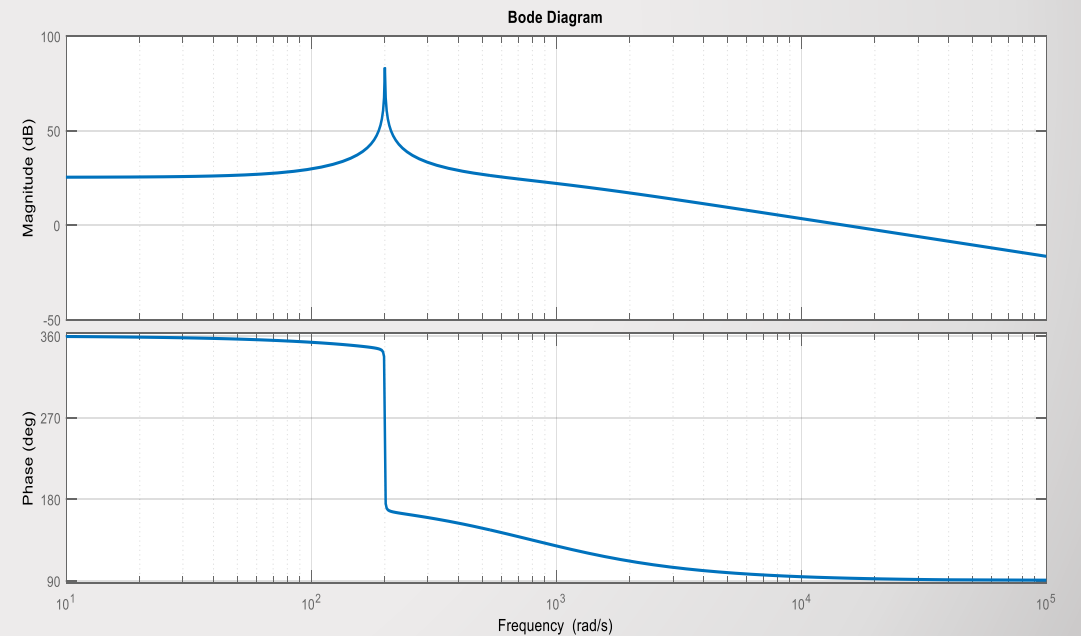
$$H_c(s) = \frac{\omega_{p1} (1 + \frac{s}{\omega_z})}{1 + \frac{s}{\omega_{p2}}}$$

Θεωρητική συνάρτηση μεταφοράς

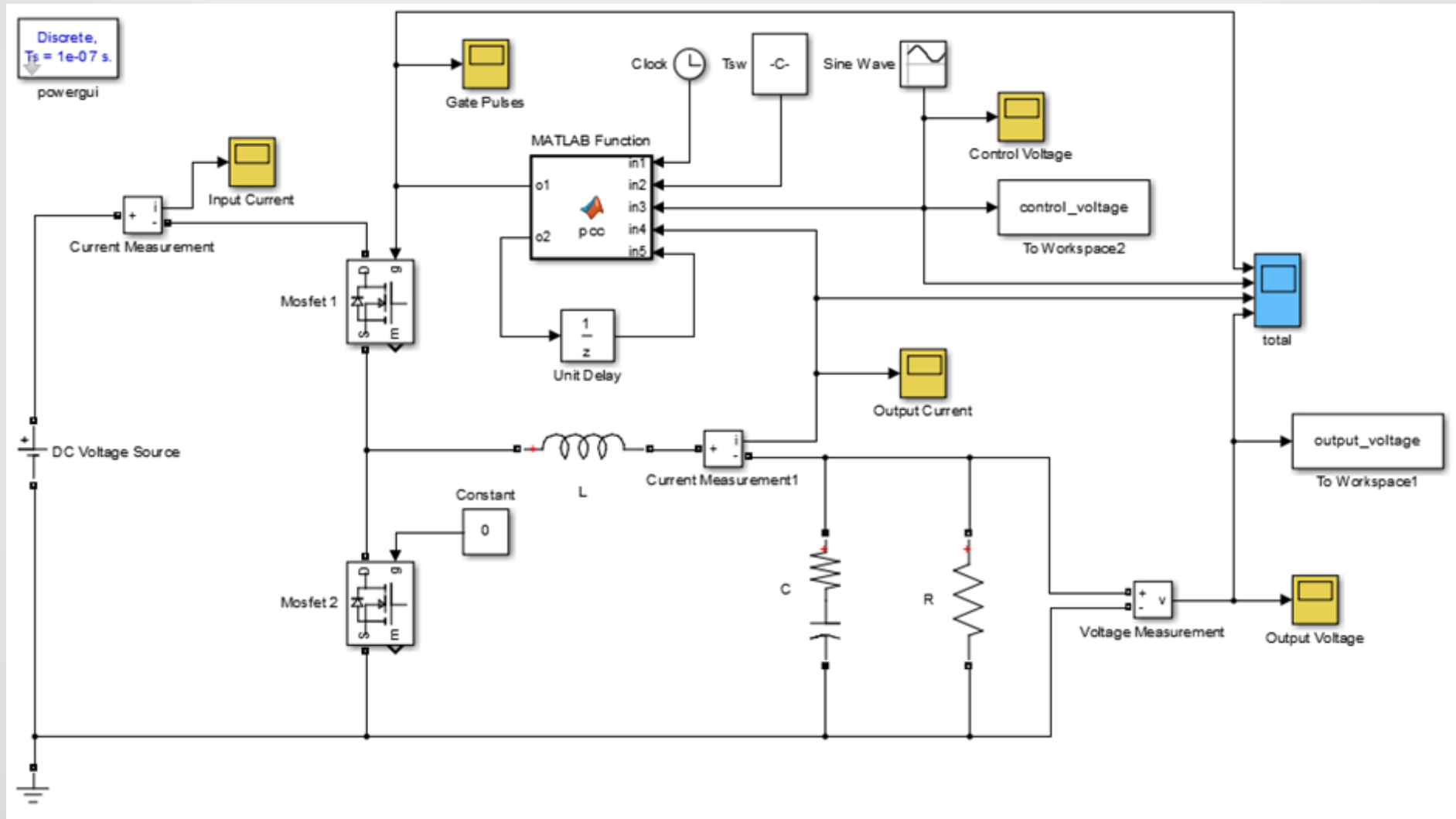
Λειτουργία υποβιβασμού



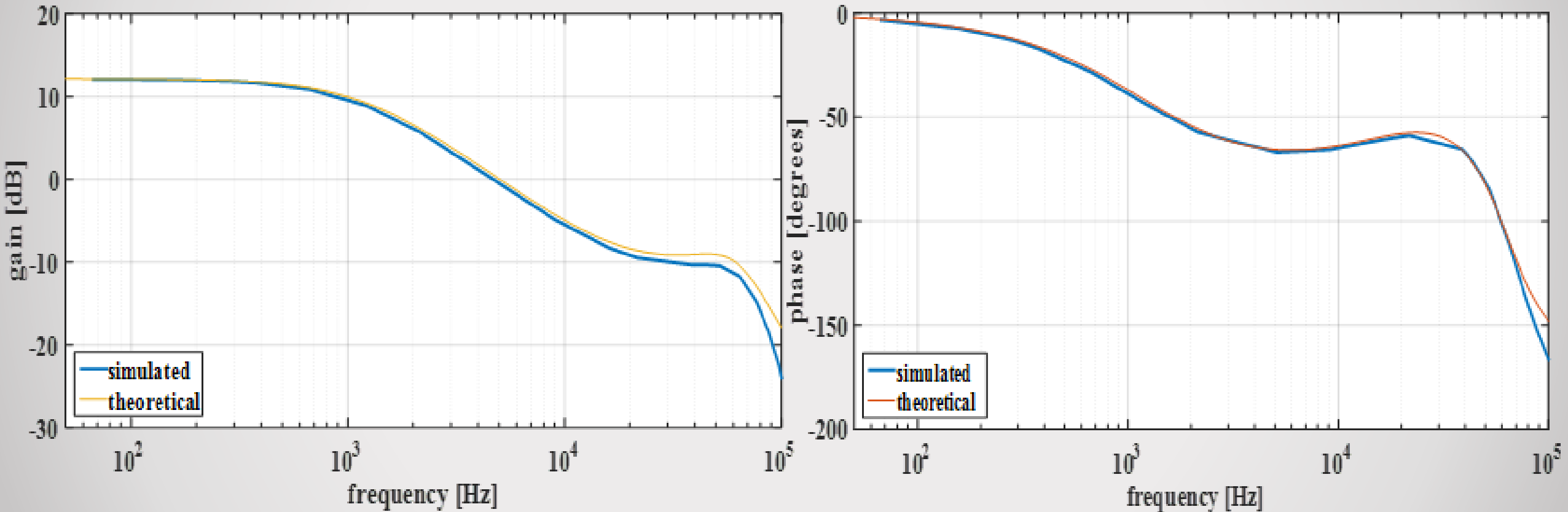
Λειτουργία ανύψωσης



Προσομοίωση του μετατροπέα υπό έλεγχο μέγιστου ρεύματος



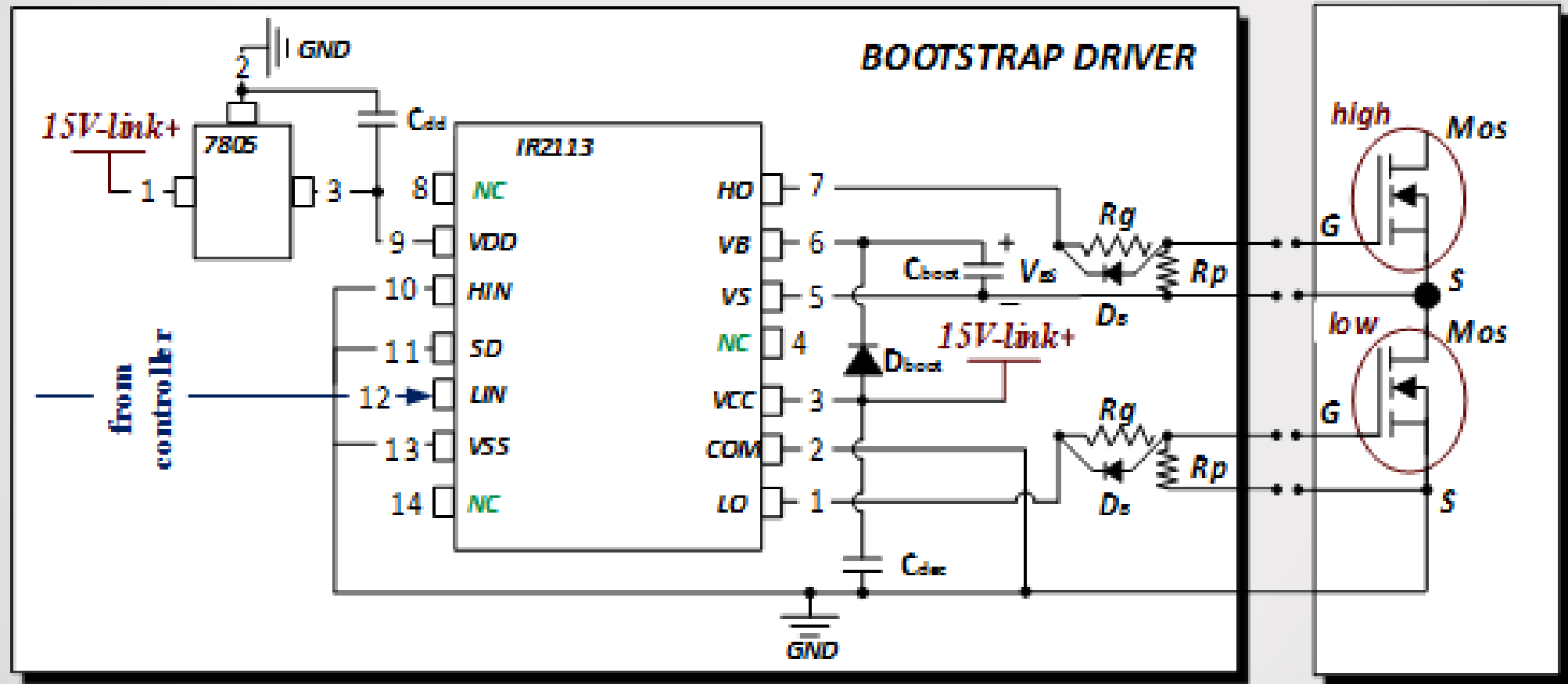
Σύγκριση συναρτήσεων μεταφοράς



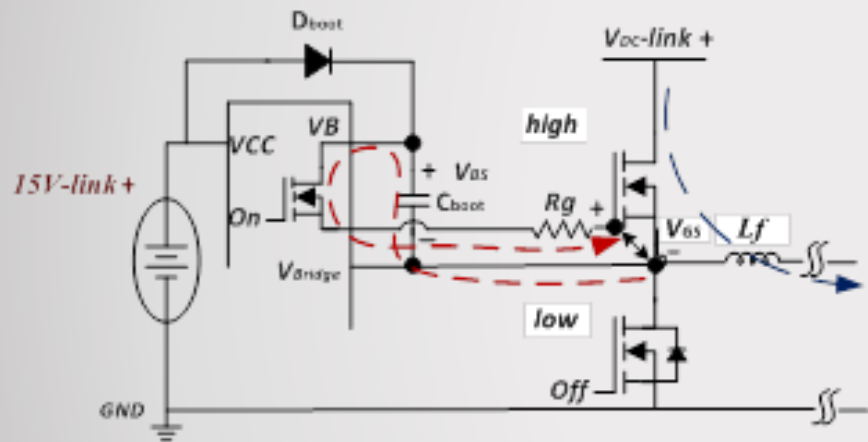
Κατασκευή πειραματικών διατάξεων

...

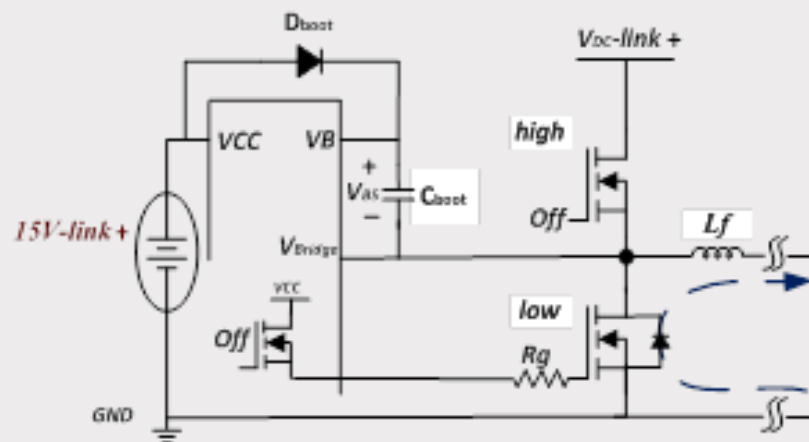
Κύκλωμα οδήγησης διακοπών (bootstrap) (1)



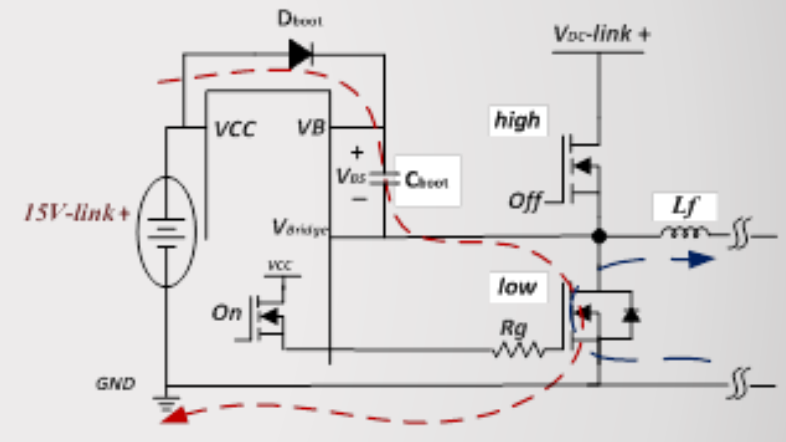
Κύκλωμα οδήγησης διακοπών (bootstrap) (2)



high **ON**, low **OFF**



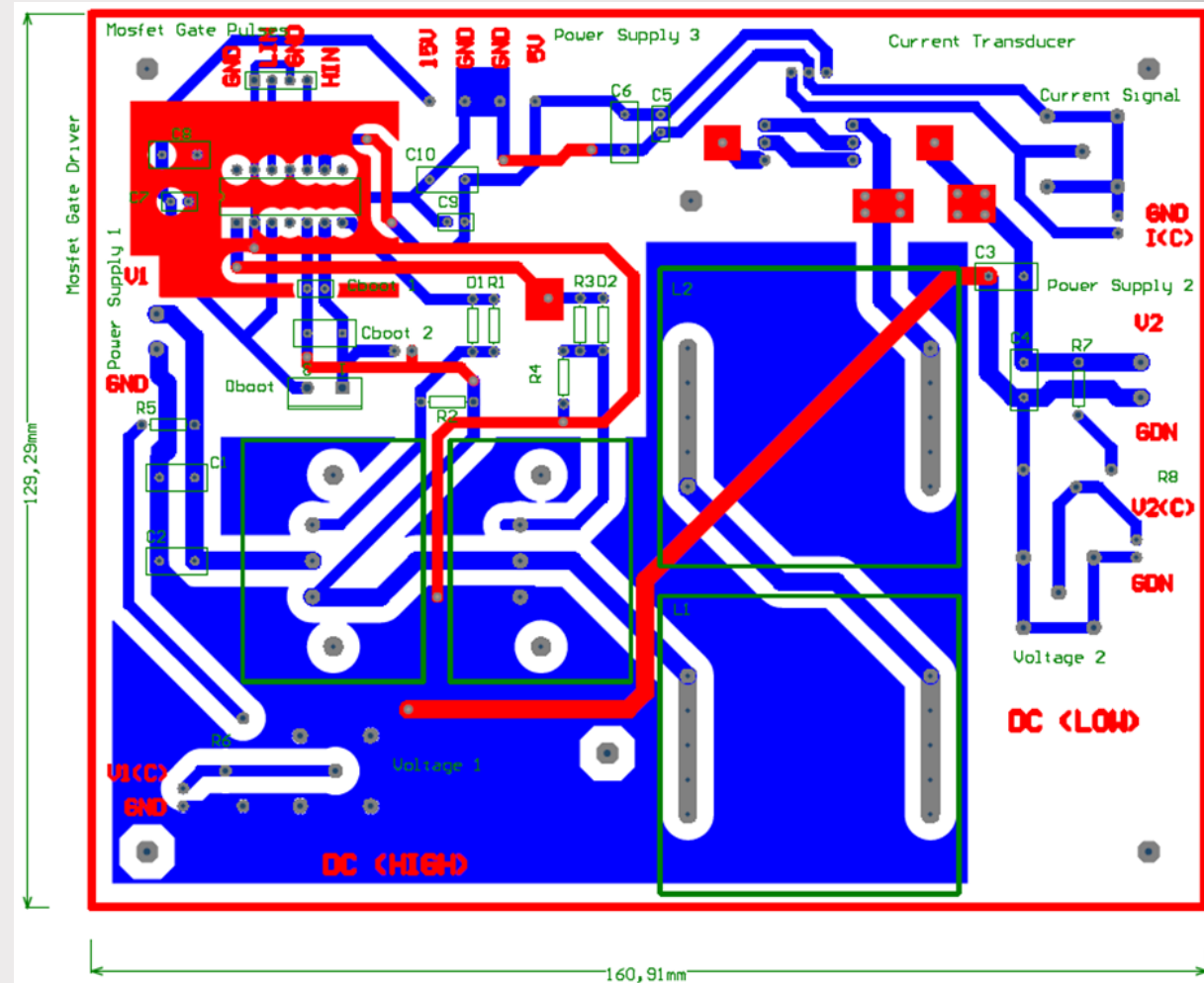
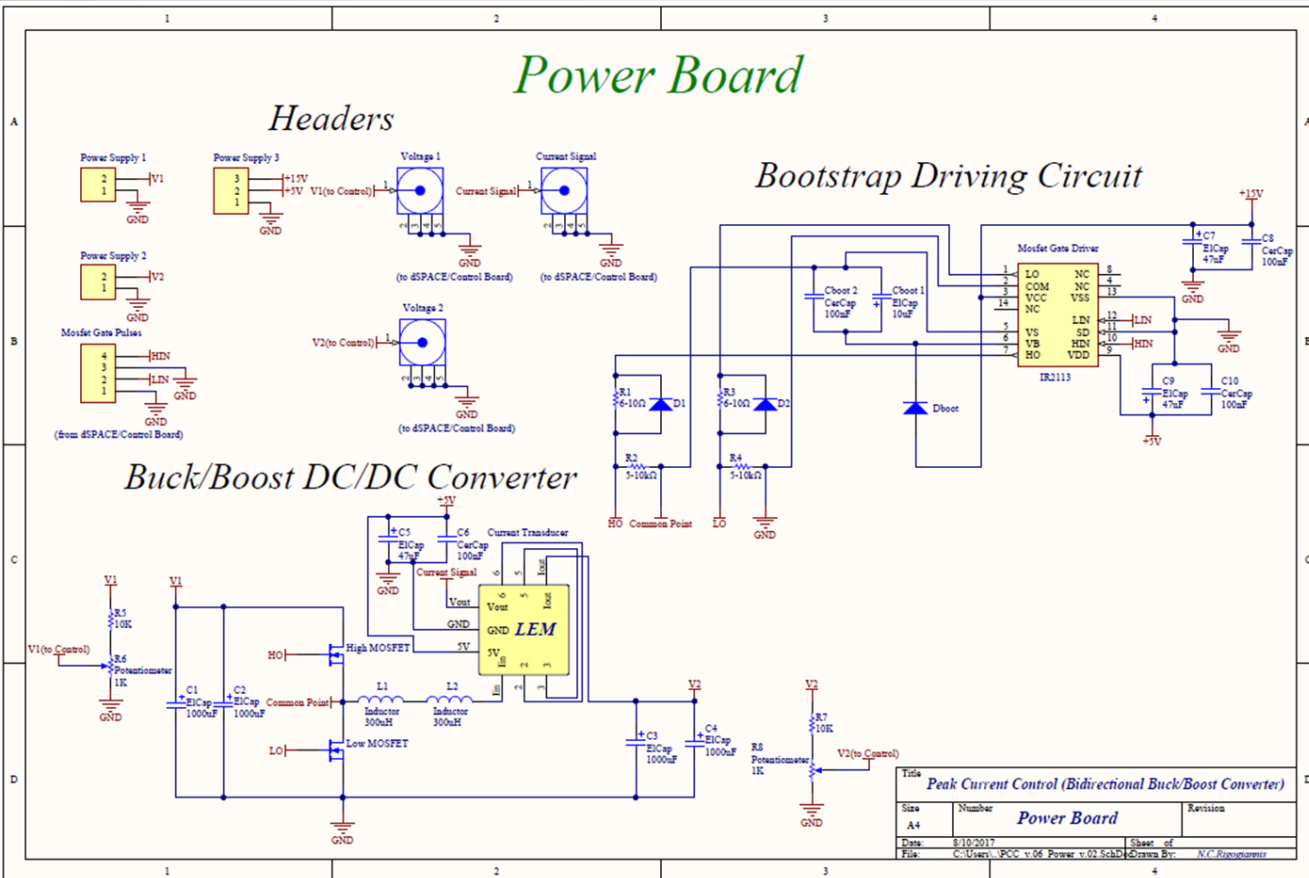
high **OFF**, low **OFF**



high **OFF**, low **ON**

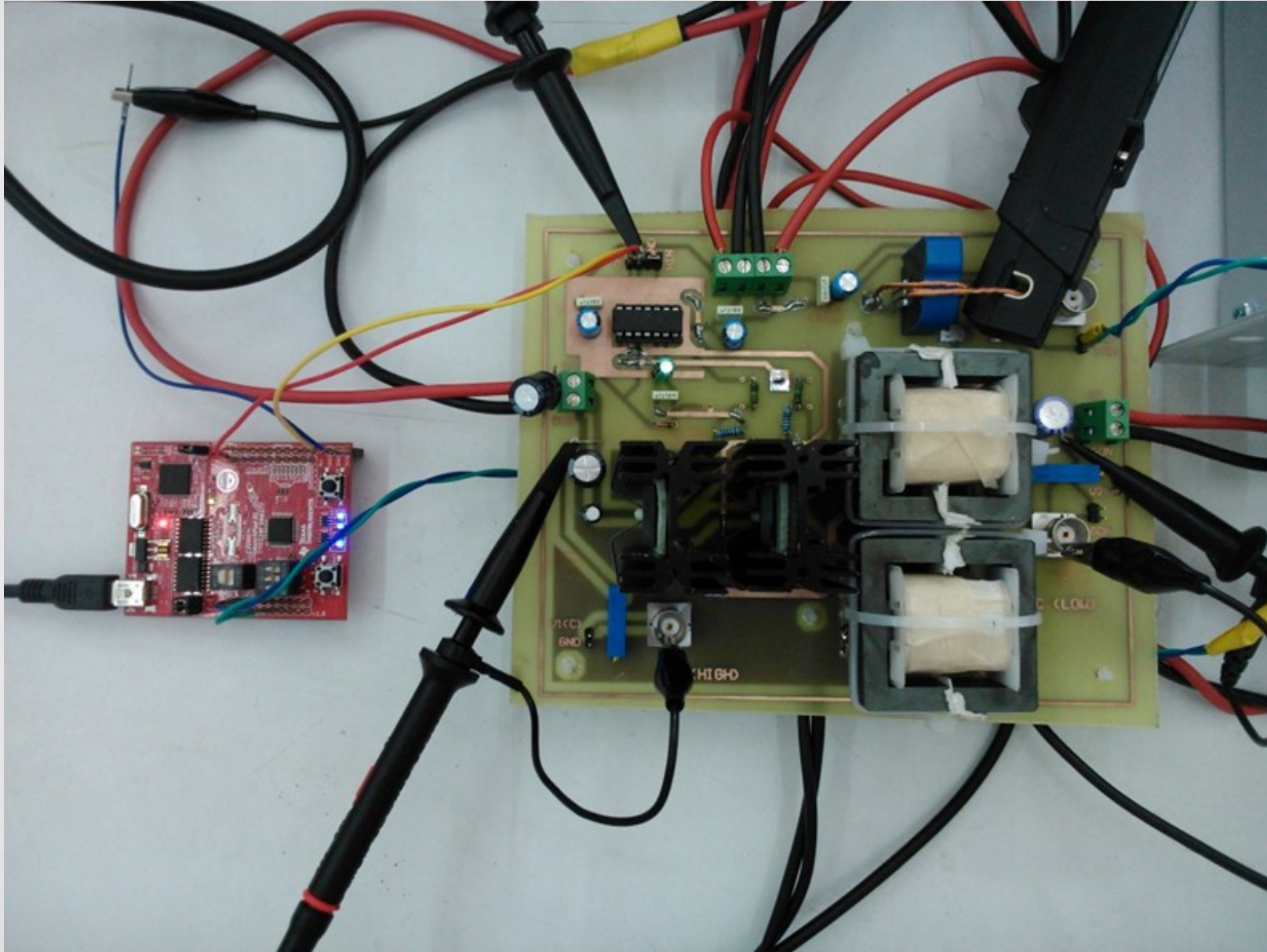
Κύκλωμα ισχύος(1)

Ηλεκτρονικό σχέδιο



Σχέδιο πλακέτας (PCB)

Κύκλωμα Ισχύος(2)

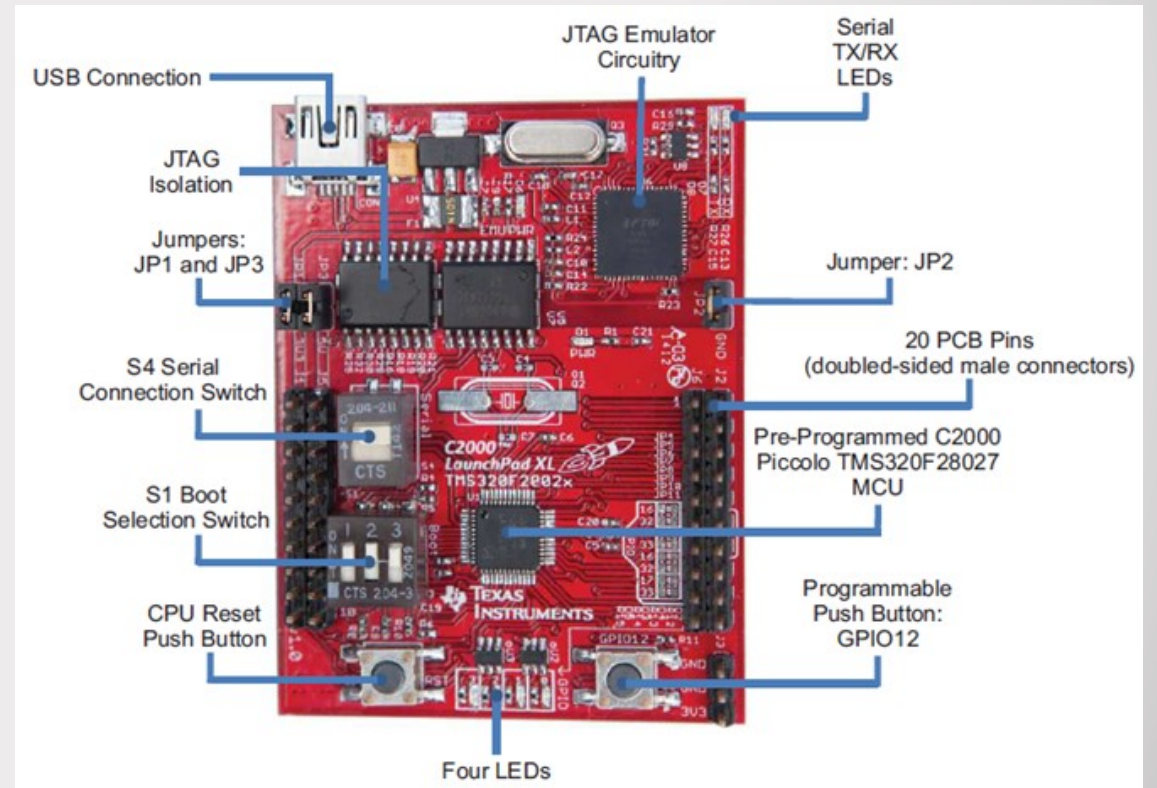


Έλεγχος

(dsPIC30F4011)



(TMS320F28027)



Πειραματικά αποτελέσματα

...

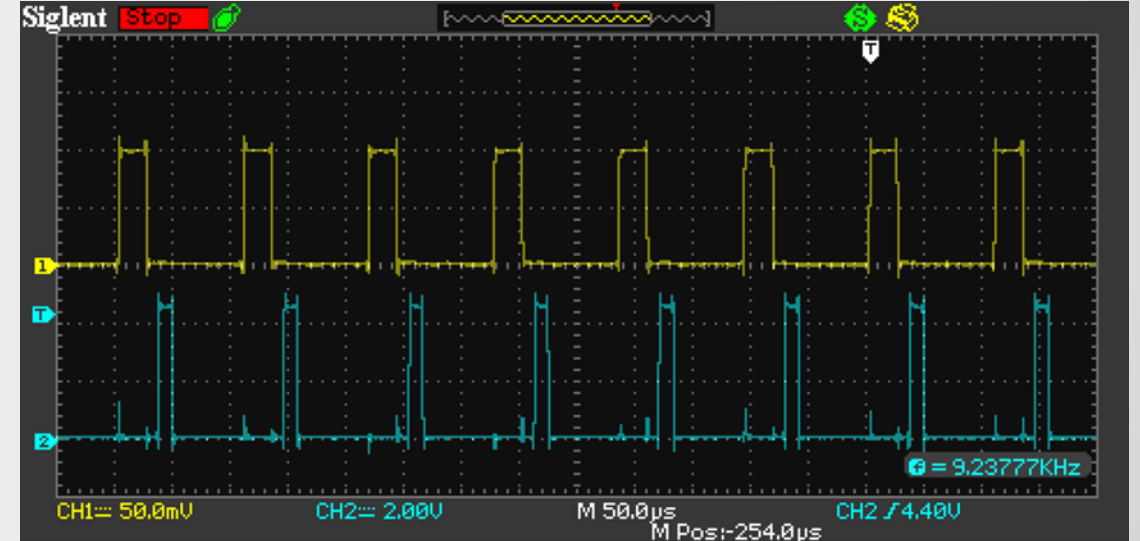
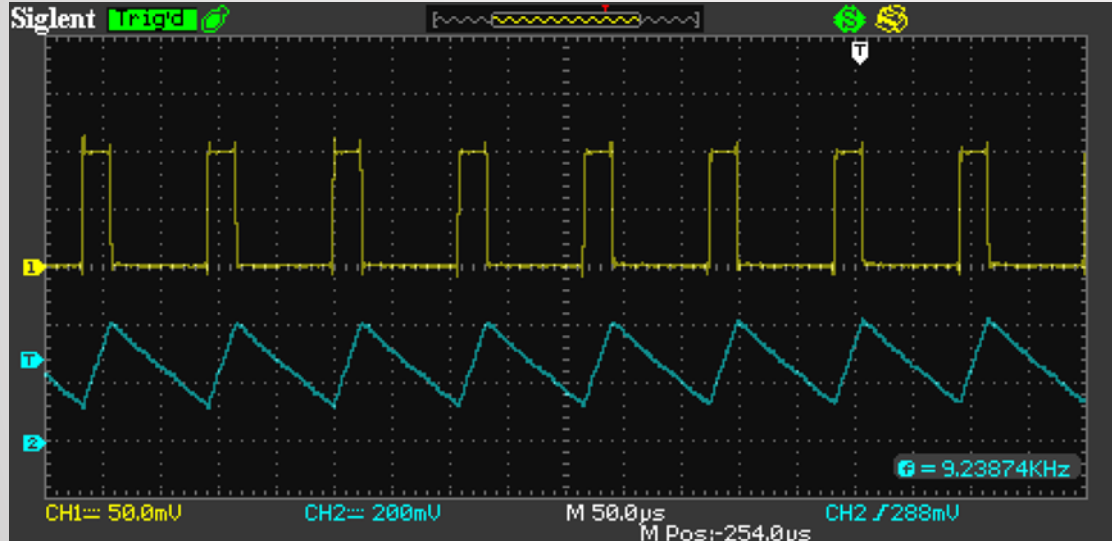
Έλεγχος με τον μικροελεγκτή dsPIC30F4011

- Λειτουργία υποβιβασμού τάσης

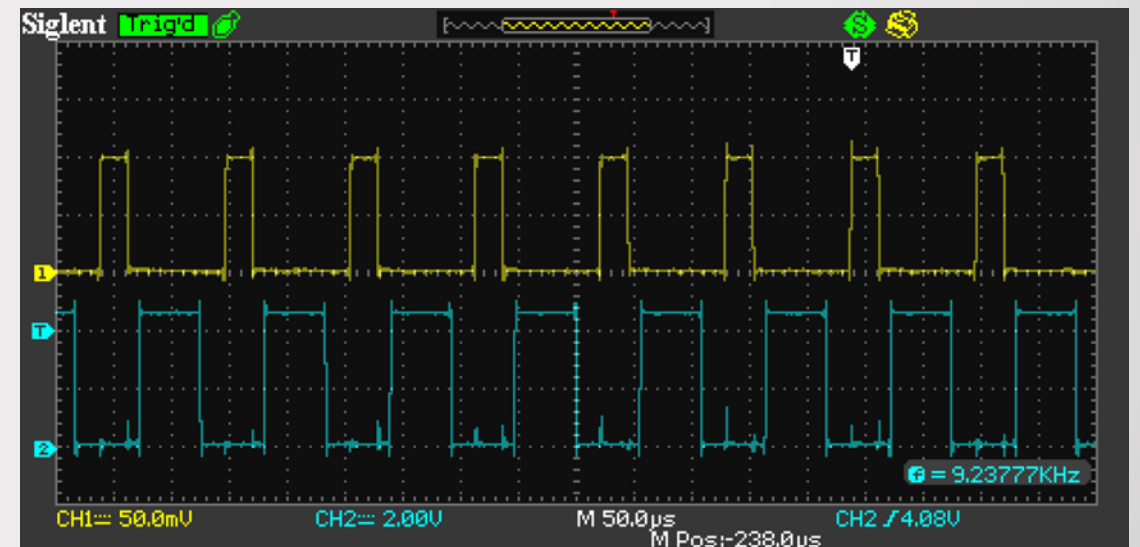
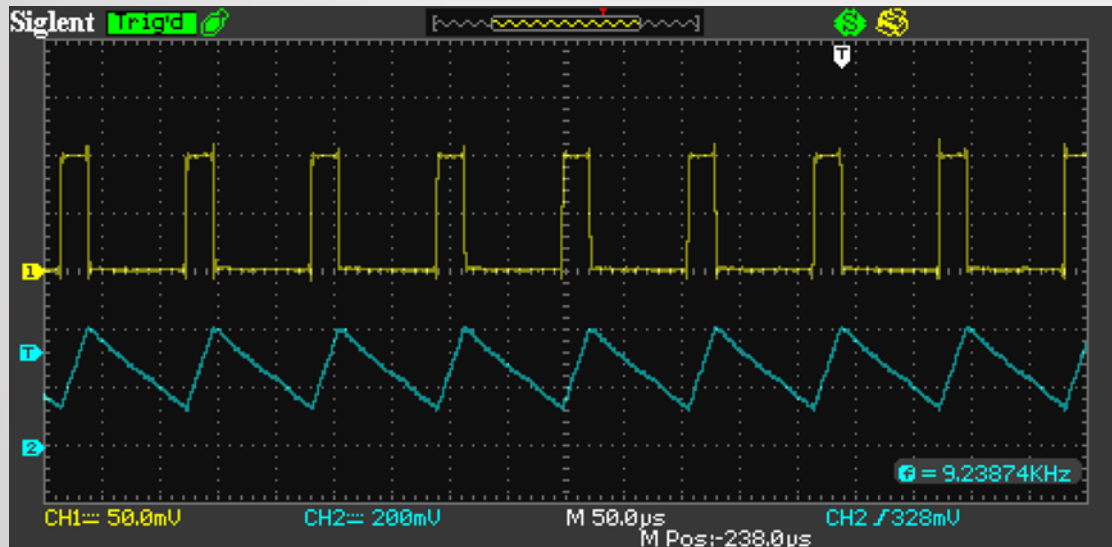
**Μόνο ο βρόχος ρεύματος (εσωτερικός)*

Λειτουργία *synchronous rectification

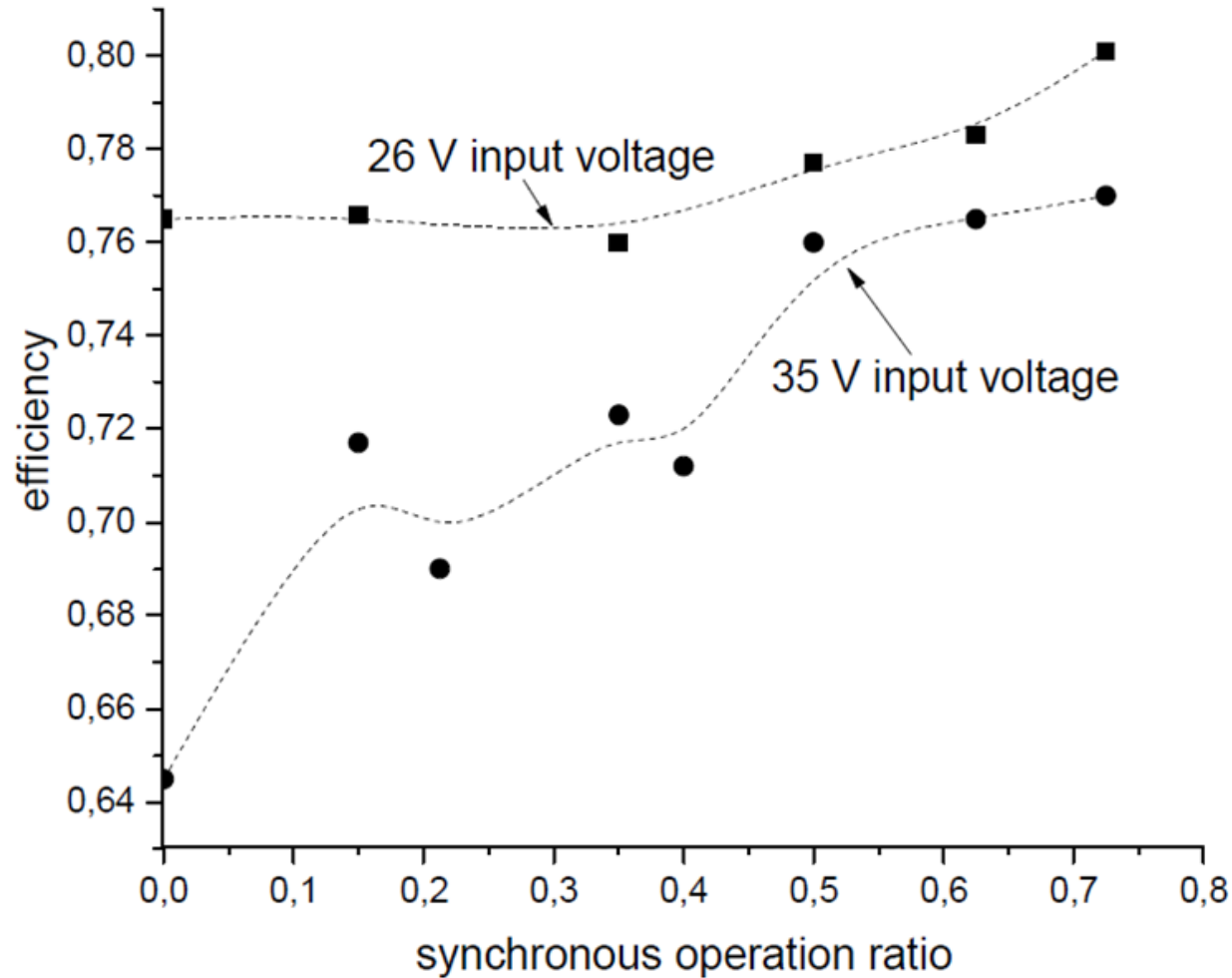
$V_{in}=26\text{ V}$, $V_{out}=5\text{ V}$, $I_{max}=2\text{ A}$, $f=9.2\text{ kHz}$, 15% synchronous operation



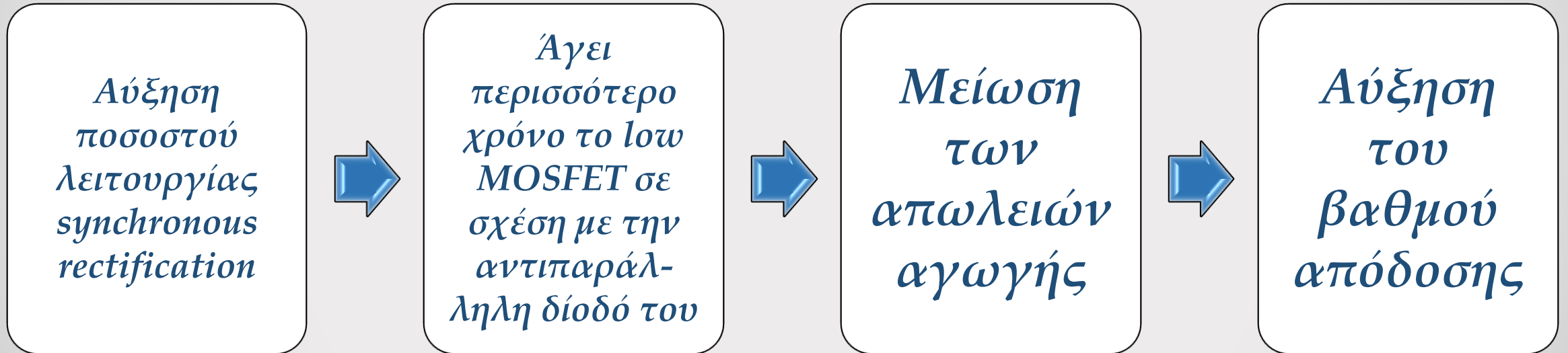
$V_{in}=26\text{ V}$, $V_{out}=5\text{ V}$, $I_{max}=2\text{ A}$, $f=9.2\text{ kHz}$, 75% synchronous operation



Απόδοση, συναρτήσσει του ποσοστού λειτουργίας *synchronous rectification*, με παράμετρο την τάση εισόδου



Συμπέρασμα



Έλεγχος με τον μικροελεγκτή TMS320F28027

- Λειτουργία υποβιβασμού τάσης
- Λειτουργία ανύψωσης τάσης
- Λειτουργία ανάκτησης ενέργειας, η οποία έχει αποθηκευτεί σε υπερπυκνωτές

**Σύγκριση μεταξύ του τύπου II αντισταθμιστή και του PI ελεγκτή*

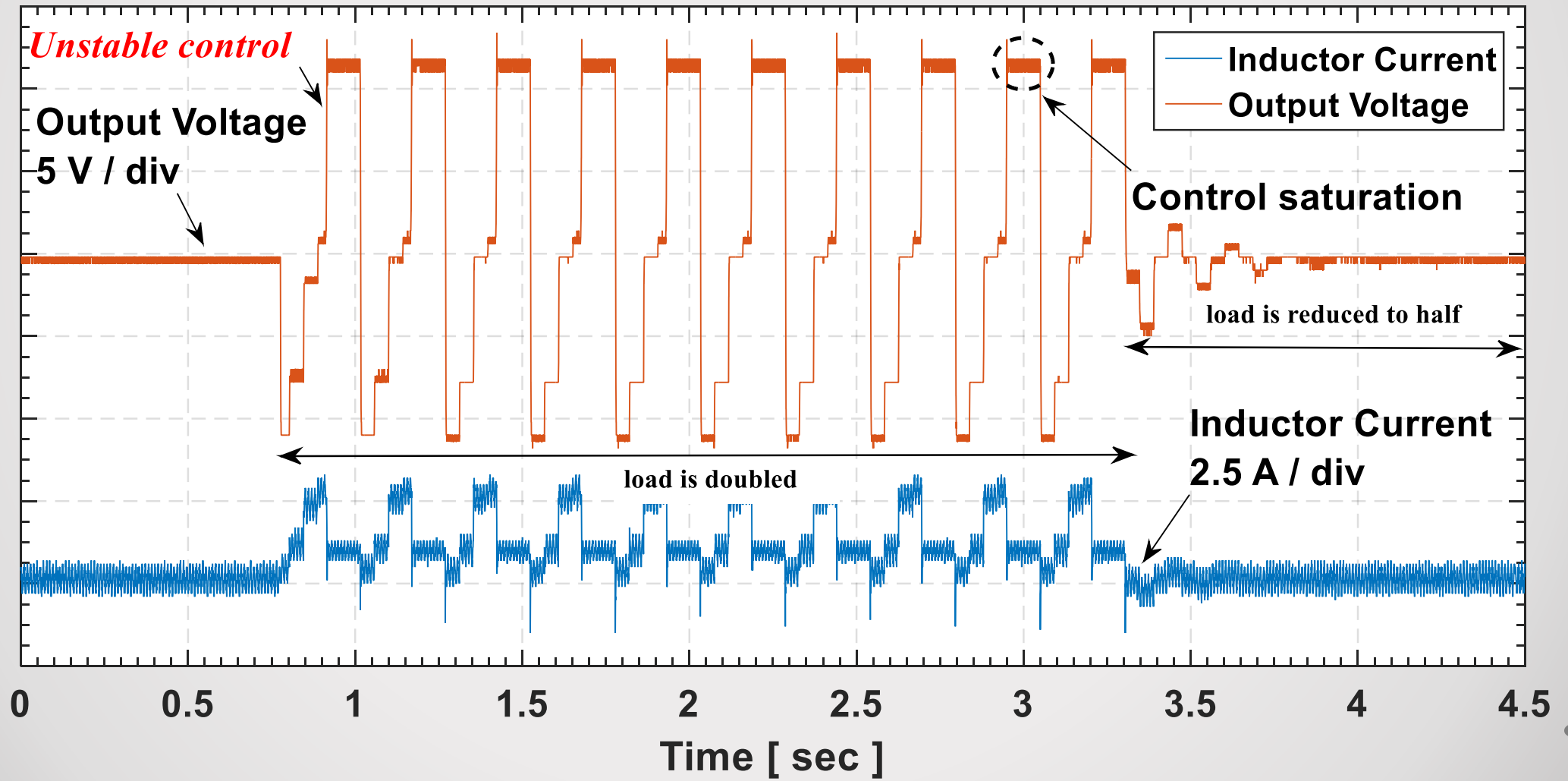
**Βρόχος τάσης (εξωτερικός) και ρεύματος (εσωτερικός)*

**Εισαγωγή ράμπας αντιστάθμισης*

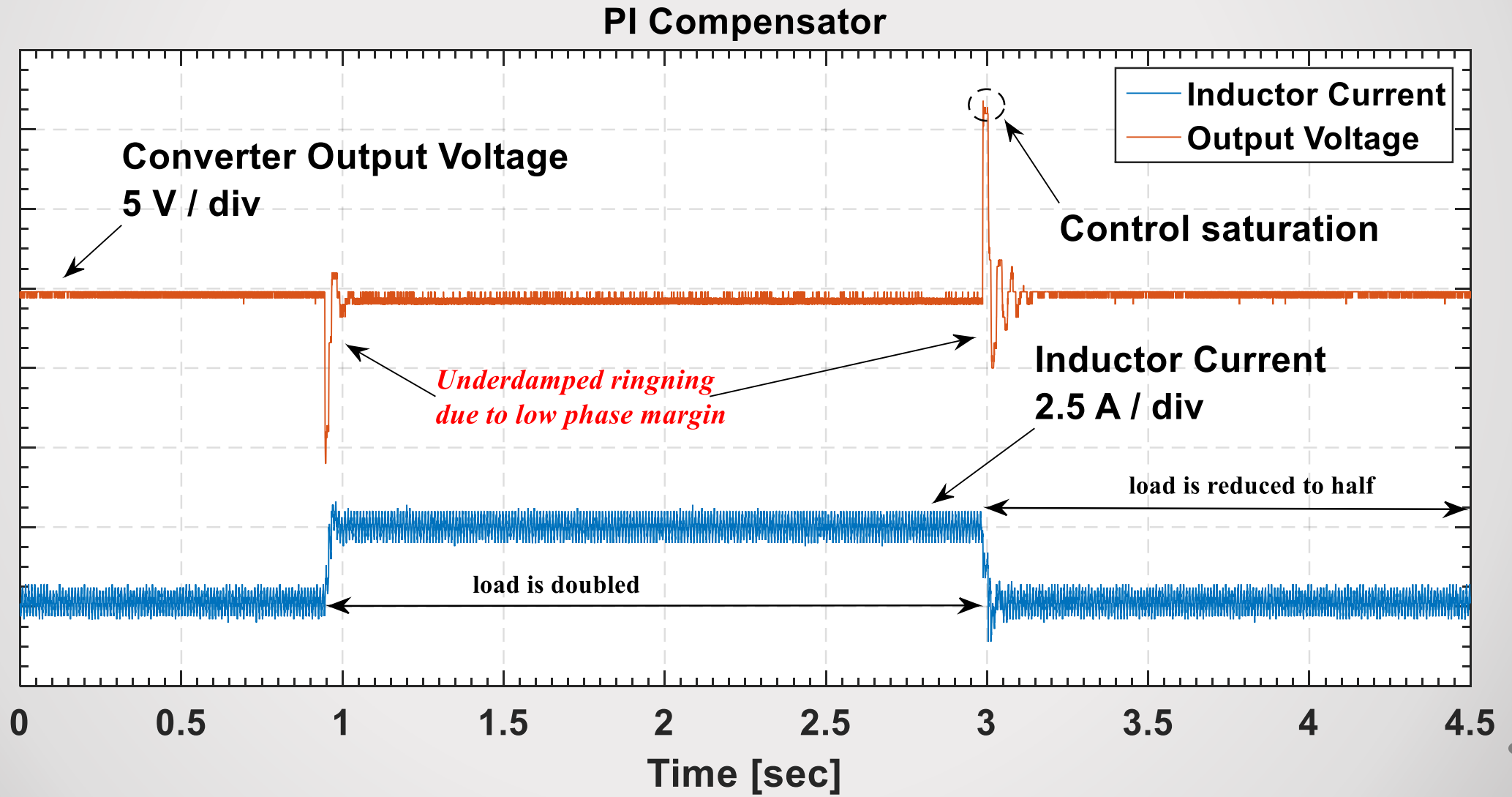
Λειτουργία υποβιβασμού τάσης
...

Ελεγκτής PI, μεταβολή στο φορτίο, αστάθεια

PI Compensator

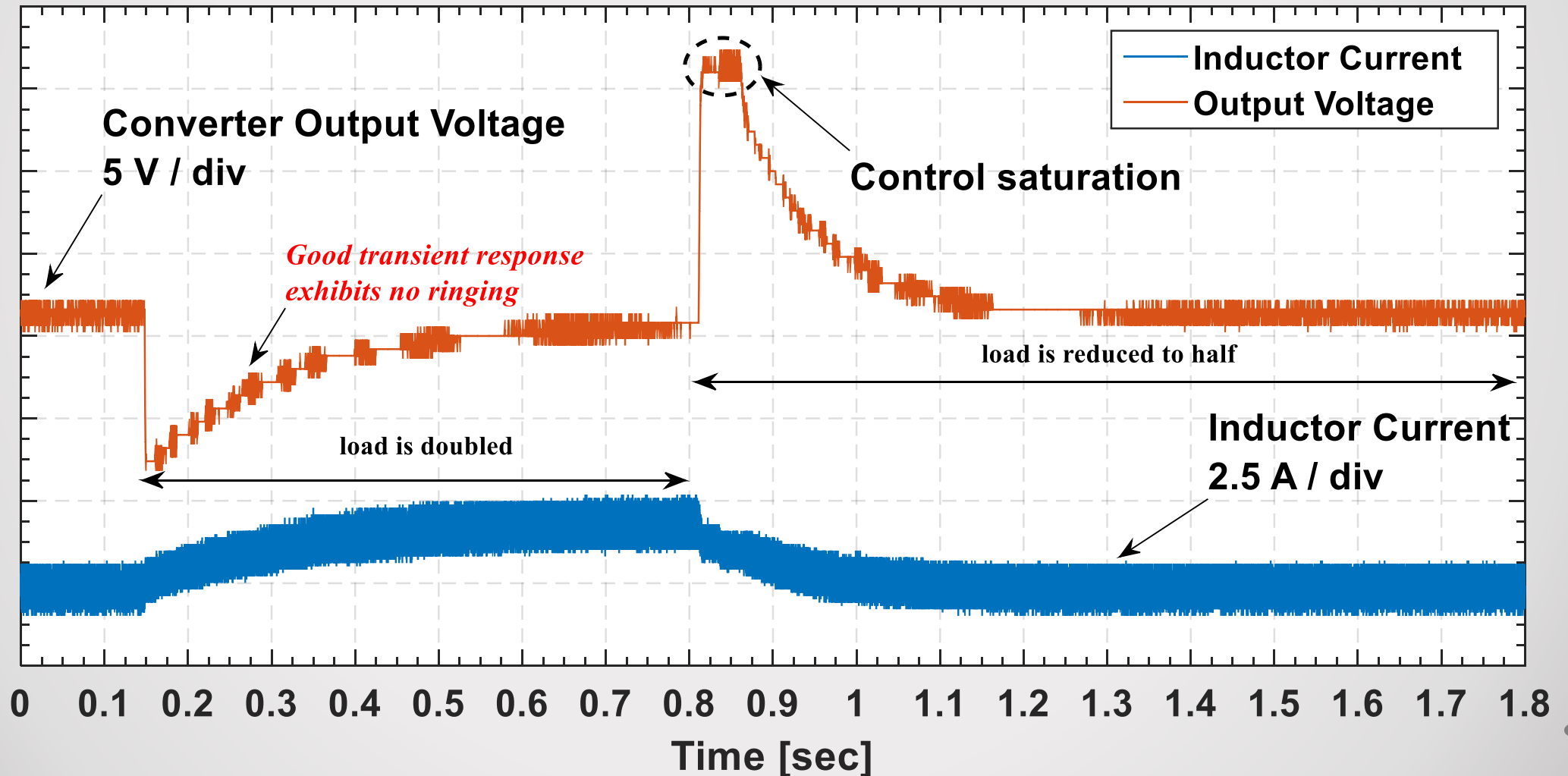


Ελεγκτής PI, μεταβολή στο φορτίο



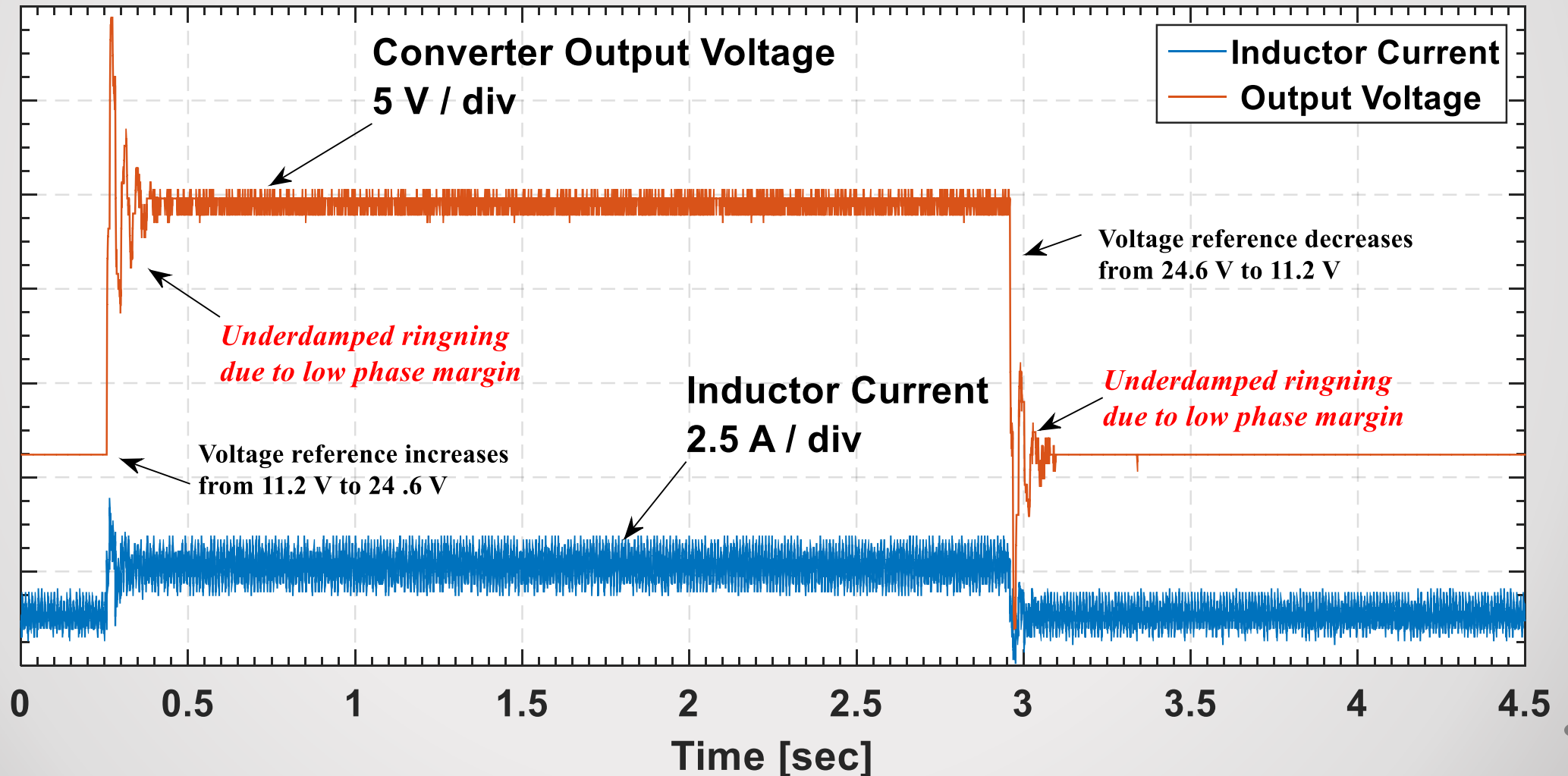
Τύπου II Αντισταθμιστής, μεταβολή στο φορτίο

Type II Compensator



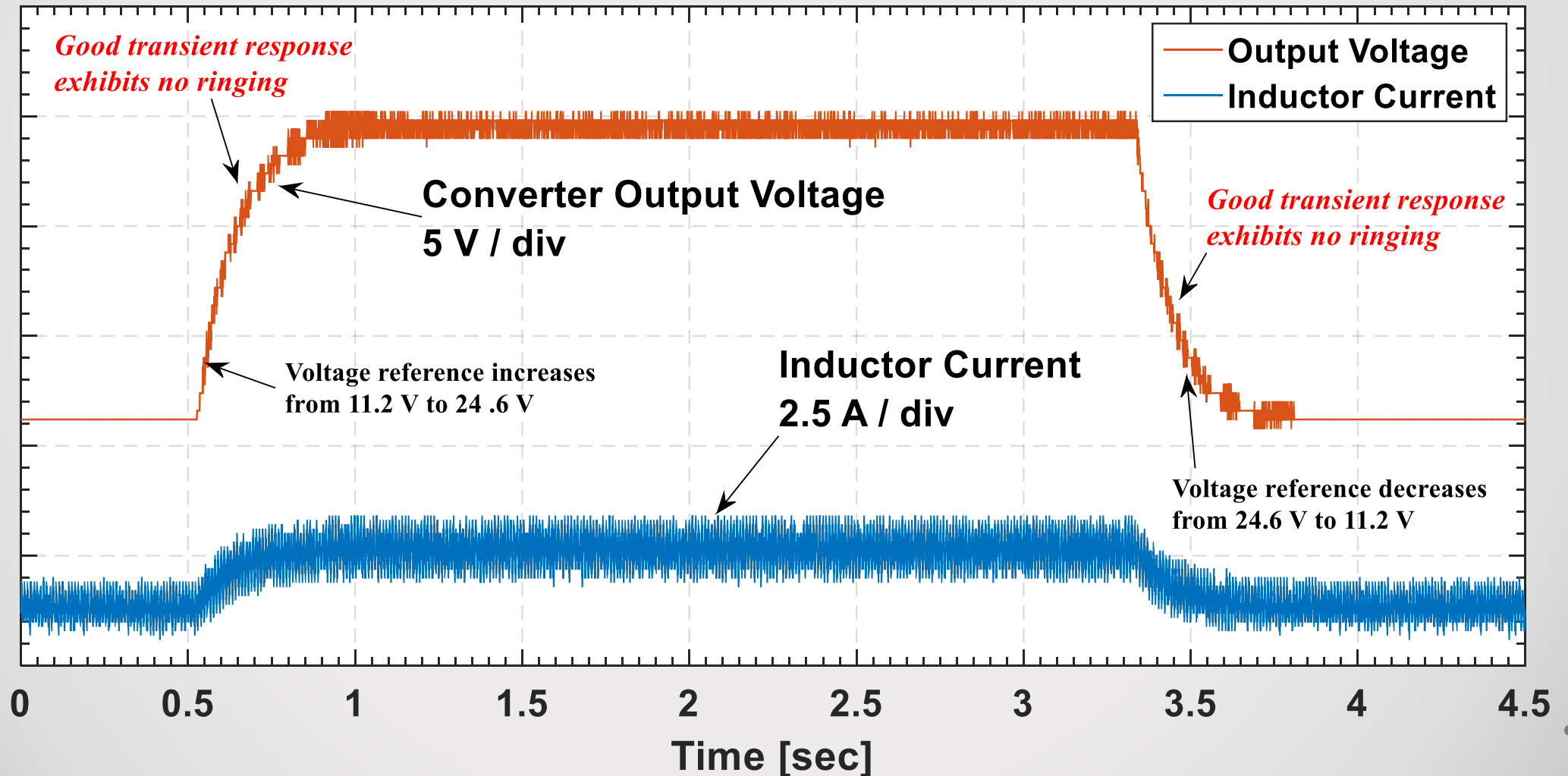
Ελεγκτής PI, μεταβολή στην τάση αναφοράς

PI Compensator



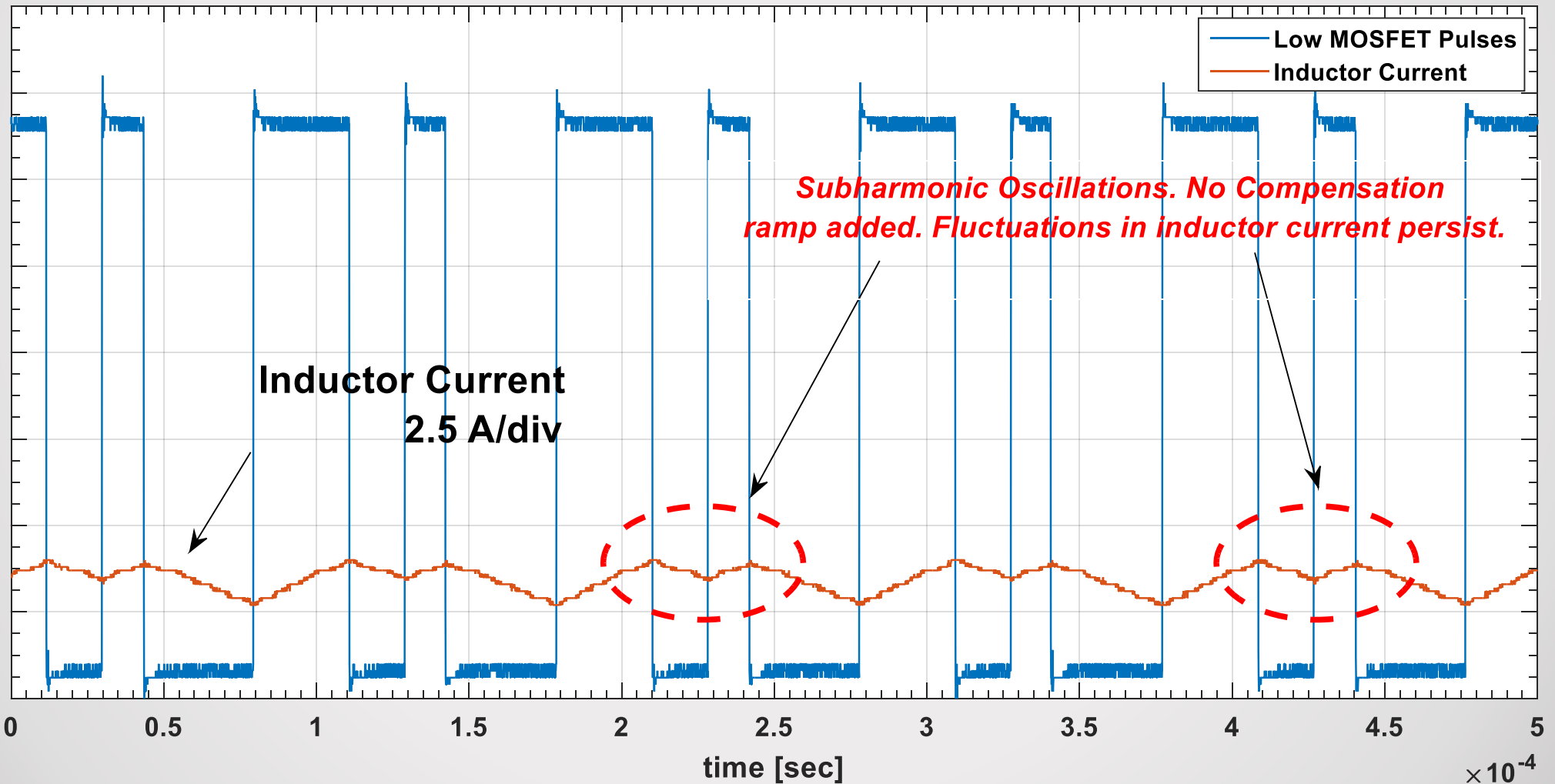
Τύπου II Αντισταθμιστής, μεταβολή στην τάση αναφοράς

Type II Compensator



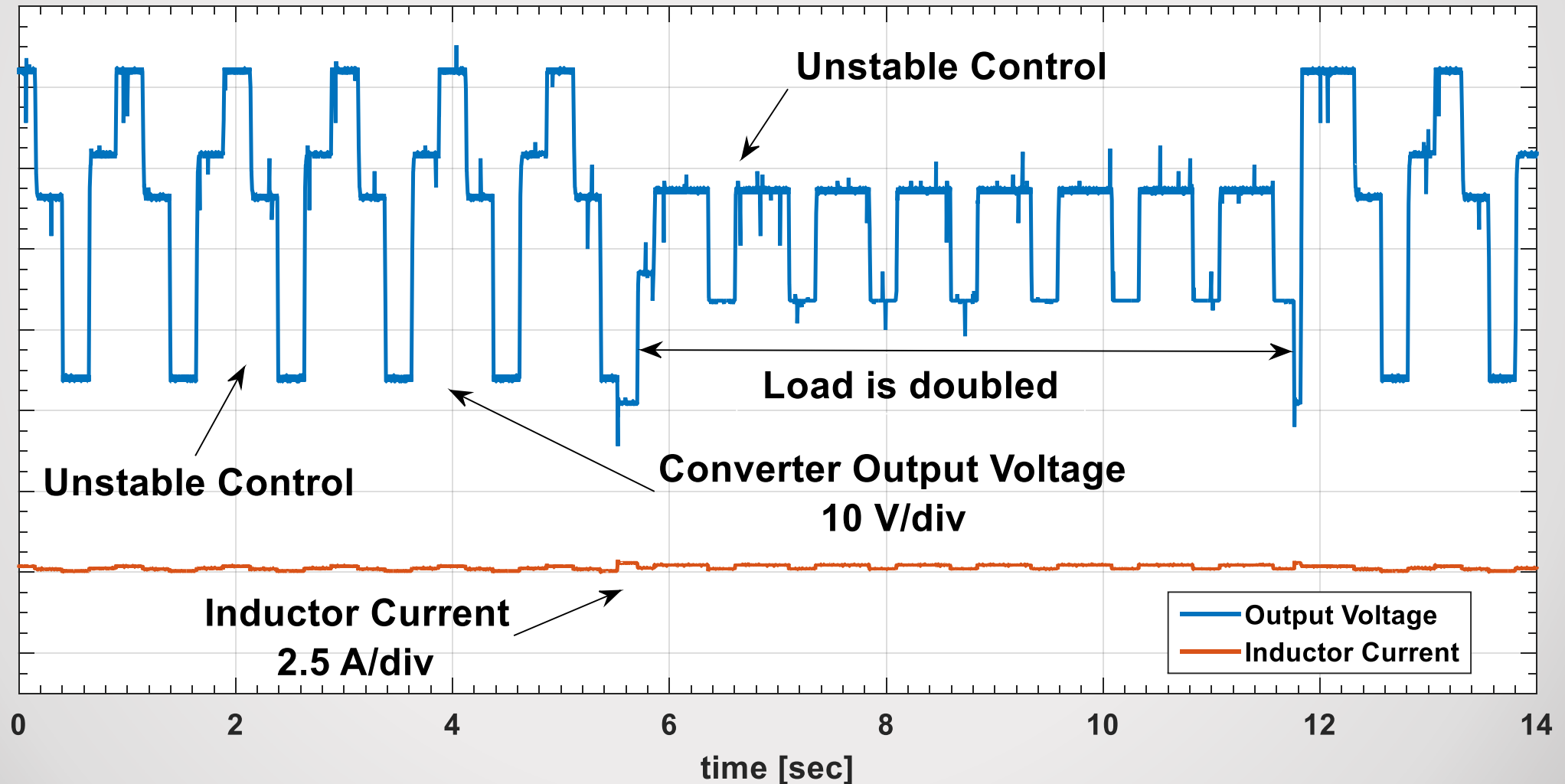
Λειτουργία ανύψωσης τάσης
...

Φαινόμενο υποαρμονικών ταλαντώσεων



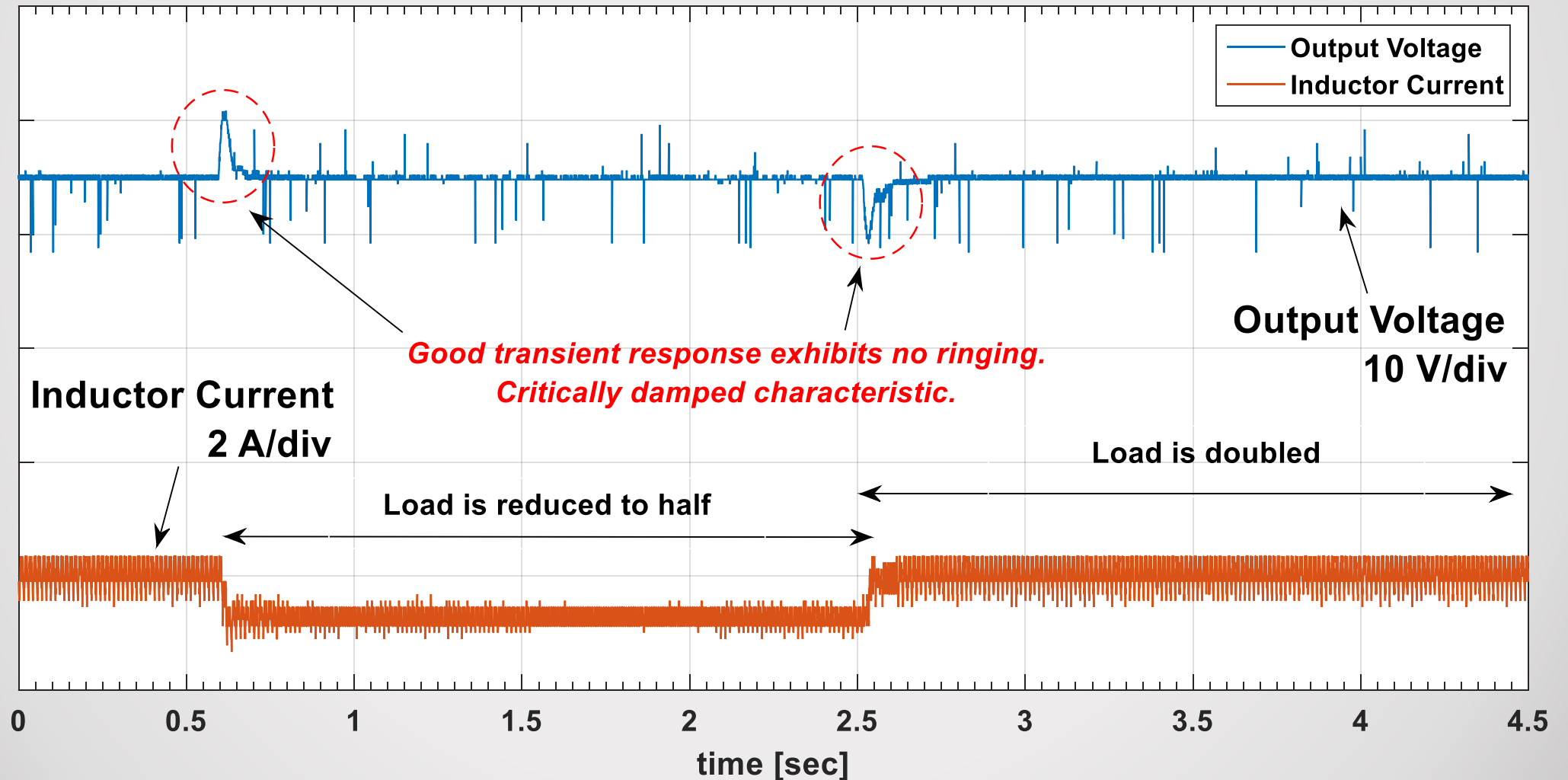
Ελεγκτής PI, μεταβολή στο φορτίο

PI Compensator



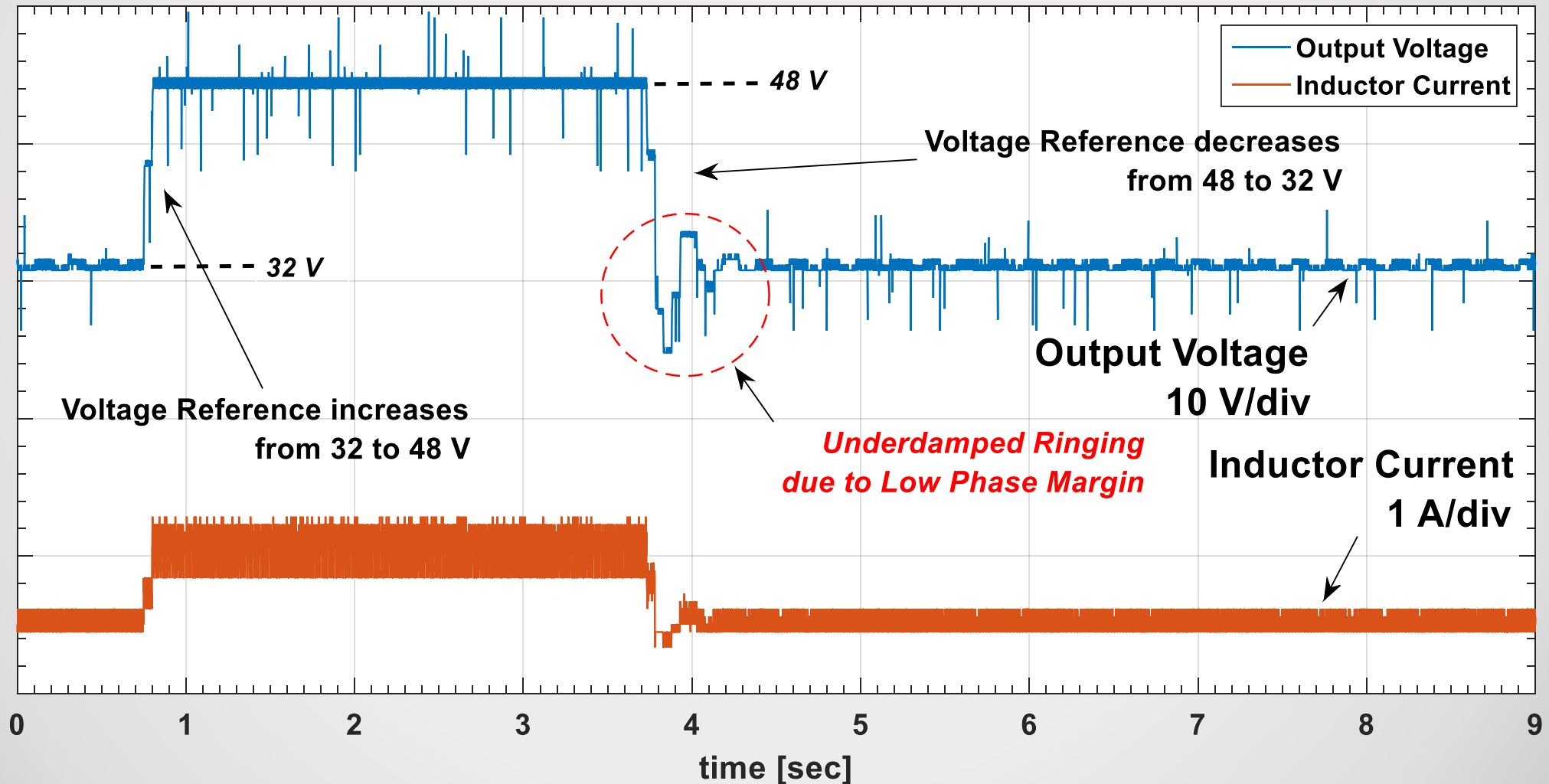
Τύπου II Αντισταθμιστής, μεταβολή στο φορτίο

Type II Compensator



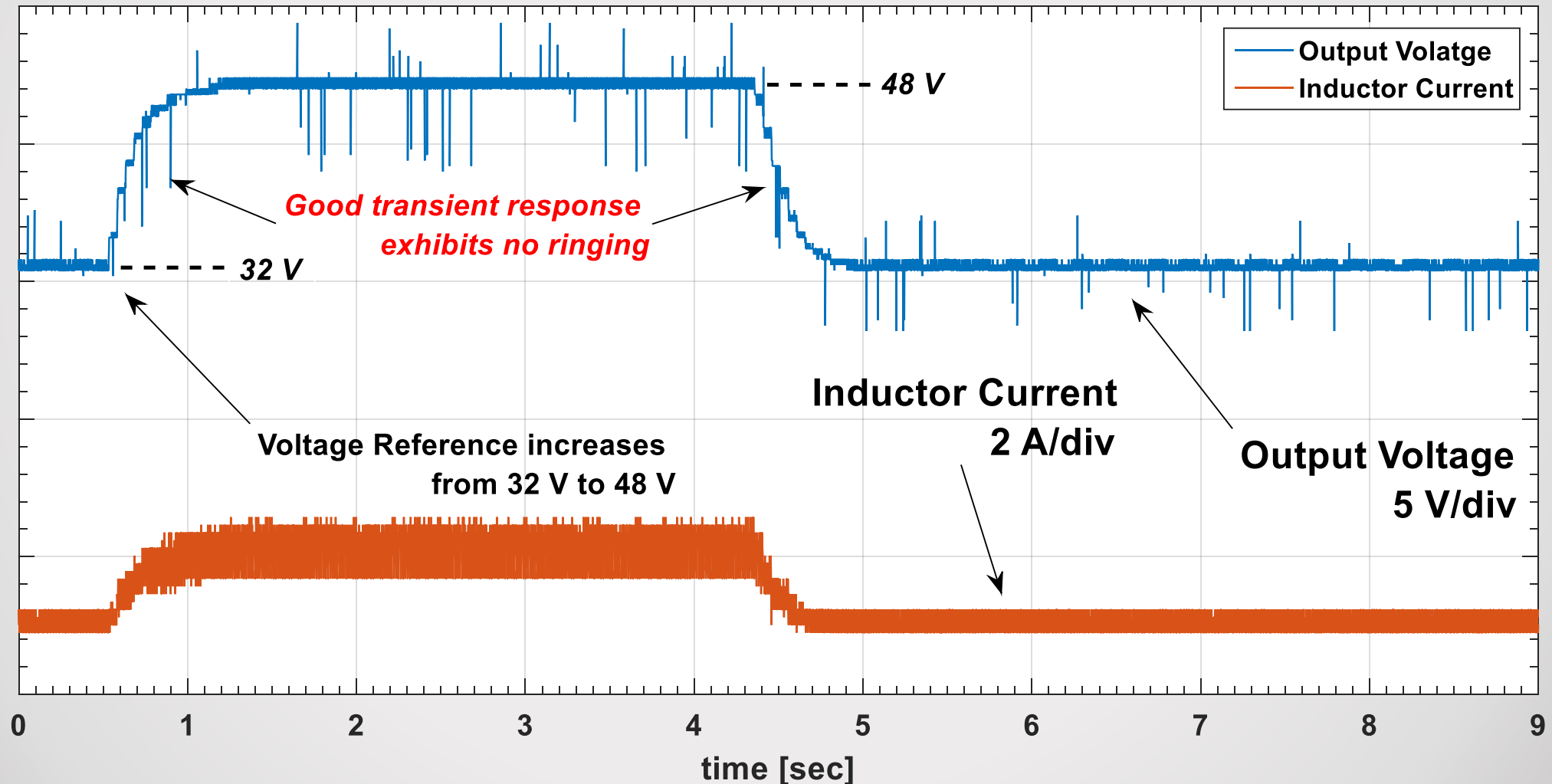
Ελεγκτής PI, μεταβολή στην τάση αναφοράς

PI Compensator



Τύπου II Αντισταθμιστής, μεταβολή στην τάση αναφοράς

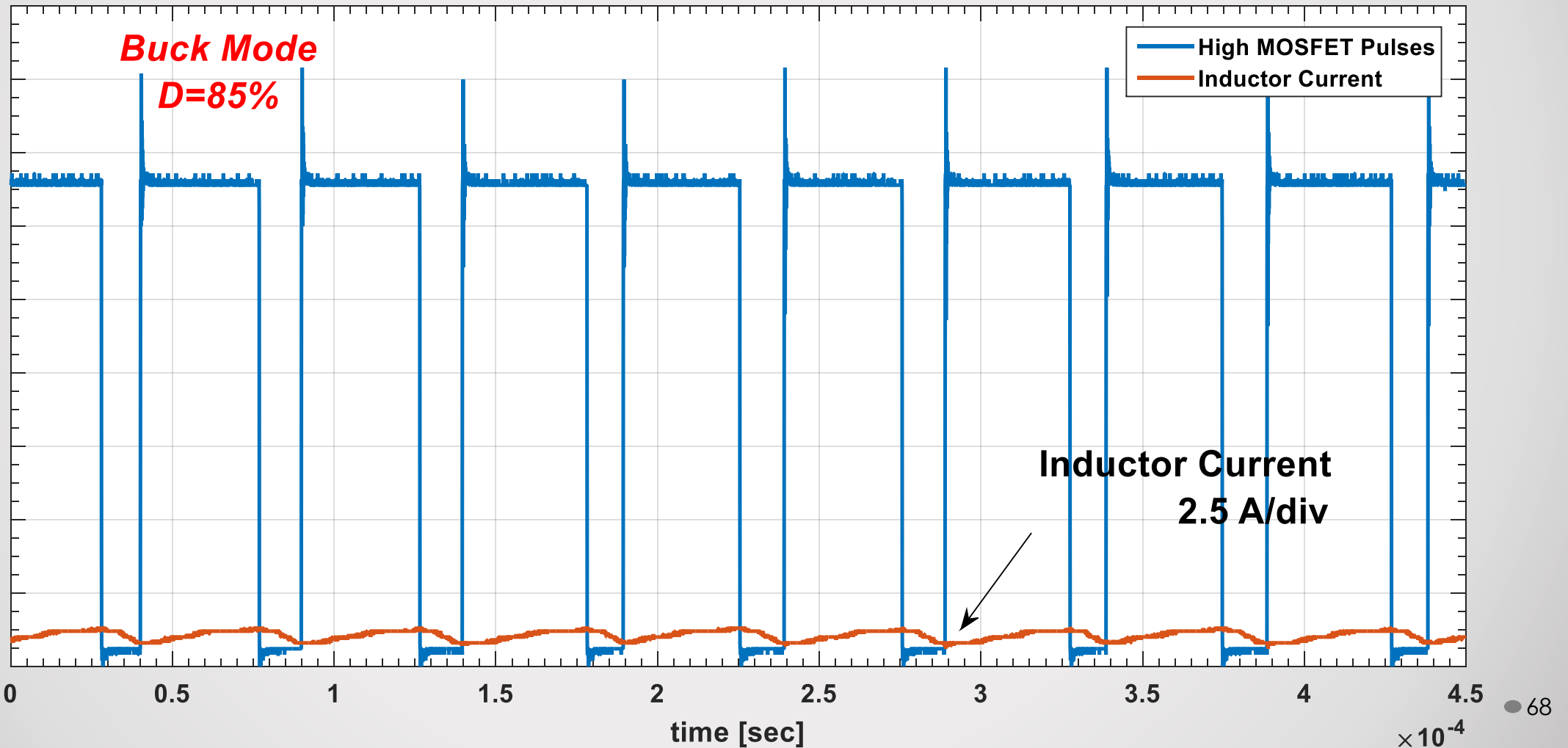
Type II Compensator



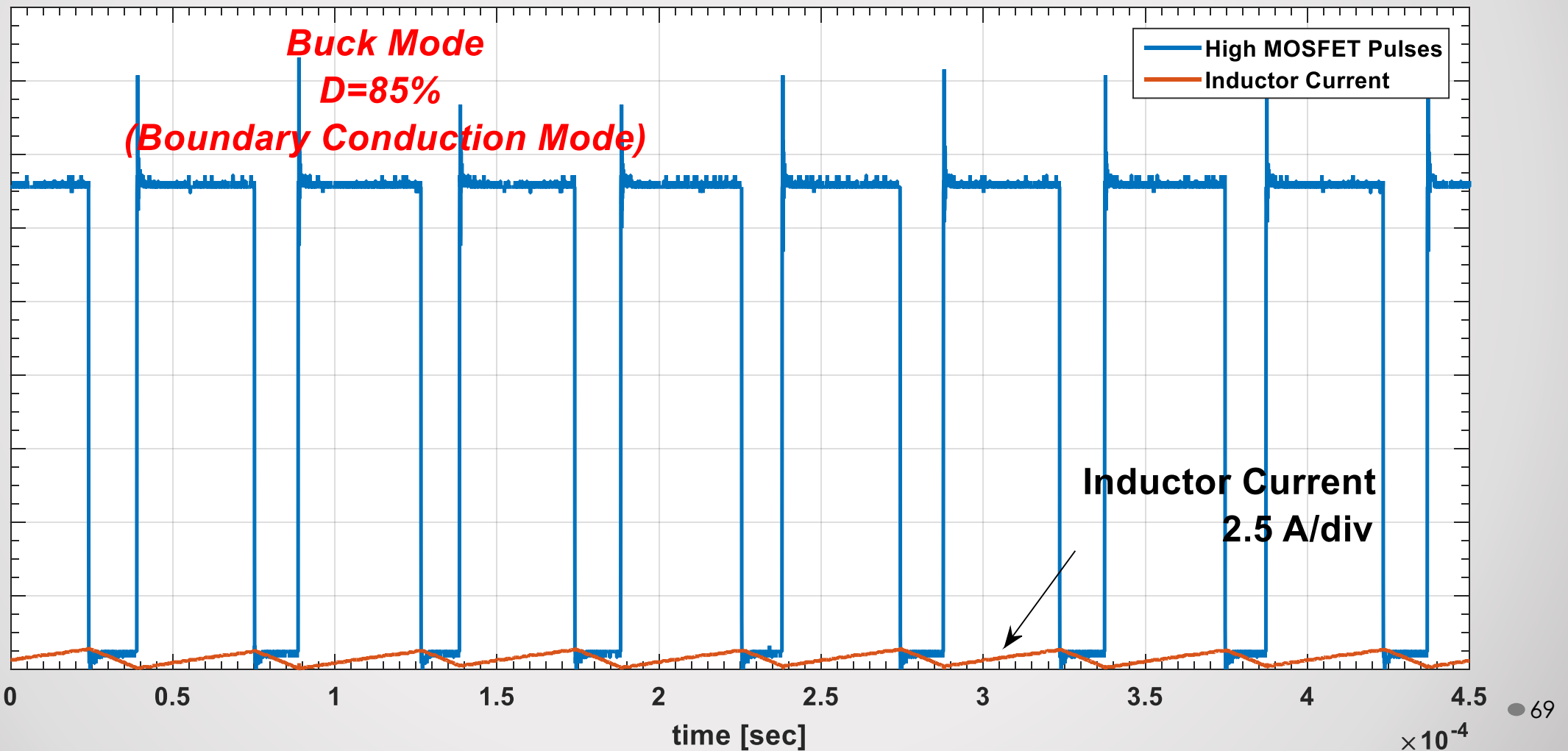
Λειτουργία ανάκτησης ενέργειας

...

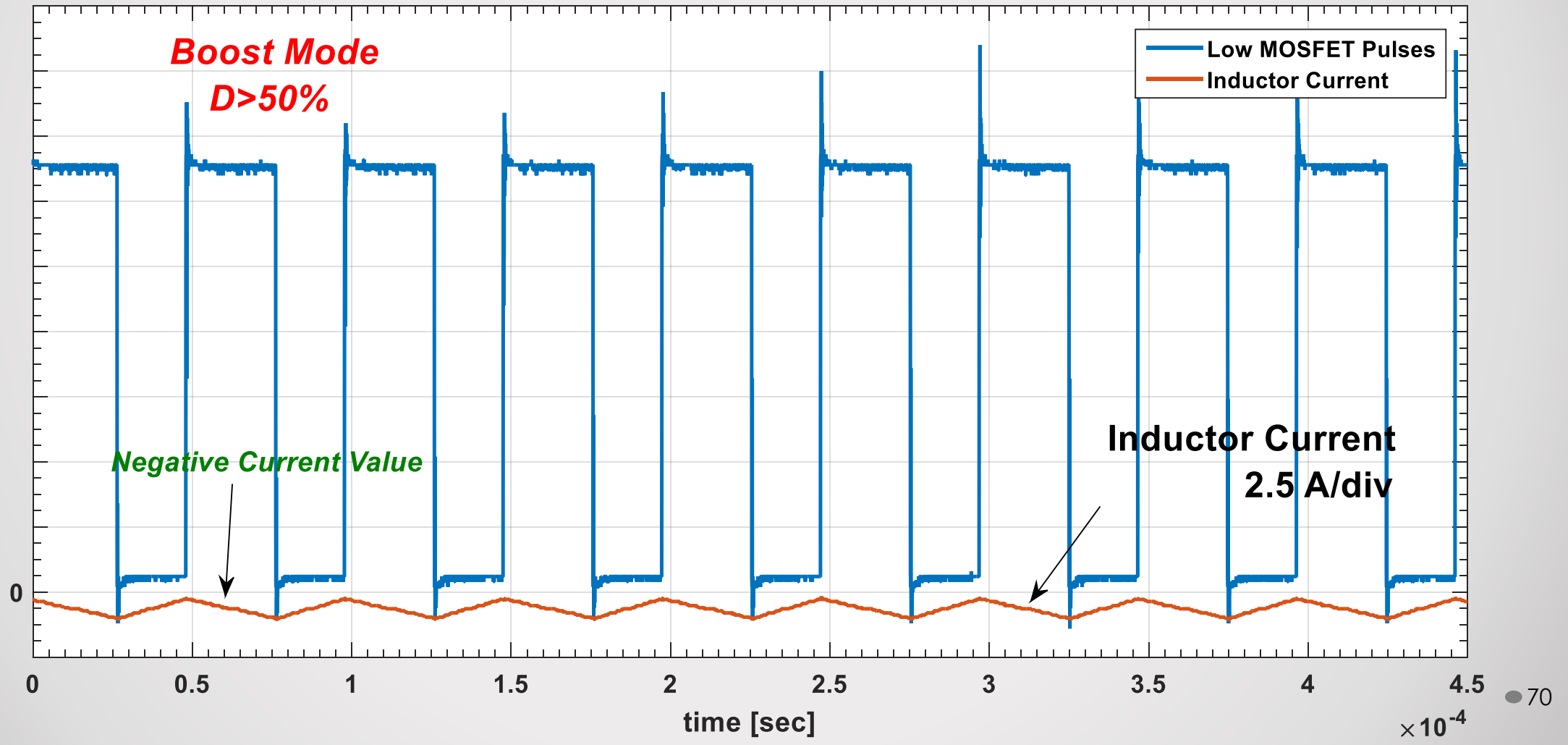
Λειτουργία υποβιβασμού τάσης, φόρτιση υπερπυκνωτών



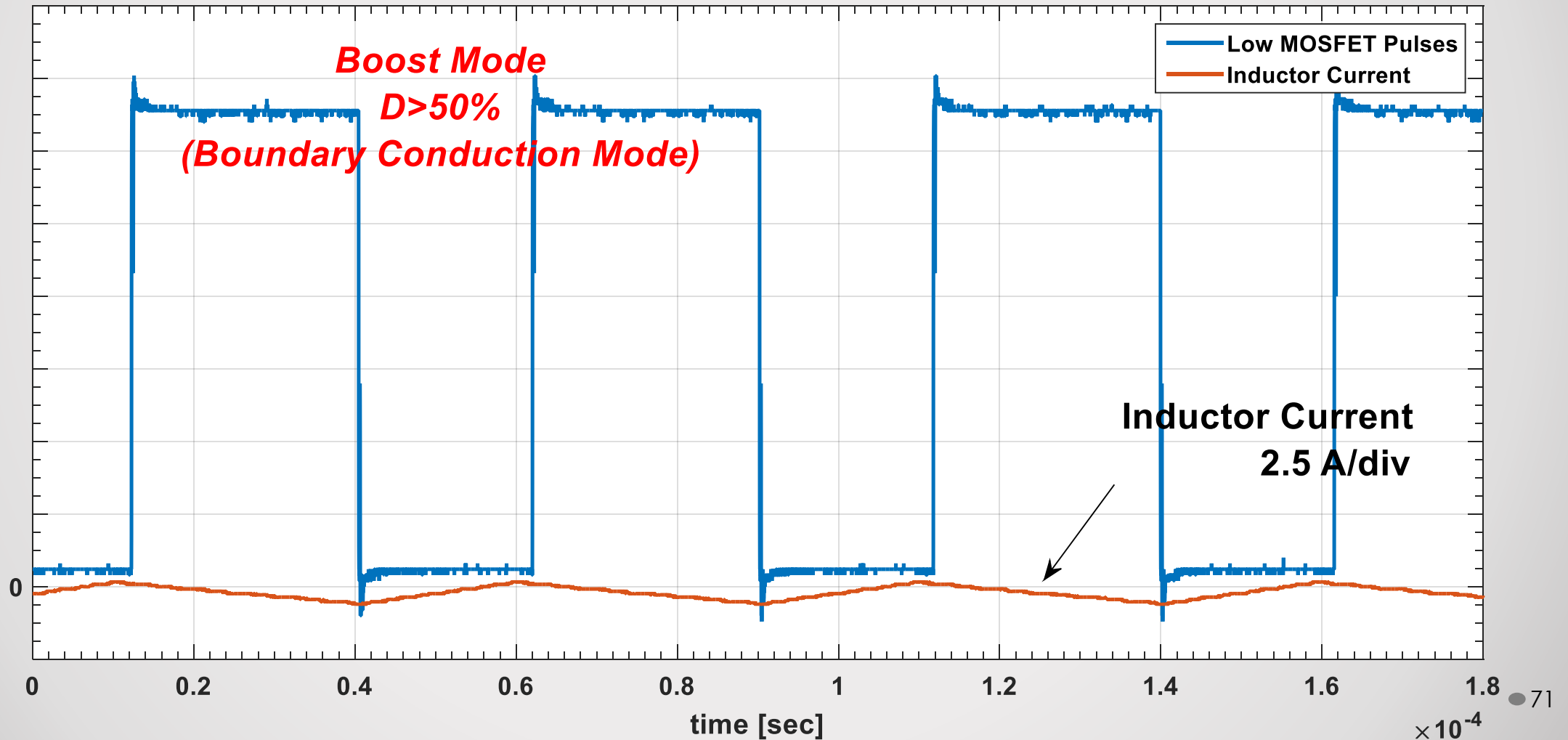
Λειτουργία υποβιβασμού τάσης, οριακή αγωγή



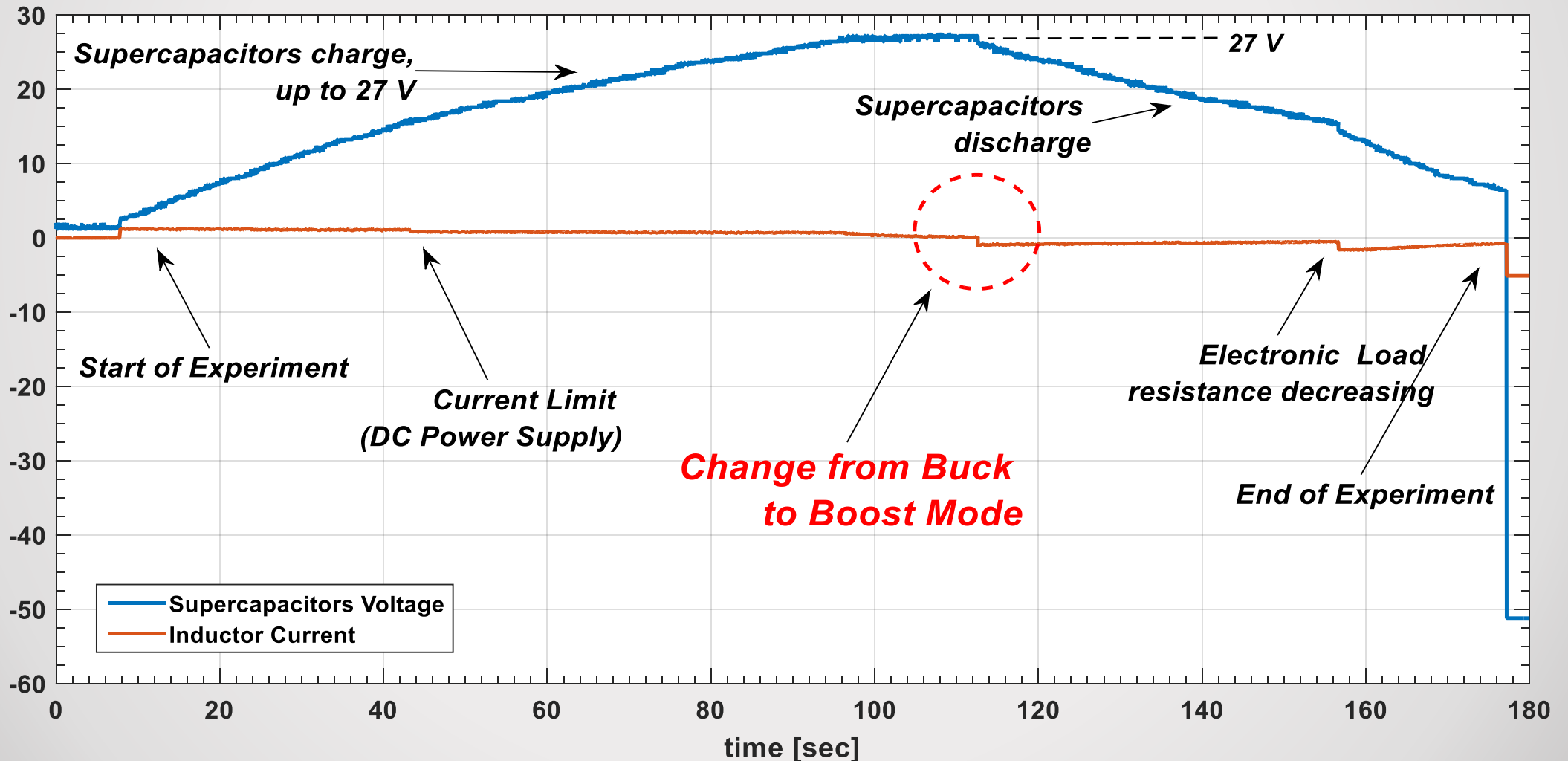
Λειτουργία ανύψωσης τάσης, εκφόρτιση υπερπυκνωτών



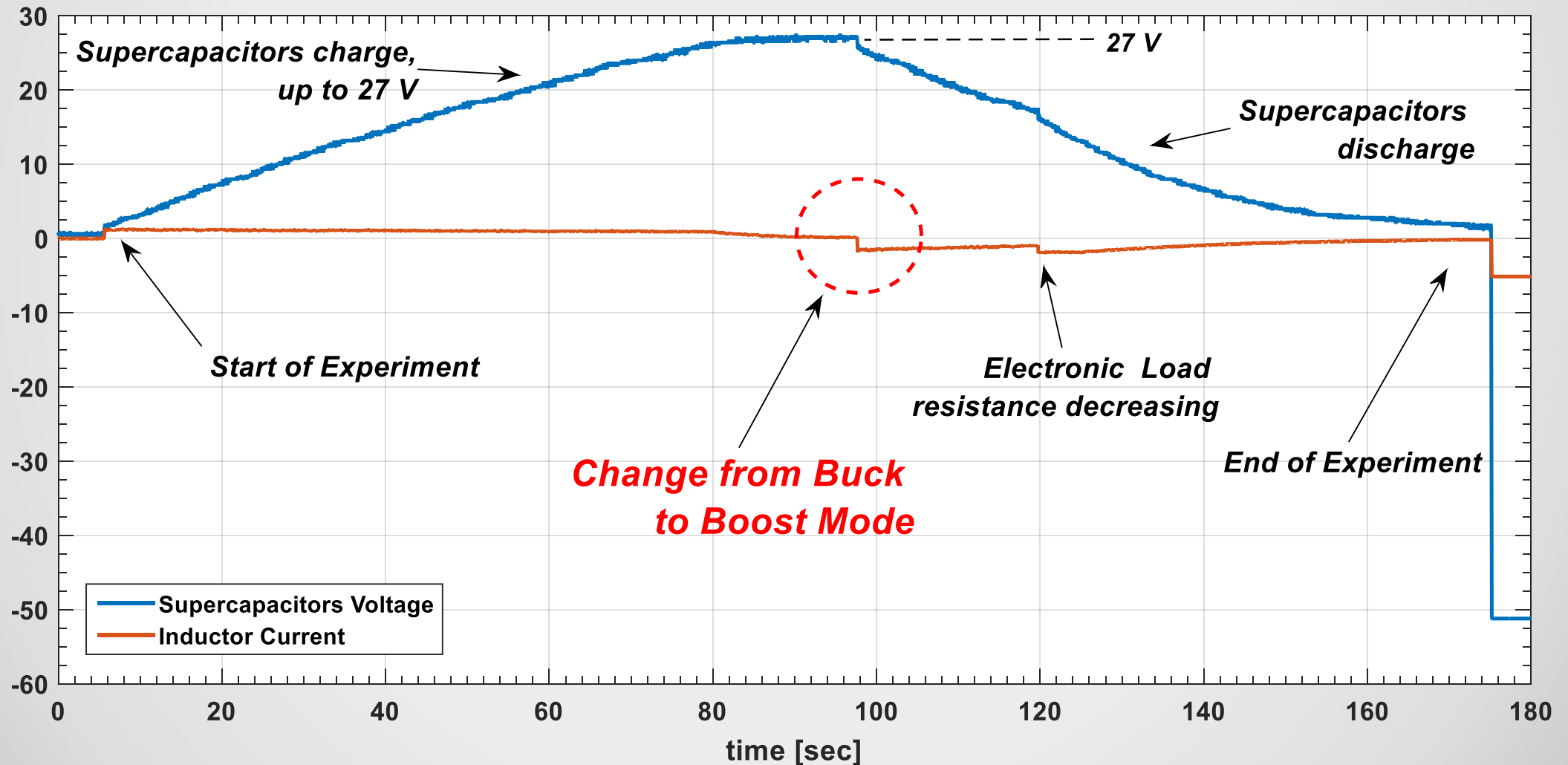
Λειτουργία ανύψωσης τάσης, οριακή αγωγή



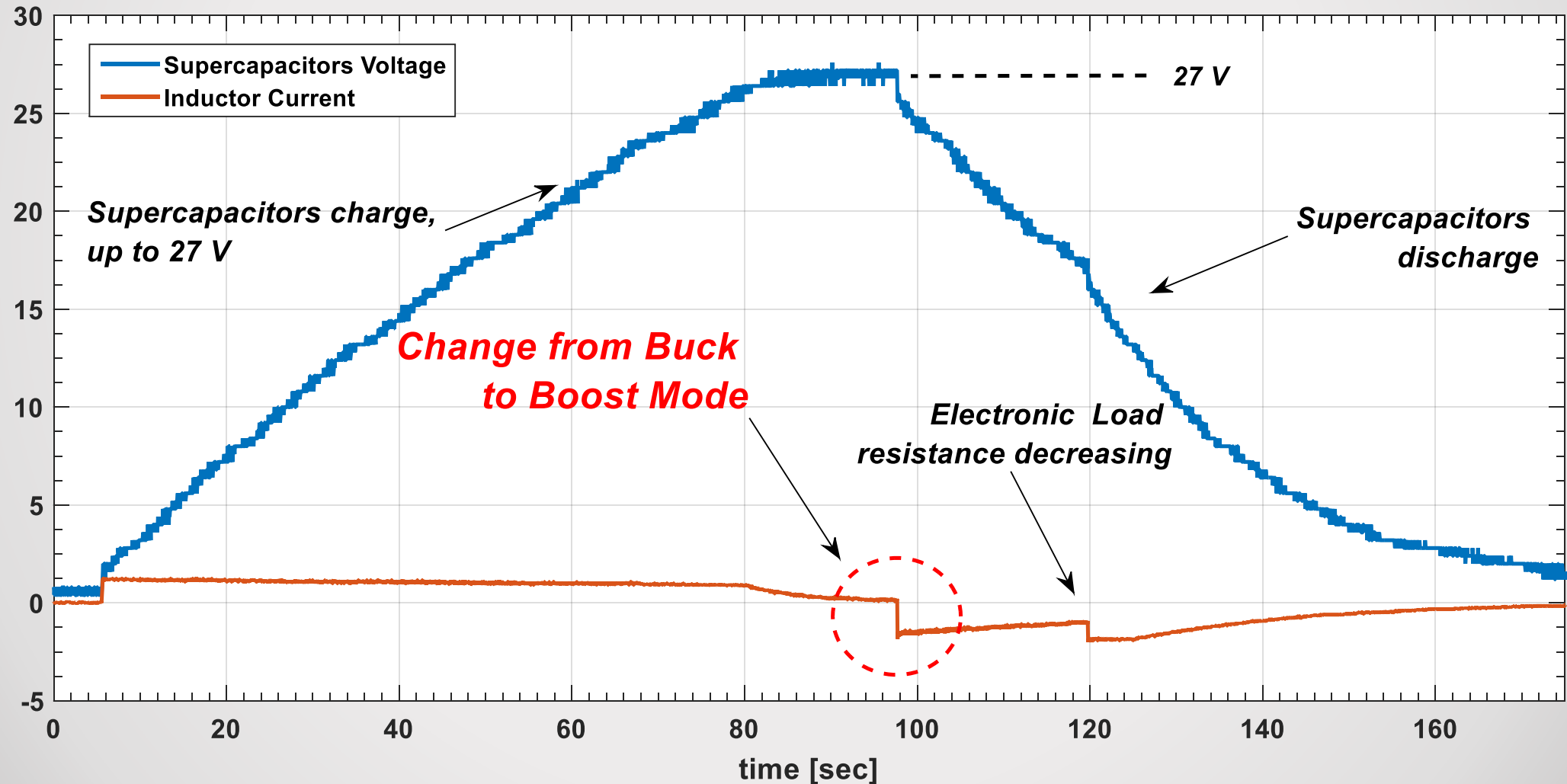
Φόρτιση και εκφόρτιση ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ (1)



Φόρτιση και εκφόρτιση ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ (2)



Φόρτιση και εκφόρτιση ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ (3)



Συμπεράσματα

- *Εξάλειψη του φαινομένου των υποαρμονικών ταλαντώσεων ($D > 50\%$), με τη χρήση ράμπας αντιστάθμισης.*
- *Βελτίωση της συμπεριφοράς του βρόχου ανάδρασης, με τη χρήση του τύπου II αντισταθμιστή, σε σύγκριση με τον ελεγκτή PI. Με κατάλληλη ρύθμιση των συντελεστών του αντισταθμιστή επιτυγχάνεται επαρκές περιθώριο φάσης και κέρδους, ώστε να έχουμε ευσταθή έλεγχο, χωρίς ταλαντώσεις στην τάση εξόδου κατά την εμφάνιση απότομων μεταβολών.*

Σας ευχαριστώ !