

Μετατροπέας Συντονισμού Παράλληλης Τοπολογίας (PLR)

Ανάλυση, Προσομοίωση και Σχεδιασμός

Ταρνάρας Γεώργιος, Πανταζής Νικόλαος, Σκαντζής Κωνσταντίνος

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Πατρών

7 Ιανουαρίου 2026

Στόχοι

- Ανάλυση μετατροπέα PLR DC/DC ($V_{in} = 200V, \omega_o = 100Krad/s$).
- Προσομοίωση σε τρεις καταστάσεις λειτουργίας (f_s vs f_0).
- Σχεδιασμός για έξοδο 24V με φορτίο 10Ω.
- Επιλογή πραγματικών στοιχείων και κοστολόγηση.

Δομή - Πλεονεκτήματα

- Βασικό στοιχείο ένα κύκλωμα συντονισμού LC
- Ο έλεγχος γίνεται αλλάζοντας τη συχνότητα f_s και όχι το δ
- Ομαλή μετάβαση (soft switching) των διακοπών
- Πολύ καλύτερη απόκριση EMI και μειωμένες απώλειες
- Βρίσκουν εφαρμογή σε data centers, ηλ. οχήματα, ιατρικές συσκευές κτλ.

Μαθηματική Περιγραφή

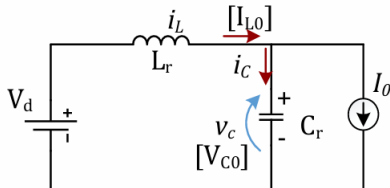
Διαφορική Εξίσωση:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \omega_0^2 i_L = \omega_0^2 I_o$$

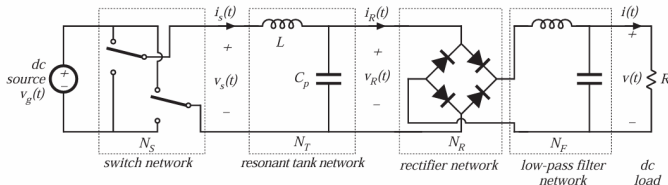
Λύσεις ΔΕ ($t \geq t_0$):

$$i_L(t) = I_o + (I_{L0} - I_o) \cos[\omega_0(t - t_0)] + \frac{V_d - V_{c0}}{Z_0} \sin[\omega_0(t - t_0)]$$

$$v_c(t) = V_d - (V_d - V_{c0}) \cos[\omega_0(t - t_0)] + Z_0(I_{L0} - I_o) \sin[\omega_0(t - t_0)]$$



Οι διακόπτες ενός resonant converter εκμεταλλεύονται τη ταλαντούμενη τάση και ρεύμα για να πετύχουν ZCS/ZVS.



- **Κύκλωμα διακοπτικών στοιχείων**

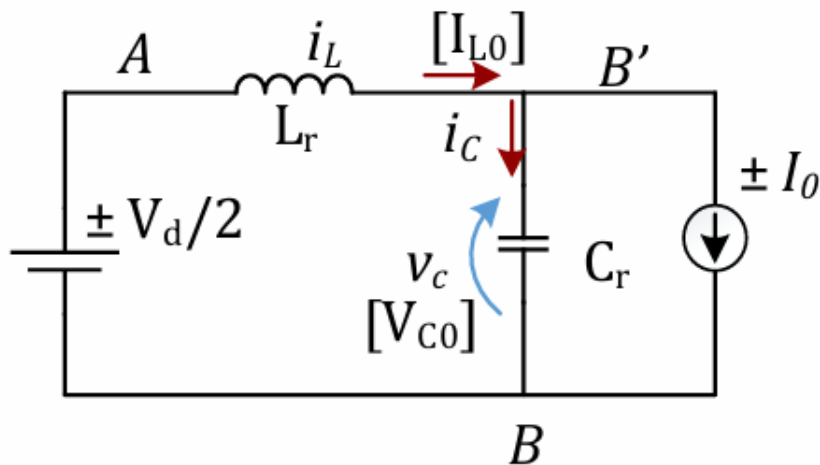
Μετατρέπει τη dc τάση σε ac παλμούς και συνήθως υλοποιείται με μία ημιγέφυρα.

- **Κύκλωμα LC**

Το κύκλωμα συντονισμού δημιουργεί τη ταλάντωση. Καθορίζει τη σύνθετη αντίσταση και τη ροή ενέργειας.

- **Ανόρθωση και Φίλτρο εξόδου**

Η τάση ανορθώνεται και περνά από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο για να τροφοδοτήσει το φορτίο με καθαρή dc.



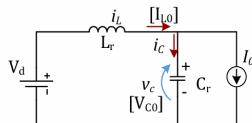
Επίδραση Βασικών Παραμέτρων

1. Συχνότητα Μετατροπείας f_s :

- Επηρεάζει την σύνθετη αντίσταση του L_r και C_r .
- Ρυθμίζοντας την f_s μεταβάλλουμε την τάση εξόδου.

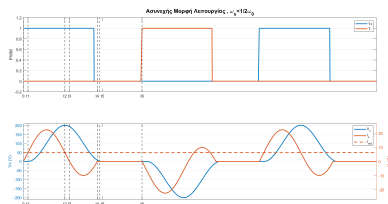
2. Συντελεστής Ποιότητας ($Q = R/\omega_0 L_r$):

- Εξαρτάται από το φορτίο.
- **Υψηλό Q:** Μεγάλη ανύψωση τάσης κοντά στον συντονισμό, αλλά και μεγάλα ρεύματα.
- **Χαμηλό Q:** Πιο επίπεδη καμπύλη κέρδους.

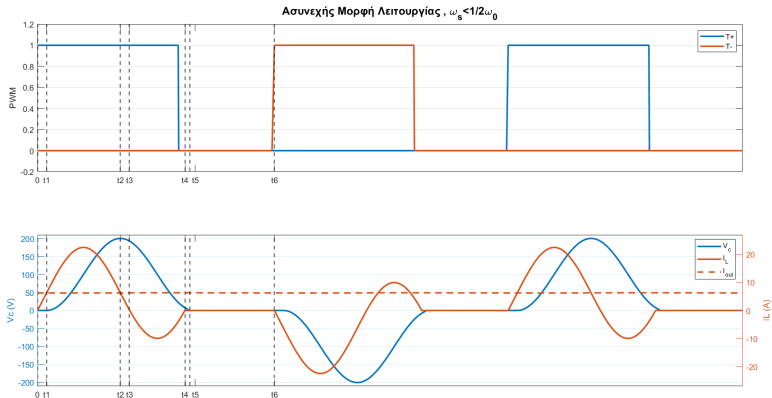


Περιοχή 1: $\omega_s < \omega_0/2$ (DCM)

- **Συχνότητα:** $\omega_s = 31.4$ krad/s ($f_s = 5$ kHz).
- **Λειτουργία:** Ασυνεχής Αγωγή (DCM).
- **Έξοδος:** ≈ 62.7 V (Buck mode).
- **Χαρακτηριστικά:**
 - Το ρεύμα και η τάση μηδενίζονται πριν τον επόμενο παλμό.
 - Υψηλά peak των ρευμάτων.
 - $\delta < 0.5$



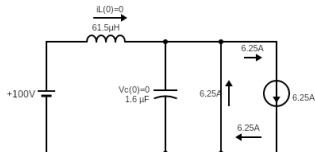
Περιοχή 1: $\omega_s < \omega_0/2$ (DCM)



Ισοδύναμα Κυκλώματα: DCM

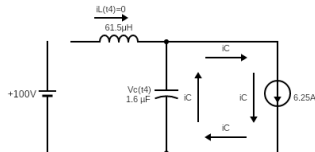
1. $0 - t_1$: ($I_L < I_0$, $V_C = 0$)

Πηνίο φορτίζεται γραμμικά

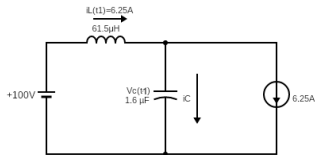


3. $t_4 - t_6$: ($I_L = 0$)

Πυκνωτής εκφορτίζεται γραμμικά

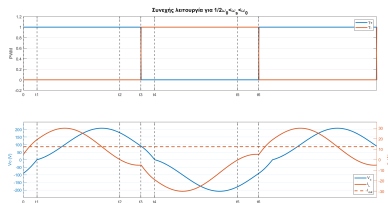


2. $t_1 - t_4$: LC

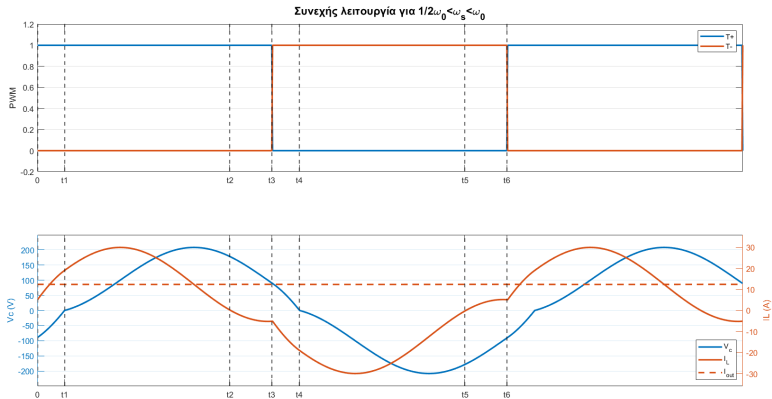


Περιοχή 2: $\omega_0/2 < \omega_s < \omega_0$

- **Συχνότητα:** $\omega_s = 62.8 \text{ krad/s}$ ($f_s = 10 \text{ kHz}$).
- **Λειτουργία:** Συνεχής Αγωγή κοντά στον συντονισμό.
- **Έξοδος:** $\approx 123.7 \text{ V}$ (Boost mode).
- **Χαρακτηριστικά:**
 - Ανύψωση τάσης λόγω του φαινομένου συντονισμού.
 - Ομαλή μετάβαση σε αγωγή των διόδων και αποκοπή των τρανζίστορ.

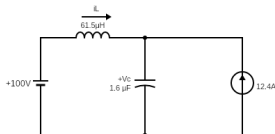


Περιοχή 2: $\omega_0/2 < \omega_s < \omega_0$

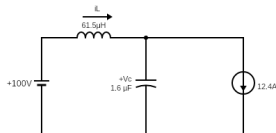


Ισοδύναμα Κυκλώματα: CCM ($\omega_s < \omega_0$)

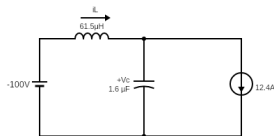
1. $0 - t_1$: Φόρτιση V_c με ρεύμα $I_L + I_o(T^+ \text{ ON})$



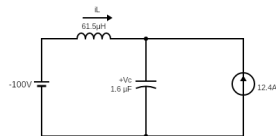
2. $t_1 - t_2$: ($T^+ \text{ ON}$) $t_2 - t_3$: ($D^+ \text{ ON}$)



3. $t_3 - t_4$: ($T^- \text{ ON}$)



4. $t_4 - t_5$: ($T^- \text{ ON}$) $t_5 - t_6$: ($D^- \text{ ON}$)



Περιοχή 3: $\omega_s > \omega_0$

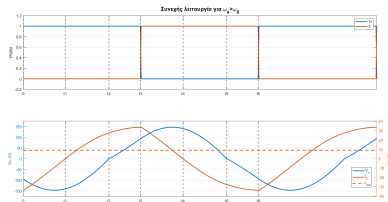
- **Συχνότητα:**

$$\omega_s = 125.6 \text{ krad/s}$$
$$(f_s = 20 \text{ kHz}).$$

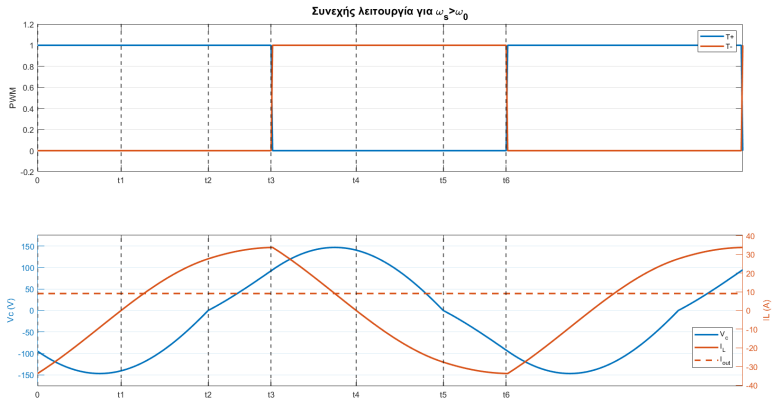
- **Έξοδος:** $\approx 90.7 \text{ V}$.

- **Πλεονεκτήματα :**

- Ομαλή μετάβαση σε αποκοπή των διόδων και σε αγωγή των τρανζίστορ
- Απαιτεί μικρότερα παθητικά στοιχεία φίλτρου.

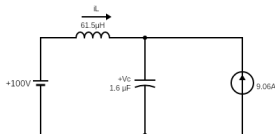


Περιοχή 3: $\omega_s > \omega_0$

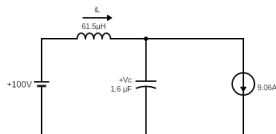


Ισοδύναμα Κυκλώματα: CCM ($\omega_s > \omega_0$)

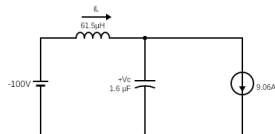
1. $0 - t_2$: Αγωγή D^+ και μετά T^+



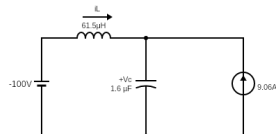
2. $t_2 - t_3$: (T^+ ON) Θετική Φόρτιση



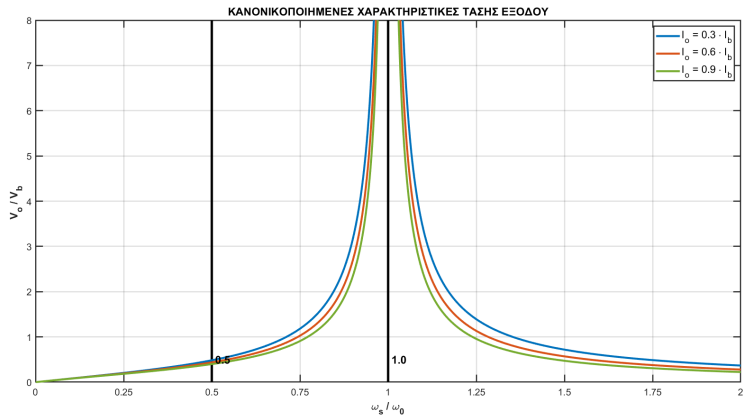
3. $t_3 - t_5$: Αρνητικός Κύκλος ($D^- \rightarrow T^-$)



4. $t_5 - t_6$: (T^- ON) Αρνητική Φόρτιση



Καμπύλη Κέρδους



Επιλογή Περιοχής: $\omega_s > \omega_0$

- Μηδενικές απώλειες έναυσης
- Υψηλή συχνότητα και άρα μικρότερο φίλτρο
- Χαμηλότερες RMS τιμές από DCM για ίδια ισχύ

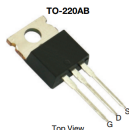
Προδιαγραφές Σχεδίασης ($\omega_0 = 100\text{Krad/s}$):

- **Είσοδος:** 200V ($V_d/2=100\text{V}$)
- **Στόχος Εξόδου:** 24V (π.χ. για φόρτιση μπαταρίας)
- **Επιλογή Q:** $Q = 1/\sqrt{2} \Rightarrow L_r = 175\mu\text{H}, C_r = 570\text{nF}$
- Χαμηλότερο Q μειώνει τα ρεύματα κυκλοφορίας (circulating currents).

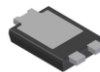
Αρχικά αποτελέσματα προσομοίωσης ($f_s = 26420\text{Hz}$)

Component	V_{Peak} [V]	I_{Peak} [A]	I_{RMS} [A]	I_{Avg} [A]
Transistor S1	200.00	6.24	2.67	0.37
Diode D1	42.69	2.46	1.70	1.20
Inductor Lr	143.21	6.24	3.78	0.00
Capacitor Cr	43.21	5.75	2.96	0.00
Inductor Lf	25.03	2.46	2.40	2.40
Capacitor Cf	23.99	0.06	0.04	0.00

Στοιχείο	Κωδικός / Τύπος	Χαρακτηριστικά
MOSFET	Vishay SUP90142E	200V, 90A $R_{DS(on)} = 15.2m\Omega$
Δίοδοι	Diodes Inc. SBR15U50	50V, 15A (Schottky) $V_F = 0.52V$



Top View



Bottom View

Κύκλωμα Συντονισμού:

- Πηνίο (L_r): Coilcraft 180 μH (High Saturation Current $> 8A$).
- Πυκνωτής (C_r): TDK Film Caps (≈ 570 nF total)

Φίλτρο Εξόδου:

- L_f : KEMET 1mH (SC-03-10GJ).
- C_f : Taiyo Yuden 100 μF (Low ESR για μείωση κυμάτωσης).
- $f_c \approx 500Hz$ $\Delta V_{out} \approx 3mV$

Παθητικά Στοιχεία (Φωτογραφίες)

Κύκλωμα Συντονισμού (L_r , C_r)



Coilcraft 180μH



TDK Film Caps (x2)

Φίλτρο Εξόδου (L_f , C_f)



KEMET 1mH



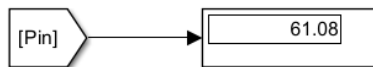
Taiyo Yuden 100μF

Απόδοση

Με συνυπολογισμό των παρασιτικών στοιχείων και απωλειών αγωγής, η απόδοση είναι **94.2%**.

Οικονομικά Στοιχεία:

- Συνολικό Κόστος: $\approx 26.23 \text{ €}$



Θερμική Διαχείριση:

- MOSFET: Δεν απαιτείται ψύκτρα ($T_{rise} < 8^{\circ} \text{C}$).
- Δίοδοι: Απαιτείται ψύκτρα ($P_{diss} \approx 2.5 \text{ W}$).

