

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 10^ο – Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση

(Επιλογές θεωρίας από τις «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος»
του Δρ.-Μηχ. Νικολάου Π. Πολύζου, Επίκουρου Καθηγητή, έτος 2008)

11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λέγοντας **Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση** (*Μετατροπείς Σ.Τ.-Σ.Τ. - DC-DC Converters*) εννοούμε κάποιες διατάξεις οι οποίες περιέχουν πάντα έναν τουλάχιστον ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη και μετατρέπουν τη συνεχή τάση εισόδου τους σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής και ενίοτε και πολικότητας στην έξοδό τους. Αυτοί οι μετατροπείς συνήθως αποκαλούνται και με τον όρο *τροφοδοτικά*, αφού η πιο συνήθης εφαρμογή τους είναι στην τροφοδοσία αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων. Άλλες εφαρμογές αυτών των μετατροπέων είναι στη φόρτιση συσσωρευτών, στον έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος, στα συστήματα διόρθωσης του συντελεστή ισχύος κ.α..

Οι τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί, μέχρι σήμερα, για την κατασκευή και τον έλεγχο των τροφοδοτικών ισχύος, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

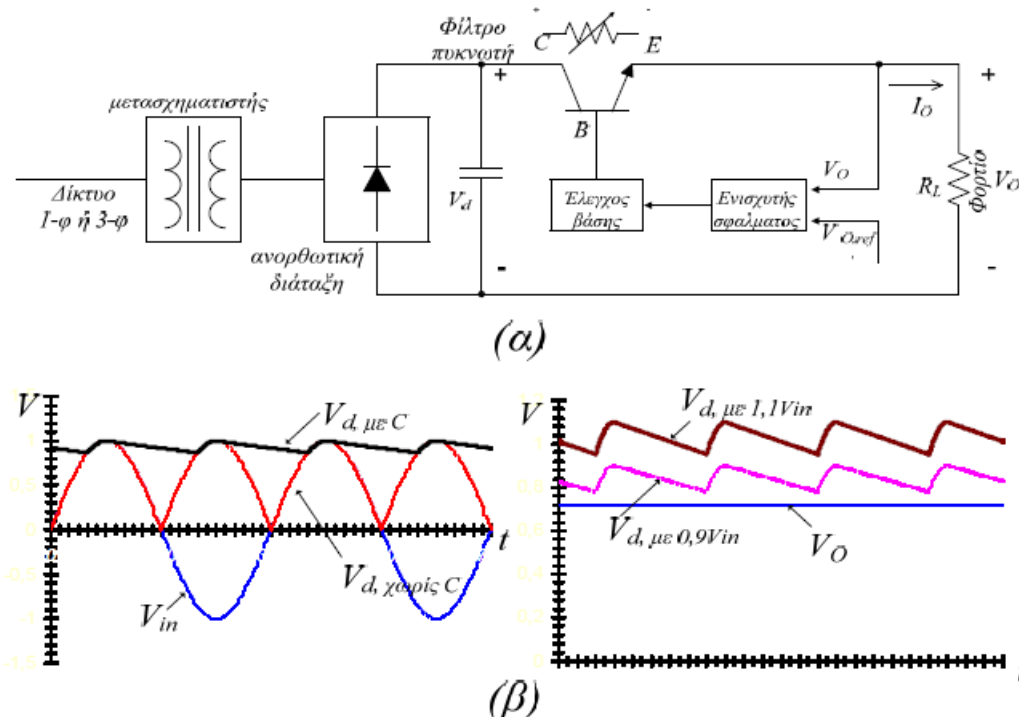
- 1) Στην τεχνική των γραμμικών τροφοδοτικών. Η τεχνική αυτή συνίσταται στο ότι το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα λειτουργεί στην ενεργό (δηλαδή, στη γραμμική) περιοχή, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται σαν ρυθμιζόμενη αντίσταση και η πτώση τάσεως που εμφανίζει στα άκρα του καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.
- 2) Στην τεχνική των διακοπτικών τροφοδοτικών. Η τεχνική των διακοπτικών τροφοδοτικών συνίσταται στο ότι το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα λειτουργεί ως διακόπτης, δηλαδή λειτουργεί είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής, και το ποσοστό του χρόνου αγωγής του στη διάρκεια μιας περιόδου λειτουργίας καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

Οι απαιτήσεις των τροφοδοτικών που χρησιμοποιούνται σήμερα, στα περισσότερα αναλογικά και ψηφιακά συστήματα, είναι η σταθεροποιημένη συνεχή τάση εξόδου, η γαλβανική απομόνωση, καθώς και η δυνατότητα πολλαπλών ανεξάρτητων εξόδων. Εκτός από τις παραπάνω απαιτήσεις, κοινή επιδίωξη σήμερα σ' αυτά τα κυκλώματα είναι η μείωση του όγκου και του βάρους τους, καθώς και η αύξηση της απόδοσής τους και επομένως της πυκνότητας ισχύος. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν τα γραμμικά τροφοδοτικά. Η εξέλιξη όμως, της τεχνολογίας των ημιαγωγών και ουσιαστικά η εμφάνιση των MOSFET ισχύος (στις αρχές της δεκαετίας του '80), είναι οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν στην ευρεία χρήση των διακοπτικών τροφοδοτικών, που παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα γραμμικά τροφοδοτικά. Σημειώνουμε ότι, στη παγκόσμια αγορά των τροφοδοτικών τα παλμοτροφοδοτικά (δηλαδή, τα διακοπτικά τροφοδοτικά) κατέχουν το 70-80% της αγοράς. Στη συνέχεια αυτής της ενότητας, θα αναλύσουμε τη λειτουργία των δύο βασικών κατηγοριών των

τροφοδοτικών ισχύος και θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μιας.

11.2 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε καλύτερα τα πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών θα πρέπει να εξετάσουμε πρώτα τα γραμμικά τροφοδοτικά, που χρησιμοποιούνταν κατά κόρο στο παρελθόν. Στο σχήμα 11.1 φαίνεται το γενικό κυκλωματικό διάγραμμα ενός γραμμικού τροφοδοτικού καθώς και οι κυματομορφές των τάσεων στα άκρα του πυκνωτή εισόδου (λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση της τάσης του δικτύου) καθώς και στη έξοδο του τροφοδοτικού.



Σχήμα 11.1 : α) Γενικό κυκλωματικό διάγραμμα ενός γραμμικού τροφοδοτικού και β) Βασικές κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός γραμμικού τροφοδοτικού.

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται φανερό πως για την επίτευξη ηλεκτρικής απομόνωσης μεταξύ εισόδου και εξόδου χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής (κατάλληλου λόγου σπειρών και ισχύος), που παρεμβάλλεται μεταξύ του δικτύου (50Hz) και της ανορθωτικής διάταξης. Αυτοί οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο μέγεθος, βάρος και κόστος συγκρινόμενοι με τους μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων. Στη συνέχεια, η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ανορθώνεται με τη χρήση μιας γέφυρας πλήρους ανόρθωσης με διόδους και με τη χρήση ενός, μεγάλης τιμής, πυκνωτή εξομαλύνεται. Κατόπιν, συνδέεται σε σειρά ένα διπολικό τρανζίστορ, το οποίο λειτουργεί πάντα στη γραμμική περιοχή. Συγκρίνοντας την τάση εξόδου (V_O) με την επιθυμητή τάση εξόδου ($V_{O,ref}$) δημιουργείται ένα σφάλμα που καθορίζει το ρεύμα βάσης του ημιαγωγικού στοιχείου και άρα και την τελική τιμή της τάσης εξόδου ($V_O = V_d - V_{CE}$). Επομένως, γίνεται αντιληπτό πως η διαφορά δυναμικού μεταξύ της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου εμφανίζεται στα άκρα του ημιαγωγικού στοιχείου μ' αποτέλεσμα να εμφανίζονται

απώλειες ισχύος που είναι ανάλογες αυτής της διαφοράς δυναμικού. Συνήθως, ο συντελεστής απόδοσης των γραμμικών τροφοδοτικών κυμαίνεται στην περιοχή 30-60%. Επιπλέον, κατά το σχεδιασμό αυτού του τύπου των τροφοδοτικών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διακύμανση της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου ($\pm 10\%$) ενώ θα πρέπει η επιθυμητή τιμή της τάσης εξόδου να είναι πάντα μικρότερη από την ελάχιστη τιμή της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του πυκνωτή εξομάλυνσης. Κύριο πλεονέκτημα αυτών των τροφοδοτικών είναι η απλότητα του κυκλώματος με αποτέλεσμα το κόστος τους για μικρές ισχύεις (*μικρότερες των 25Watt*) να είναι χαμηλό. Ακόμα, επειδή δεν έχουμε διακοπτικά φαινόμενα, δεν εμφανίζονται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στη λειτουργία άλλων συσκευών.

11.3 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

Σε αντίθεση με τα γραμμικά τροφοδοτικά, στα διακοπτικά τροφοδοτικά ο έλεγχος της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται με τη χρήση μετατροπέων Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση (*DC-DC Converters*). Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούν ένα τουλάχιστον ημιαγωγικό διακόπτη, ο οποίος βρίσκεται πάντα είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής. Για τον έλεγχο αυτών των μετατροπέων χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τεχνικές ελέγχου:

- 1) Η τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών (*Δ.Ε.Π. ή Pulse Width Modulation - P.W.M.*).
- 2) Η τεχνική της Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών (*Δ.Σ.Π. ή Pulse Frequency Modulation - P.F.M.*).

Η τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών συνίσταται στο να διατηρούμε σταθερή τη συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων (δηλαδή τη συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα) και να μεταβάλλουμε το χρόνο αγωγής (επομένως και το χρόνο αποκοπής) των ημιαγωγικών στοιχείων. Παρατηρούμε λοιπόν ότι, με διακοπή του ρεύματος ισχύος, εξαιτίας της λειτουργίας του ημιαγωγικού διακόπτη, λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα ένα παλμικό ρεύμα και μία παλμική τάση, η οποία στη συνέχεια εξομαλύνεται με σκοπό να πάρουμε την επιθυμητή τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

Η τεχνική της Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών συνίσταται στο να διατηρούμε σταθερό το χρόνο αγωγής ή αποκοπής του ημιαγωγικού στοιχείου (εξαρτάται από είδος του μετατροπέα, ποιος από τους δύο χρόνους θα πρέπει να παραμένει σταθερός) και να μεταβάλλουμε τον χρόνο αποκοπής ή αγωγής (ανάλογα), άρα και τη συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα για να πάρουμε την επιθυμητή έξοδο.

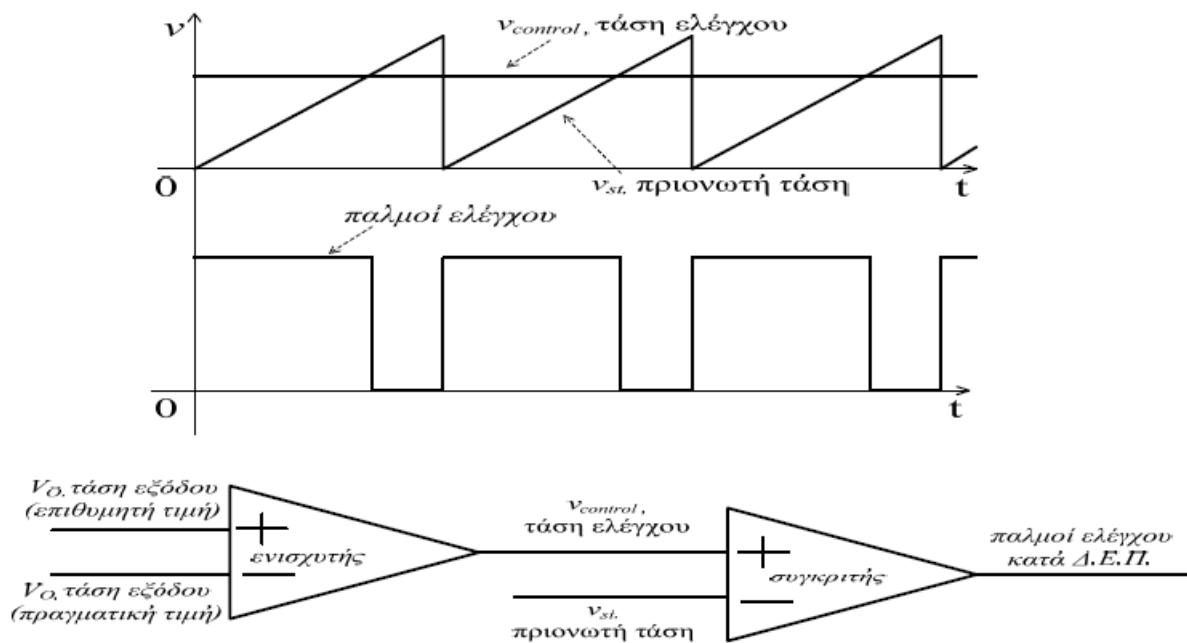
Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν παρουσιασθεί διάφορες τοπολογίες μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ.. Ένας διαχωρισμός των τοπολογιών αυτών μπορεί να γίνει με κριτήριο αν υπάρχει ή όχι γαλβανική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Οι βασικότερες τοπολογίες διακοπτικών μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ. χωρίς γαλβανική απομόνωση, είναι: ο μετατροπέας υποβιβασμού (*BUCK*), ο μετατροπέας ανύψωσης (*BOOST*) και ο μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης (*BUCK-BOOST ή CÚK*) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου. Αντίστοιχα, οι βασικές τοπολογίες των διακοπτικών

μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ. με γαλβανική απομόνωση, είναι : ο μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης (*FLYBACK*) και οι μετατροπείς υποβιβασμού (*FORWARD* ή *PUSH-PULL*) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου. Στηριζόμενοι σ' αυτές τις βασικές τοπολογίες αρκετές νέες τοπολογίες μπορούν να εξαχθούν, όπως έχει γίνει και παρουσιάζεται διεξοδικά στη βιβλιογραφία.

11.5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ Δ.Ε.Π.

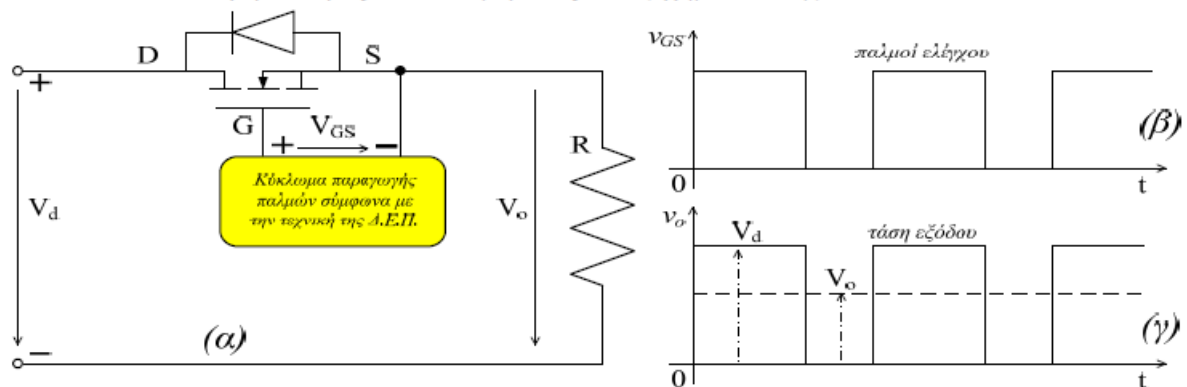
Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία αυτού του είδους των μετατροπέων θα παρουσιαστεί, σ' αυτή τη παράγραφο, η λειτουργία της βασικότερης τοπολογίας αυτής της κατηγορίας που είναι ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης εισόδου (*BUCK*). Γνωρίζοντας τον τρόπο λειτουργίας αυτής της τοπολογίας, μπορεί στη συνέχεια να εξαχθεί και να περιγραφεί πολύ εύκολα η λειτουργία οποιασδήποτε άλλης τοπολογίας αυτού του είδους μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ..

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η τεχνική ελέγχου της Δ.Ε.Π. συνίσταται στο να διατηρούμε σταθερή τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα και να μεταβάλλουμε το χρόνο αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου. Τέτοιας μορφής παλμοί μπορούν να παραχθούν με τη σύγκριση μιας περιοδικής κυματομορφής σταθερής περιόδου η οποία μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο (συνήθως αυτή είναι μια πριονωτή κυματομορφή) με μια τάση ελέγχου ($v_{control}$) η οποία προκύπτει μετά από κατάλληλη ενίσχυση του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής τάσης εξόδου (σχήμα 11.4). Όταν η τάση ελέγχου, που μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο, είναι μεγαλύτερη από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του ημιαγωγικού στοιχείου γίνεται μέγιστο (high), με αποτέλεσμα να οδηγείται στην αγωγή το ημιαγωγικό στοιχείο, ενώ όταν είναι μικρότερη το σήμα ελέγχου μηδενίζεται και το ημιαγωγικό στοιχείο οδηγείται στην αποκοπή. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής καθορίζει τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας ή τη συχνότητα μετάβασης του μετατροπέα. Όπως ήδη γνωρίζουμε στην Τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών, η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz, γι' αυτό κιόλας σ' αυτά τα κυκλώματα το κύριο ημιαγωγικό στοιχείο είναι τύπου MOSFET ισχύος (στο μεγαλύτερο ποσοστό των εφαρμογών).



Σχήμα 11.4 : Σήματα συγκριτή και λειτουργικό διάγραμμα για την παραγωγή παλμών ελέγχου σύμφωνα με την τεχνική της Δ.Ε.Π..

Έστω το κύκλωμα του σχήματος 11.5.α όπου στην είσοδό του τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης (V_d), ενώ το ημιαγωγικό στοιχείο δέχεται τους παλμούς ελέγχου που φαίνονται στο σχήμα 11.5.β. Από την λειτουργία του κυκλώματος είναι προφανές πως όταν άγει το ημιαγωγικό στοιχείο η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση εισόδου, ενώ όταν είναι σε αποκοπή η τάση εξόδου θα μηδενίζεται (σχήμα 11.5.γ).



Σχήμα 11.5 : Βασική τοπολογία και λειτουργία διακοπτικού μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση.

Για τη μέση τιμή της τάσης εξόδου ισχύει :

$$V_O = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{T_S} v_O(t) \cdot dt = \frac{1}{T_S} \cdot \left(\int_0^{t_{on}} V_d \cdot dt + \int_{t_{on}}^{T_S} 0 \cdot dt \right) = \frac{1}{T_S} \cdot [V_d \cdot (t_{on} - 0) + 0 \cdot (T_S - t_{on})] \Rightarrow$$

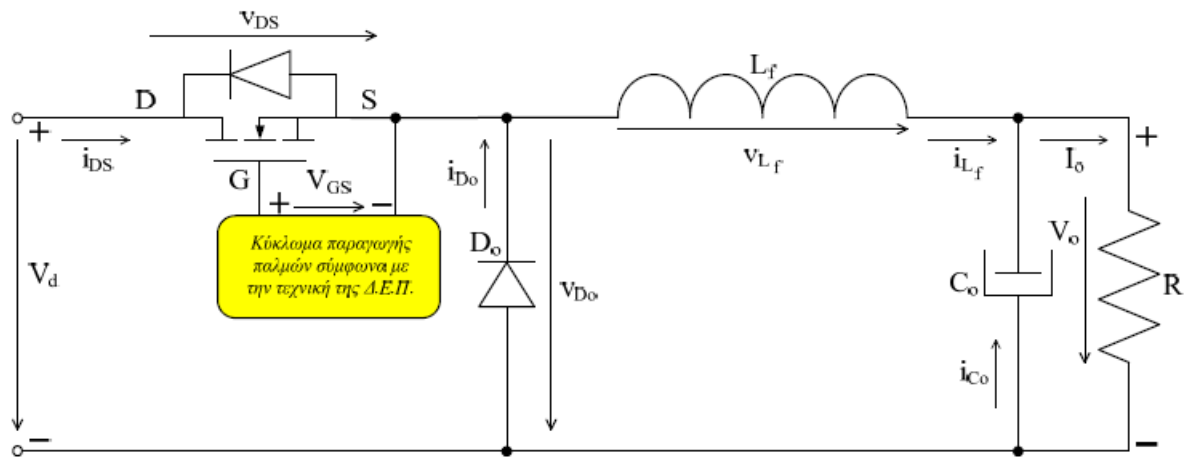
$$\Rightarrow V_O = \frac{1}{T_S} \cdot V_d \cdot t_{on} \quad (11.1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι φανερό πως, **ο χρόνος αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου στη διάρκεια της περιόδου καθορίζει τη μέση τιμή της τάσης εξόδου και μάλιστα, η μέση τιμή της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο αγωγής, άρα και με την τάση ελέγχου.**

Παρόλο που το κύκλωμα του σχήματος 11.5.α δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης εξόδου, σε πρακτικές εφαρμογές παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα:

- α) Επειδή στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές το φορτίο έχει και επαγωγή (ακόμα και σε καθαρά ωμικό φορτίο, υπάρχει η παρασιτική επαγωγή) κατά τη χρονική στιγμή που το ημιαγωγικό στοιχείο θα οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής θα εμφανιστεί στα άκρα του μια υπέρταση, εξαιτίας της απότομης μεταβολής του ρεύματος της επαγωγής, και για το λόγο αυτό το ημιαγωγικό στοιχείο κινδυνεύει να καταστραφεί. Για να αντιμετωπισθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, συνήθως τοποθετείται μία δίοδος μετά το πλήρες ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο, η οποία είναι πολωμένη ανάστροφα κατά το χρονικό διάστημα που άγει το κύριο ημιαγωγικό στοιχείο, ενώ όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι σε αποκοπή, το ρεύμα του πηνίου βρίσκει αγωγίμο δρόμο μέσω αυτής της διόδου και ένα μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας μεταφέρεται στο φορτίο. Η δίοδος αυτή αποκαλείται και **δίοδος ελεύθερης διέλευσης**.
- β) Η στιγμιαία τιμή της τάσης στην έξοδο του συγκεκριμένου μετατροπέα μεταβάλλεται από τη μηδενική τιμή στη τιμή της τάσης εισόδου, γεγονός μη αποδεκτό στις περισσότερες των εφαρμογών. Η διακύμανση της τάσης εξόδου μπορεί να ελαττωθεί αρκετά με τη χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου πρώτου βαθμού, που αποτελείται από μια επαγωγή μεγάλης τιμής που συνδέεται σε σειρά με την έξοδο και έναν πυκνωτή μεγάλης τιμής που συνδέεται παράλληλα στο φορτίο. Η συχνότητα αποκοπής αυτού του φίλτρου επιλέγεται πολύ μικρότερη από τη συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα, εξαλείφοντας ουσιαστικά την κυμάτωση στη τάση εξόδου. Σε κάποιες πρακτικές εφαρμογές, εάν επιθυμείται επιπλέον εξομάλυνση απαιτείται η τοποθέτηση και ενός επιπλέον φίλτρου δευτέρου βαθμού στην έξοδο του μετατροπέα, με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα αποκοπής από το πρώτο.

Αν στο κύκλωμα του σχήματος 11.5.α εφαρμοστούν οι λύσεις που προτάθηκαν παραπάνω για να αντιμετωπισθούν τα δύο βασικά του μειονεκτήματα προκύπτει το κύκλωμα του σχήματος 11.6, στο οποίο φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα της τοπολογίας ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού (BUCK) της τάσης ελεγχόμενου με την τεχνική της Δ.Ε.Π..



Σχήμα 11.6 : Κυκλωματικό διάγραμμα διακοπτικού μετατροπέα τοπολογίας υποβιβασμού της τάσης (BUCK), ελεγχόμενου με την τεχνική της Δ.Ε.Π..

Η λειτουργία όλων των μετατροπέων που ελέγχονται με την τεχνική της Δ.Ε.Π. μπορεί να είναι είτε στην περιοχή συνεχούς αγωγής ρεύματος είτε στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής ρεύματος. Συνεχής αγωγή (Continuous Conduction Mode, CCM): ορίζεται η κατάσταση λειτουργίας όπου το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης είναι πάντα μεγαλύτερο του μηδενός. Ασυνεχής αγωγή (Discontinuous Conduction Mode, DCM) ορίζεται η κατάσταση λειτουργίας όπου το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης παρουσιάζει διαστήματα όπου μηδενίζεται.

Για την ανάλυση της λειτουργίας αυτού του είδους των μετατροπέων ορίζεται η **σχετική διάρκεια αγωγής ή λόγος κατάτμησης** (D ή δ) ως το πηλίκο του χρόνου αγωγής (t_{on}) του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου προς την περίοδο (T_s):

$$D = \delta = \frac{t_{on}}{T_s}, \quad \text{όπου: } t_{on} \text{ ο χρόνος αγωγής του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου}$$

T_s η περίοδος της λειτουργίας του κυκλώματος

$$\text{και } T_s = \frac{1}{f_s}, \quad \text{όπου: } f_s \text{ η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα.}$$

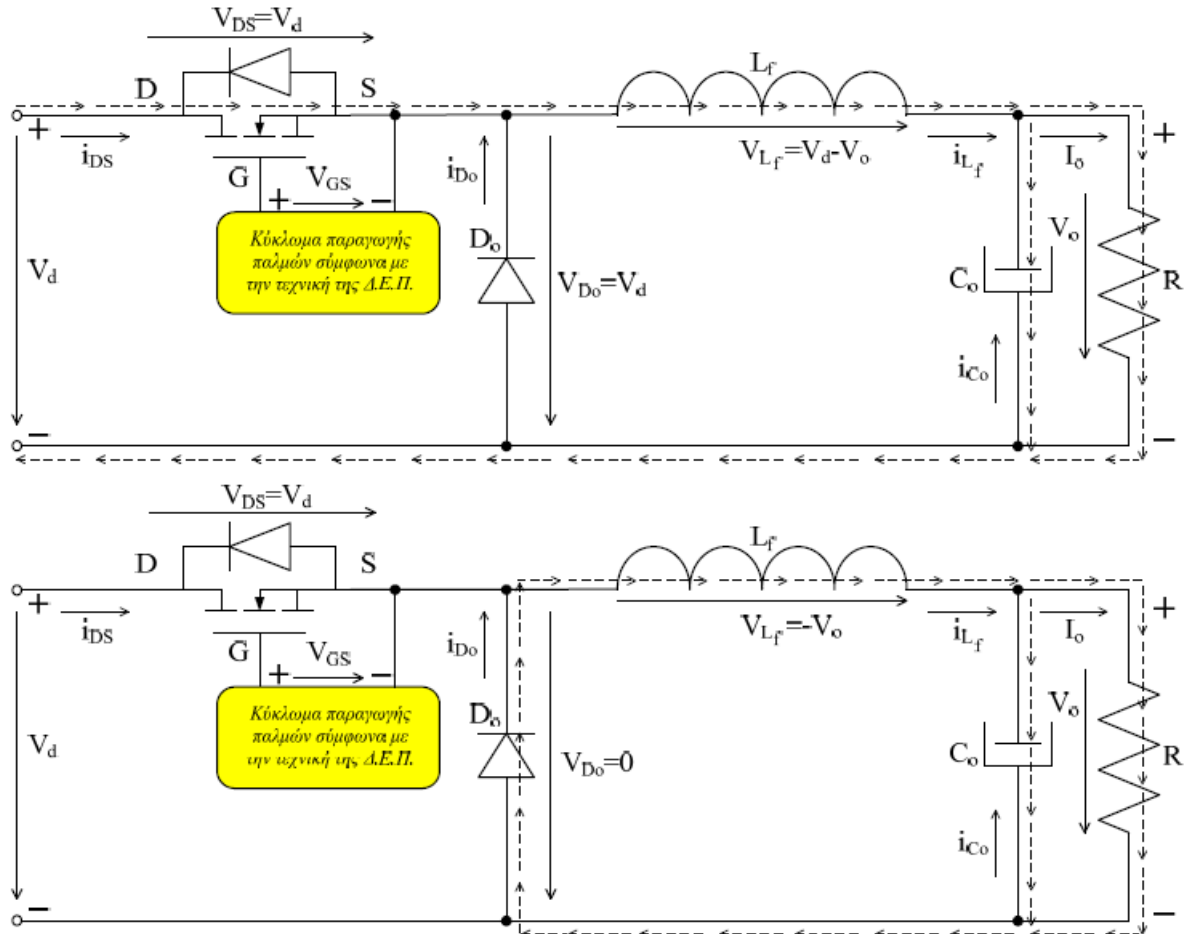
Α). ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΗΣ

Η θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας των μετατροπέων αυτών, στηρίζεται στην υπόθεση ότι όλα τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, δηλαδή οι ημιαγωγικοί διακόπτες θεωρούνται με μηδενικούς χρόνους έναυσης και σβέσης, με μηδενικές απώλειες αγωγής, με μηδενική πτώση τάσεως, κ.α.. Στηριζόμενοι σ' αυτή την υπόθεση και θεωρώντας μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η λειτουργία της τοπολογίας διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού (BUCK-PWM DC-DC Converter) της τάσης εξόδου μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

- α) όταν το τρανζίστορ άγει η ενέργεια μεταφέρεται απ' ευθείας από την είσοδο στην έξοδο και συγχρόνως ένα τμήμα της αποθηκεύεται στην επαγωγή. Η δίοδος ελεύθερης διέλευσης πολώνεται ανάστροφα (από την τάση εισόδου) και δεν άγει.

β) όταν το τρανζίστορ δεν άγει η επαγωγή τείνει να διατηρήσει το ρεύμα στην ίδια κατεύθυνση (ενεργώντας ως πηγή ρεύματος). Επομένως η διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαγωγής αυτής αναστρέφεται και η διόδος άγει.

Στο σχήμα 11.7 σχεδιάζονται τα δύο ισοδύναμα κυκλώματα που αντιστοιχούν στις δύο καταστάσεις λειτουργίας του κυκλώματος, ενώ στο σχήμα 11.8 σχεδιάζονται οι βασικές κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων για τη λειτουργία του διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης στην συνεχή αγωγή.



Σχήμα 11.7 : Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη λειτουργία σε συνεχή αγωγή ενός διακοπτικού μετατροπέα τοπολογίας υποβιβασμού της τάσης (BUCK), ελεγχόμενου με την τεχνική της Δ.Ε.Π..

Θεωρώντας μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για το μετατροπέα, από το κυκλωματικό του διάγραμμα είναι εμφανές ότι:

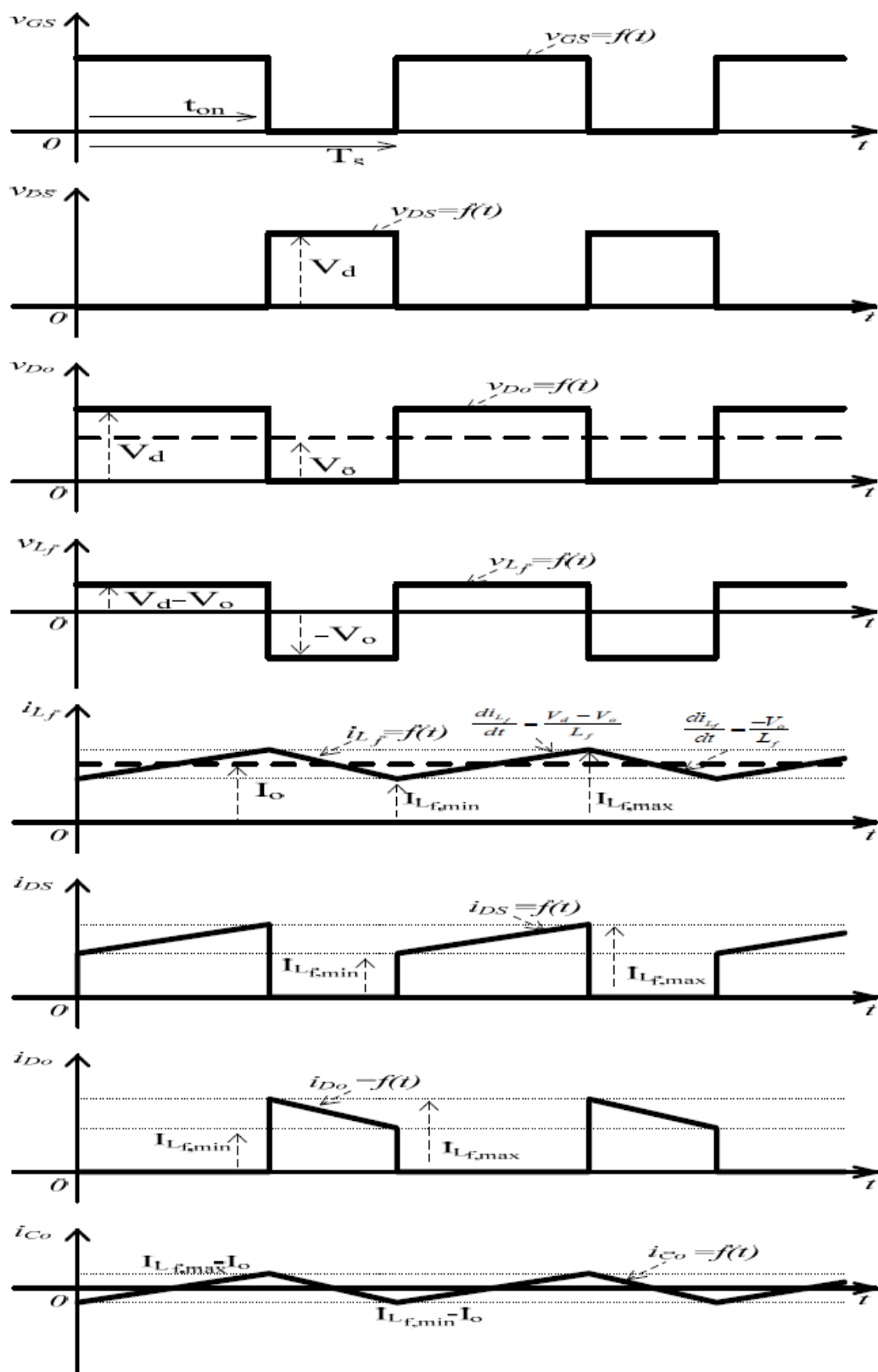
$$v_{D_o}(t) = v_{L_f}(t) + v_o(t) \Rightarrow V_{D_o} = V_{L_f} + V_o$$

αλλά $V_{L_f} = 0$, λόγω μόνιμης κατάστασης λειτουργίας

και επομένως $V_{D_o} = V_o$, άρα:

$$V_o = V_{D_o} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} v_{D_o}(t) \cdot dt = \frac{1}{T_s} \cdot \left(\int_0^{t_{on}} V_d \cdot dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 \cdot dt \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{1}{T_s} \cdot [V_d \cdot (t_{on} - 0) + 0 \cdot (T_s - t_{on})] \Rightarrow$$



Σχήμα 11.8 : Κυματομορφές ηλεκτρικών μεγεθών κατά τη λειτουργία σε συνεχή αγωγή ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης, ελεγχόμενου με την τεχνική της Δ.Ε.Π. .

$$V_o = \frac{1}{T_s} V_d \cdot t_{on} \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D = \delta \quad (11.2)$$

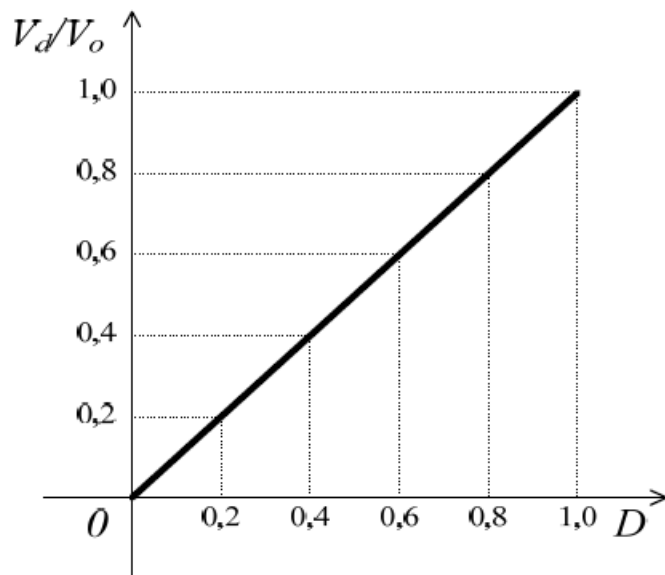
Στο ίδιο αποτέλεσμα οδηγεί και η επίλυση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\begin{aligned} V_{L_f} &= 0 \Rightarrow V_{L_f} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} v_{L_f}(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{L_f} &= \frac{1}{T_s} \cdot \left(\int_0^{t_{on}} (V_d - V_o) \cdot dt + \int_{t_{on}}^{T_s} (-V_o) \cdot dt \right) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{L_f} &= (V_d - V_o) \cdot (t_{on} - 0) + (-V_o) \cdot (T_s - t_{on}) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{L_f} &= V_d \cdot t_{on} - V_o \cdot t_{on} - V_o \cdot T_s + V_o \cdot t_{on} = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} &= \frac{t_{on}}{T_s} = D = \delta \end{aligned}$$

Και θεωρώντας ότι ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος είναι μοναδιαίος ισχύει ότι:

$$\eta = 1 \Rightarrow P_d = P_o \Rightarrow V_d \cdot I_d = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{I_d}{I} = \frac{t_{on}}{T_s} = D = \delta \quad (11.3)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις είναι εμφανές ότι η τάση εξόδου ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης της τάσης εισόδου, κατά τη λειτουργία του στη συνεχή κατάσταση αγωγής, είναι ανεξάρτητη από το φορτίο εξόδου και εξαρτάται μόνο από τη σχετική διάρκεια αγωγής. Στο σχήμα 11.9 σχεδιάζεται η χαρακτηριστική εξόδου ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης ελεγχόμενου μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (τάση εξόδου ως συνάρτηση του λόγου κατάτμησης).

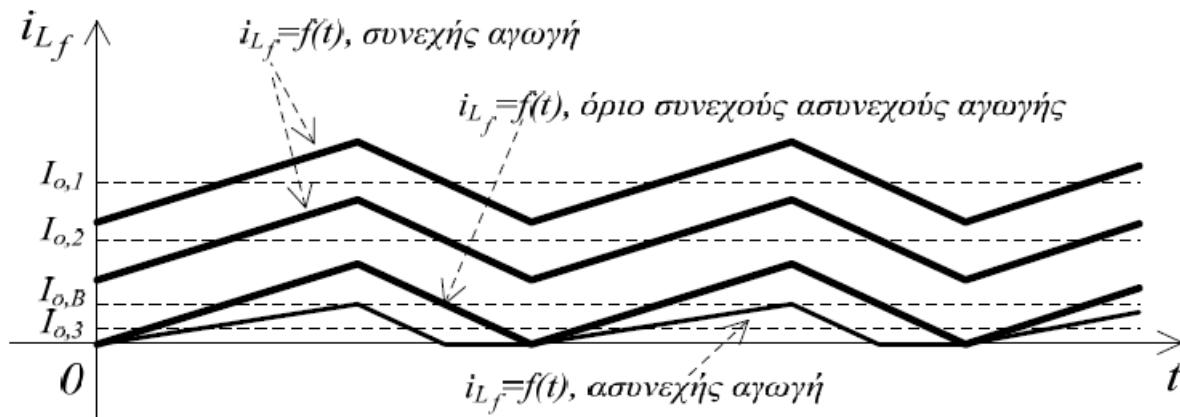


Σχήμα 11.9: Χαρακτηριστική εξόδου ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης.

B). ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΗΣ

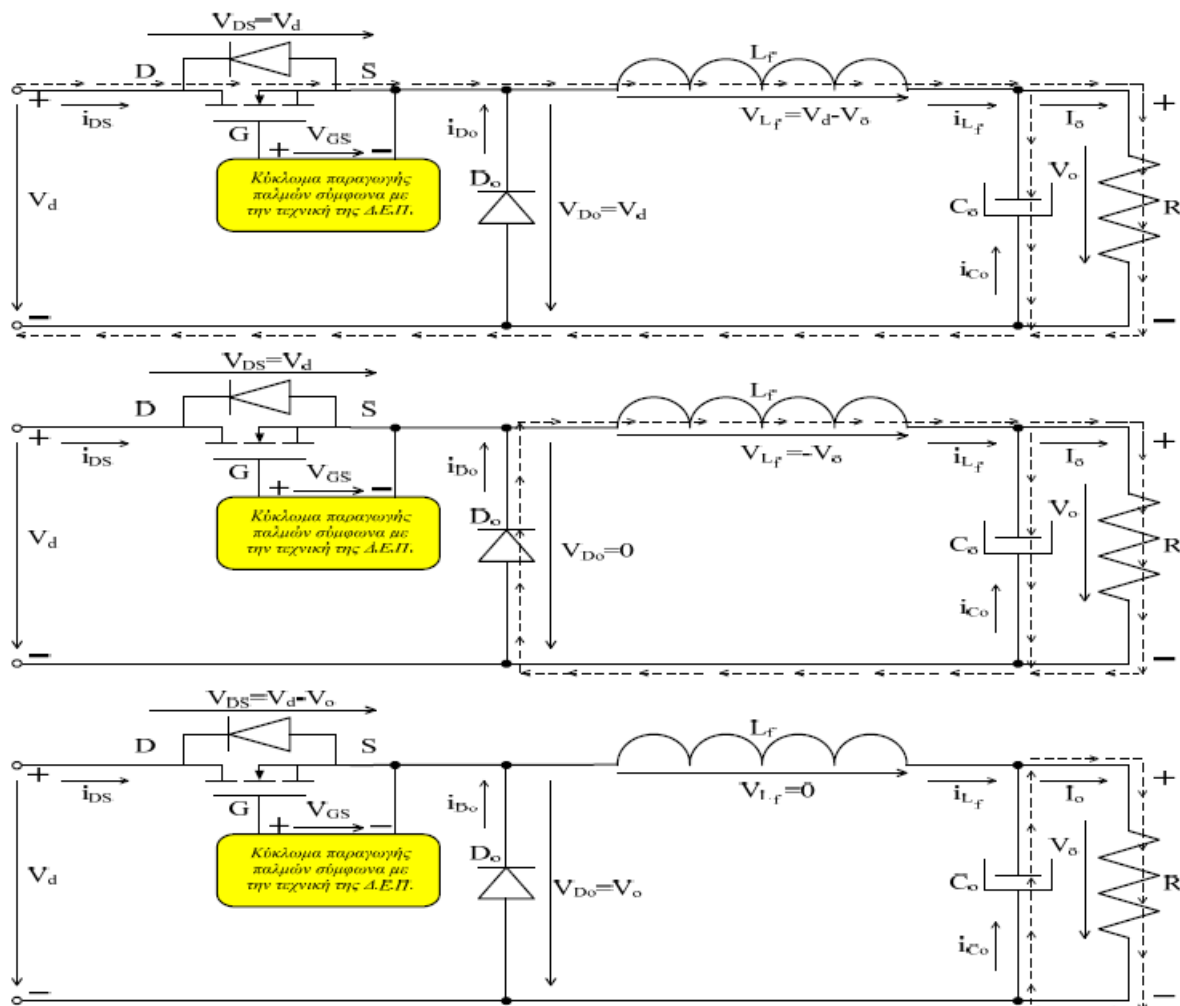
Αν η ενέργεια του πηνίου δεν είναι αρκετή να διατηρήσει σε κατάσταση αγωγής τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης κατά το χρόνο αποκοπής του κύριου ημιαγωγικού στοιχείου, η δίοδος σταματάει να άγει, το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης μηδενίζεται, ενώ ο πυκνωτής εξόδου αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει το φορτίο με την απαιτούμενη ενέργεια. Σ' αυτή την περίπτωση, το κύκλωμα λειτουργεί στην ασυνεχή αγωγή και είναι προφανές ότι, οδηγείται σε αυτήν την κατάσταση, όταν το φορτίο (I_o) ελαττωθεί σε σημαντικό βαθμό (δηλαδή, όταν αυξηθεί η ωμική αντίσταση εξόδου R_o), ενώ υπάρχει και

μία οριακή τιμή φορτίου όπου το κύκλωμα λειτουργεί στα όρια μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (σχήμα 11.10).



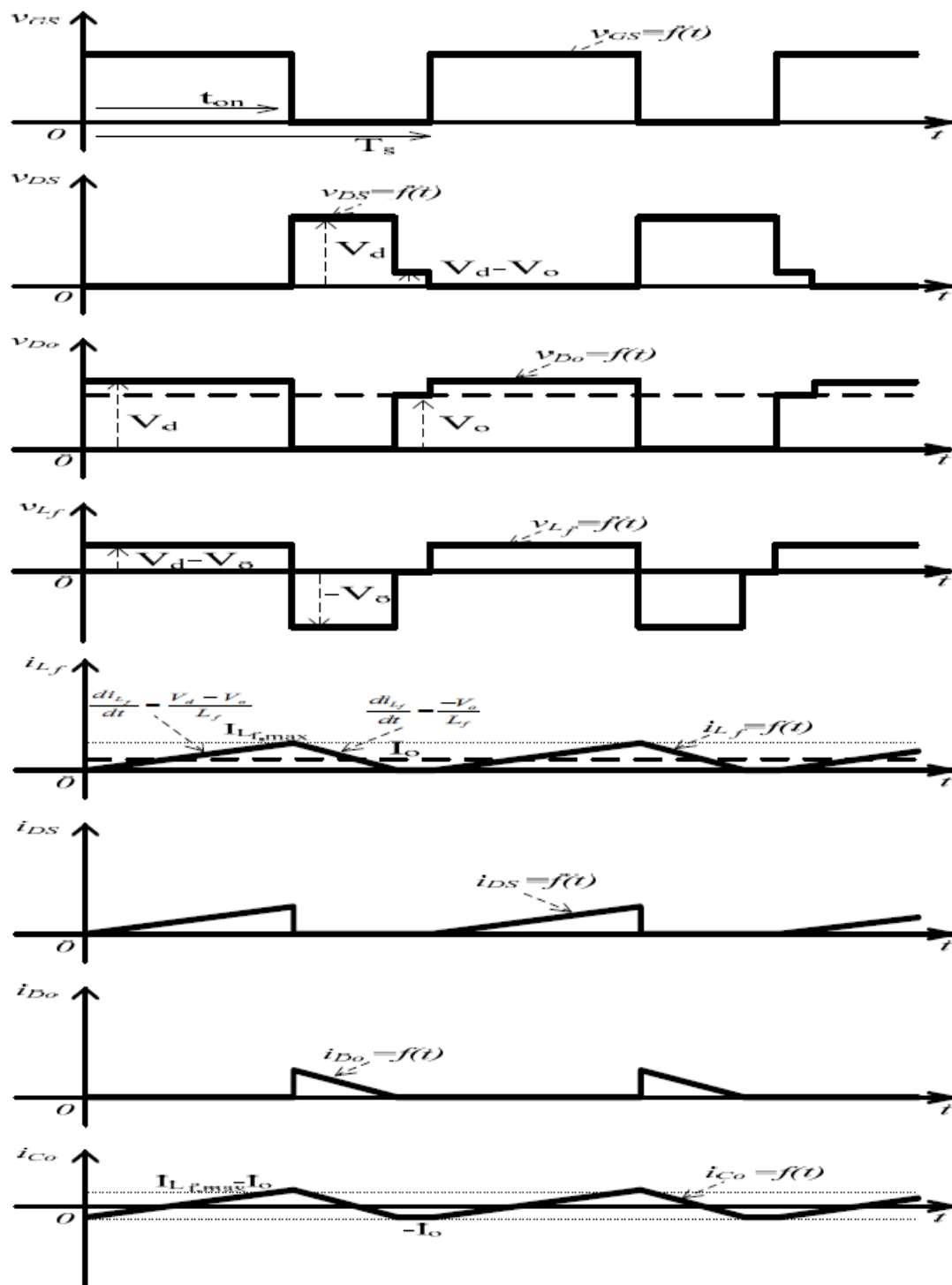
Σχήμα 11.10 : Κυματομορφές του ρεύματος στην επαγωγή ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης με μεταβολή του φορτίου εξόδου.

Στο σχήμα 11.11 σχεδιάζονται τα τρία ισοδύναμα κυκλώματα που αντιστοιχούν στις καταστάσεις λειτουργίας του κυκλώματος κατά τη λειτουργία σε ασυνεχή αγωγή.



Σχήμα 11.11 : Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη λειτουργία σε ασυνεχή αγωγή ενός διακοπτικού μετατροπέα τοπολογίας υποβιβασμού της τάσης (BUCK), ελεγχόμενου με την τεχνική της Δ.Ε.Π..

Ακόμα, στο σχήμα 11.12 επανασχεδιάζονται οι βασικές κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων για τη λειτουργία του διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης στην ασυνεχή αγωγή.



Σχήμα 11.12 : Κυματομορφές ηλεκτρικών μεγεθών κατά τη λειτουργία σε συνεχή αγωγή ενός διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης, ελεγχόμενου με την τεχνική της Δ.Ε.Π. .

Από την κυματομορφή της τάσης στα άκρα της διόδου ελεύθερης διέλευσης είναι προφανές ότι εμφανίζεται τάση στα άκρα της για περισσότερο χρόνο σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο κατά τη λειτουργία συνεχούς αγωγής. Επομένως, η τάση στην έξοδο του μετατροπέα, κατά τη λειτουργία στην ασυνεχή αγωγή, είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση εξόδου κατά τη συνεχή αγωγή, για την ίδια σχετική διάρκεια αγωγής. Επίσης, όσο μεγαλώνει το χρονικό διάστημα της ασυνεχούς αγωγής τόσο μεγαλώνει η τάση εξόδου η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι την τιμή της τάσης εισόδου.

Κατά τη λειτουργία του κυκλώματος στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή μηδενίζεται στο τέλος της περιόδου, επομένως, για τιμές του ρεύματος εξόδου μεγαλύτερες από αυτή, το κύκλωμα λειτουργεί σε συνεχή αγωγή ενώ για τιμές μικρότερες από αυτή, λειτουργεί στην ασυνεχή κατάσταση αγωγής. Η μέση τιμή αυτού του ρεύματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$I_{L_f,B} = \frac{1}{2} \cdot i_{L_f,\max} = \frac{t_{on}}{2 \cdot L_f} \cdot (V_d - V_o) = \frac{D \cdot T_s}{2 \cdot L_f} \cdot (V_d - V_o)$$

επίσης: $i_{L_f}(t) = I_o - i_{Co}(t) \Rightarrow I_{L_f} = I_o - I_{Co}$

και επειδή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας $I_{Co} = 0$, άρα:

$$I_{o,B} = \frac{D \cdot T_s}{2 \cdot L_f} \cdot (V_d - V_o) \quad (11.4)$$

Ενώ, κατά τη λειτουργία του κυκλώματος στην ασυνεχή αγωγή και για σταθερή τάση εισόδου, ισχύουν οι εξισώσεις:

$$I_{o,B} = I_{L_f,B} = \frac{T_s \cdot V_d}{2 \cdot L_f} \cdot D \cdot (1 - D) \quad (11.5)$$

$$I_{L_f,B,\max} = \frac{T_s \cdot V_d}{8 \cdot L_f} \quad (11.6)$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \cdot \frac{I_o}{I_{L_f,B,\max}}} \quad (11.7)$$

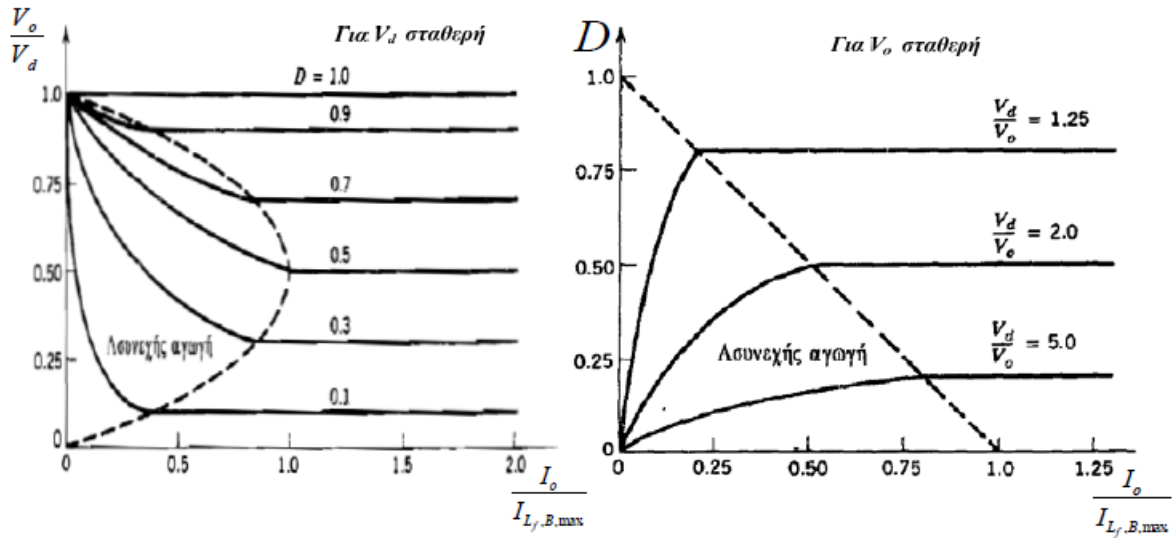
Ενώ, κατά τη λειτουργία του κυκλώματος στην ασυνεχή αγωγή και για σταθερή τάση εξόδου, ισχύουν οι εξισώσεις:

$$I_{o,B} = I_{L_f,B} = \frac{T_s \cdot V_o}{2 \cdot L_f} \cdot (1 - D) \quad (11.8)$$

$$I_{L_f,B,\max} = \frac{T_s \cdot V_o}{2 \cdot L_f} \quad (11.9)$$

$$D = \frac{V_o}{V_d} \cdot \sqrt{\frac{I_o}{I_{L_f,B,\max}} \cdot \frac{1 - \frac{V_o}{V_d}}{1 - \frac{V_o}{V_d}}} \quad (11.10)$$

Στο σχήμα 11.13 σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές εξόδου ως συνάρτηση του ρεύματος εξόδου και με παράμετρο τη σχετική διάρκεια αγωγής τόσο για σταθερή τάση εισόδου όσο και για σταθερή τάση εξόδου.



Σχήμα 11.13 : Χαρακτηριστικές εξόδου ως συνάρτηση του ρεύματος εξόδου τόσο για σταθερή τάση εισόδου όσο και για σταθερή τάση εξόδου

11.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ Δ.Ε.Π.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών και ουσιαστικά η εμφάνιση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος τύπου φαινόμενου πεδίου με δομή μέταλλο-οξειδίο-ημιαγωγός (MOSFET), είναι οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν στην ευρεία χρήση των διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση που ελέγχονται με την τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος (από μερικές δεκάδες W μέχρι 5kW) και για διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας 30-300kHz, λόγω του απλού κυκλώματος και της ευκολίας στον έλεγχο. Η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας εξαρτάται από το ημιαγωγικό στοιχείο και την ισχύ του μετατροπέα. Σ' αυτές τις περιοχές συχνοτήτων αυτοί οι μετατροπείς θεωρούνται οι πλέον κατάλληλοι ως προς το βάρος, σχήμα, απόδοση, αξιοπιστία αλλά και κόστος.

Τα πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών που ελέγχονται με την τεχνική της Δ.Ε.Π., σε σχέση με τα γραμμικά τροφοδοτικά, ανάγονται στο ότι τα ημιαγωγικά στοιχεία (MOSFET ισχύος, δίοδοι) λειτουργούν ως διακόπτες, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση των απωλειών ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των μετατροπέων κυμαίνεται από 70-95%. Επιπλέον, εφόσον απαιτείται ηλεκτρική απομόνωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής για υψηλές συχνότητες λειτουργίας, όπου το μέγεθος και το βάρος του είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα γραμμικά τροφοδοτικά, τα οποία λειτουργούν στη συχνότητα των 50Hz. Ακόμη, ένα ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί ως διακόπτης μπορεί να αντέχει μεγαλύτερες ισχείς, απ' ότι ένα ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί στη γραμμική περιοχή.

Το κυριότερο πρόβλημα αυτών των μετατροπών είναι οι διακοπτικές απώλειες, που εμφανίζονται τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων και οι οποίες αυξάνουν γραμμικά με αύξηση της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας. Ένα επιπλέον πρόβλημα, που παρουσιάζεται κατά τη λειτουργία αυτών των μετατροπών, είναι η υπέρταση, που εμφανίζεται στα άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη κατά τη σβέση του, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του, καθώς και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (*Electromagnetic Interference, EMI*), που παράγεται λόγω των μεγάλων μεταβολών της τάσης και του ρεύματος κατά την αλλαγή κατάστασης του ημιαγωγικού διακόπτη και δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία άλλων συσκευών.

11.8 ΕΡΓΑΣΙΑ

- 1) Για το κύκλωμα του σχήματος 11.14 και για λόγο κατάτμησης ίσο με 20%, να σχεδιάσετε τις κυματομορφές των ακόλουθων ηλεκτρικών μεγεθών $v_{GS}=f(t)$, $v_{DS}=f(t)$, $v_{D_o}=f(t)$, $v_{L_f}=f(t)$, $i_{L_f}=f(t)$, $i_{DS}=f(t)$, $i_{D_o}=f(t)$ και $i_{C_o}=f(\omega t)$, τόσο για λειτουργία σε συνεχή κατάσταση αγωγής όσο και για λειτουργία σε ασυνεχή κατάσταση αγωγής. (για ευκολία χρησιμοποιήστε τις έτοιμες καμπύλες που σας δίνονται, στο τέλος της άσκησης). Επίσης: V_d : η συνεχής τάση εισόδου μέσης τιμής 50 Volt και V_o : η συνεχής τάση εξόδου μέσης τιμής 20 Volt για λειτουργία σε συνεχή αγωγή και μέσης τιμής 35 Volt για λειτουργία σε ασυνεχή αγωγή.
- 2) Να σχεδιαστούν οι ακόλουθες καμπύλες $V_d/V_o=f(D)$ και $\eta=P_o/P_d=f(D)$:
 - α) Για διακοπτική συχνότητα λειτουργίας 100kHz και για τα φορτία 0,5 A, 1,0 A και 2,0 A (όλες μαζί, δύο σχήματα, έξι καμπύλες).
 - β) Για φορτίο 2,0 A και για διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας στα 50 kHz, 100 kHz και 150 kHz (όλες μαζί, δύο σχήματα, έξι καμπύλες).
 - γ) Για διακοπτική συχνότητα λειτουργίας 20kHz και για φορτίο ίσο με το όριο ρεύματος στο $D=50\%$ (δύο σχήματα, δύο καμπύλες).
 - δ) Για διακοπτική συχνότητα λειτουργίας 20kHz και για φορτίο ίσο με το όριο ρεύματος στο $D=50\%$ αλλά με μικρότερο πηνίο εξομάλυνσης (δύο σχήματα, δύο καμπύλες).
- 3) Συνολικά τι παρατηρήσεις έχετε να κάνετε από τις παραπάνω καμπύλες;
- 4) Πως επηρεάζεται ο λόγος των τάσεων από το λόγο κατάτμησης σε ένα διακοπτικό μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση τοπολογίας υποβιβασμού της τάσης που ελέγχεται με τη τεχνική της Δ.Ε.Π.;
- 5) Ποιος είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απόδοσης κατά τη λειτουργία αυτού του είδους των μετατροπέων;
- 6) Ποια είναι η μέγιστη τάση που μπορούμε να πάρουμε στην έξοδο ενός τέτοιου μετατροπέα θεωρητικά; Πρακτικά αυτό μπορεί να επιτευχθεί ή όχι και γιατί;
- 7) Να συγκρίνετε εκτενώς και να αναφέρετε τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα μεταξύ των τοπολογιών των γραμμικών τροφοδοτικών και των διακοπτικών τροφοδοτικών. Που χρησιμοποιείται η κάθε τοπολογία;
- 8) Τι επιτυγχάνεται αλλάζοντας το λόγο κατάτμησης στους διακοπτικούς μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση;
- 9) Αν το κύριο ημιαγωγικό στοιχείο ενός διακοπτικού μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση τοπολογίας υποβιβασμού της τάσης που ελέγχεται με τη τεχνική της Δ.Ε.Π. ήταν θυρίστορ θα λειτουργούσε ομαλά το κύκλωμα; Να τεκμηριώσετε την απάντησή σας.
- 10) Ποια είναι κατά τη γνώμη σας τα βασικότερα μειονεκτήματα των διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση; Αναφέρατε πιθανούς, κατά τη γνώμη σας, τρόπους αντιμετώπισης των μειονεκτημάτων.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣΜΕ D=.....

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣΜΕ D=.....

