

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Συστήματος Μεγιστοποίησης της  
Παραγωγής Ισχύος Τριβοηλεκτρικών Γεννητριών**

**Βρουβάκης Ιωάννης**

**Εξεταστική επιτροπή:**

**Ευτύχιος Κουτρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής (επιβλέπων)**

**Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης, Καθηγητής**

**Χρήστος Τσάμης, Διευθυντής Ερευνών Ε.ΚΕ.Φ.Ε. “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”**

**XANIA 2020**



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη εναλλακτικών ηλεκτρονικών συστημάτων για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ισχύος τριβοηλεκτρικών γεννητριών. Για την εκπόνηση της εργασίας δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης των τριβοηλεκτρικών γεννητριών τα οποία βασίζονται σε ηλεκτρικά μοντέλα από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τα συστήματα για την μεγιστοποίηση ισχύος που μελετήθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αρχικά εκείνα που αποτελούνται από ένα διακόπτη παράλληλα της γεννήτριας και ένα μετατροπέα AC/DC (ανορθωτής γέφυρας) σε συνδυασμό με ένα μετατροπέα DC/DC τύπου Buck. Στη συνέχεια εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές που αποσκοπούν στη βελτίωση του συντελεστή ισχύος, πάντα με τη χρήση μπαταρίας ως φορτίο του συστήματος. Πρώτη τεχνική βελτίωσης του συντελεστή ισχύος αποτέλεσε η προσθήκη του Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter, ενώ η δεύτερη τεχνική αφορούσε τη χρήση του Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier. Επιπλέον μελέτη έγινε και για την ανάπτυξη ενός MPPT αλγορίθμου για την εύρεση του κατάλληλου duty cycle στον μετατροπέα Buck έτσι ώστε η ισχύς να μεγιστοποιείται τόσο στα άκρα της γεννήτριας όσο και στη μπαταρία που έχει τεθεί ως φορτίο. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης για όλα τα παραπάνω συστήματα και πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ τους που αφορούν τους βαθμούς απόδοσης και βελτίωσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον MATLAB®-Simulink.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά για τις τριβοηλεκτρικές γεννήτριες και τις εφαρμογές τους.....	5
1.2 Περιγραφή προβλήματος που μελετήθηκε.....	8
1.3 Δομή εργασίας.....	9
2. Τριβοηλεκτρικές γεννήτριες.....	10
2.1 Περιγραφή κατασκευής και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	10
2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα & Χαρακτηριστικές.....	17
3. Κυκλώματα μετατροπών ισχύος – Περιγραφή των κυκλωμάτων που μελετήθηκαν.....	25
3.1 Ανορθωτής Γέφυρας.....	27
3.2 Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck Converter).....	29
3.3 Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.....	33
3.4 Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier.....	37
4. Μεγιστοποίηση παραγωγής ισχύος τριβοηλεκτρικών γεννητριών.....	46
4.1 Περιγραφή των μεθόδων MPPT.....	47
4.2 Περιγραφή προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν.....	55
5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	71
6. Συμπεράσματα.....	113
7. Βιβλιογραφία.....	115

## *1. Εισαγωγή*

---

### ***1.1 Γενικά για τις Τριβοηλεκτρικές γεννήτριες και τις εφαρμογές τους***

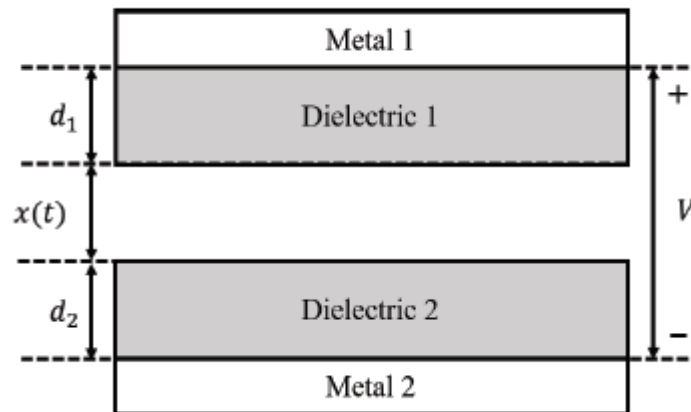
Η ιδέα των νανογεννητριών πρωτοαναφέρθηκε το 2006 ενσωματωμένη στον όρο «Πιεζοηλεκτρικές Νανογεννήτριες» (PENGs). Από τότε, οι PENGs έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές και διαφορετικές εφαρμογές, καθώς ώθησαν ερευνητές να τις υλοποιήσουν για την τροφοδοσία φορητών συσκευών. Έξι χρόνια μετά, μια νέα μέθοδος προτάθηκε, εκείνη των «Τριβοηλεκτρικών Νανογεννητριών» TENGs. Όπως συνέβη και με τις PENGs, η νέα αυτή τεχνολογία έλκυσε τους ερευνητές να ασχοληθούν περαιτέρω και να ανακαλύψουν τις ιδιότητές της. Οι TENGs εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τις PENGs. Επιπλέον διαθέτουν πολλά θετικά χαρακτηριστικά όπως υψηλή τάση, υψηλή αποδοτικότητα σε χαμηλές συχνότητες, χαμηλό κόστος και μεγάλη ευελιξία στην επιλογή υλικών αλλά και τη χρήση εφαρμογής.

Πολλές εφαρμογές των TENG αποσκοπούν στην φόρτιση ηλεκτρικών συσκευών αξιοποιώντας την μηχανική ενέργεια από το περιβάλλον μετατρέποντας τη σε ηλεκτρική μέσω τριβής. Δημιουργήθηκαν ως μια υψηλά αποδοτική, χαμηλού κόστους και εύκολα διαχειρίσιμη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Με τη γρήγορη ανάπτυξη των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών όπως κινητά τηλέφωνα, ρολόγια και άλλα, η προσοχή έχει στραφεί στην ανάπτυξη φορητών ηλεκτρικών πηγών ενέργειας. Η προσωρινή προσέγγιση για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση μπαταριών, οι οποίες συνήθως έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής, καθώς παρουσιάζουν και περιβαλλοντικά προβλήματα κατά την αποσύνθεση τους. Εναλλακτικά, οι TENGs έχουν αναπτυχθεί για να παράγουν ενέργεια από το καθημερινό περιβάλλον εργασίας δίνοντας τη δυνατότητα για αυτόνομες ηλεκτρικές συσκευές.

Όπως αναφέρει και η ονομασία τους, πρόκειται για ένα είδος γεννήτριας το οποίο παράγει ηλεκτρική ισχύ, μετατρέποντας μηχανική ενέργεια (τριβή) σε ηλεκτρική. Η τριβή γίνεται μεταξύ υλικών όπως Kapton, Aluminum, PFA, Cu, Ag, PET, PTFE κ.α.

Συνήθως, οι TENGs αποτελούνται από δύο πλάκες οι οποίες τρίβονται μεταξύ τους. Επιπλέον, περιέχουν χωρητική σύνθετη αντίσταση από τη φύση τους, και με τάση η οποία αλλάζει ανάλογα με την απόσταση που έχουν οι πλάκες. Παράδειγμα της δομής φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1** - Δομή TENG με δύο διηλεκτρικές πλάκες [35].

Ο αναλυτικός τύπος που μας δίνει την τάση ανοικτοκύκλωσης της γεννήτριας δίνεται παρακάτω :

$$V_{oc}(x) = \frac{\sigma}{\epsilon_0} x \quad (1.1)$$

όπου:

$\sigma$  η πυκνότητα της επιφάνειας φόρτισης ( $C/m^2$ )

$\epsilon_0$  η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού ( $F/m$ ) και

$x$  η απόσταση μεταξύ των διηλεκτρικών πλακών (m).

Η αντίστοιχη σχέση για την χωρητικότητα που διαθέτει η γεννήτρια είναι:

$$C_{\text{teng}}(x) = \frac{A\varepsilon_0}{d_0+x} \quad (1.2)$$

όπου:

$A$  η επιφάνεια των πλακών ( $\text{m}^2$ ) και

$d_0$  σταθερά βασισμένη στην εξίσωση 1.3

$$d_0 = \frac{d_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\varepsilon_{r2}} \quad (1.3)$$

όπου:

$d_1$  και  $d_2$  το πάχος των πλακών (m) και

$\varepsilon_{r1}$  και  $\varepsilon_{r2}$  η διηλεκτρική σταθερά των υλικών (αδιάστατο μέγεθος)

Το παραπάνω μοντέλο θα αποτελέσει την πρώτη από τις υλοποιήσεις των TENG στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω για πληροφορίες που αφορούν χαρακτηριστικές για τάση, ρεύμα, φορτίο και ισχύ, καθώς επίσης θα μελετηθούν και διαφορετικά μοντέλα από αυτό, για την ποικιλία εφαρμογών και κατασκευής των τριβοηλεκτρικών γεννητριών.

Όσον αφορά τη πρακτική τους χρήση, οι TENGs έχουν ήδη ξεκινήσει να εξαπλώνονται και έχουν εφαρμογές σε πολλές μικροηλεκτρονικές συσκευές. Πολλά πειράματα έχουν ως σκοπό την ενσωμάτωσή τους στην καθημερινή ζωή, από τις σόλες των παπουτσιών ως υλικό που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, στα λάστιχα των αυτοκινήτων κατά τη κίνηση στο οδόστρωμα αντίστοιχα, αλλά και σε αιολικά πάρκα, γέφυρες αλλά και υποθαλάσσιους σταθμούς, όπου μπορεί να υπάρξει μηχανική ενέργεια διαθέσιμη προς εκμετάλλευση.

Μέχρι σήμερα έχουν κατοχυρωθεί πάνω από 200 πατέντες και έχουν πραγματοποιηθεί πάνω 700 επιστημονικές δημοσιεύσεις σε όλο τον κόσμο μέσα στα τελευταία 5 χρόνια και προβλέπεται η συνέχεια να είναι ακόμα πιο διευρυμένη.

## **1.2 Περιγραφή προβλήματος που μελετήθηκε**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν εναλλακτικά ηλεκτρονικά συστήματα μεγιστοποίησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από TENG.

Αρχικά υλοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης γεννητριών με βάση βιβλιογραφικές έρευνες. Στη συνέχεια, μοντελοποιήθηκαν τα ηλεκτρονικά συστήματα για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των TENG, πρώτα με έλεγχο του διακόπτη, στη συνέχεια με μετατροπέα Buck και εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT και τέλος με συνδυασμό των μεθόδων αυτών. Επιπλέον, μελετήθηκε η εφαρμογή μιας εναλλακτικής τεχνικής που αφορά τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος της TENG. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της χωρητικής σύνθετης αντίστασης των TENGs η τάση και το ρεύμα εξόδου της δεν είναι συμφασικά. Έτσι λοιπόν, με χρήση δύο διαφορετικών τεχνικών για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος.

Τέλος, μελετήθηκε η υλοποίηση της μεγιστοποίησης ισχύος τόσο από την πλευρά της πηγής όσο και από αυτή του φορτίου, καθώς οι τριβοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν ως σκοπό τη φόρτιση των μπαταριών.



### **1.3 Δομή Εργασίας**

Όπως προαναφέρθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εξετάζονται εναλλακτικά ηλεκτρονικά συστήματα για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος σε τριβοηλεκτρικές γεννήτριες. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται η διαδικασία για την ανάπτυξη των παραπάνω, από τη μελέτη της θεωρίας των τριβοηλεκτρικών γεννητριών, τη θεωρία των μετατροπών συνεχούς τάσης μέχρι και την βήμα προς βήμα σχεδίαση του ηλεκτρονικού συστήματος που επιτελεί τον σκοπό αυτό. Τα κεφάλαια της εργασίας οργανώνονται περιληπτικά ως εξής :

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.**
  - Εισαγωγή στον αναγνώστη της ιδέας των TENGs καθώς και αναφορά κινήτρων για τη μελέτη τους.
- **Κεφάλαιο 2: Τριβοηλεκτρικές γεννήτριες.**
  - Περιγραφή διαφορετικών τρόπων κατασκευής σε συνδυασμό με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των TENG. Επιπλέον, παρουσίαση χαρακτηριστικών γραφικών παραστάσεων τάσης-ρεύματος, τάσης-φορτίου, ισχύος-τάσης, ισχύος-ρεύματος, ισχύος-φορτίου, καθώς και των αντιστοίχων ισοδυνάμων κυκλωμάτων των τριβοηλεκτρικών γεννητριών.
- **Κεφάλαιο 3: Κυκλώματα μετατροπών ισχύος – Περιγραφή των κυκλωμάτων που μελετήθηκαν.**
  - Ανάλυση ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη της μεγιστοποίησης της παραγωγής ισχύος.
- **Κεφάλαιο 4: Μεγιστοποίηση παραγωγής ισχύος τριβοηλεκτρικών γεννητριών.**
  - Παρουσίαση των τεχνικών Maximum Power Point Tracking που εφαρμόστηκαν, καθώς επίσης και αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας ανάπτυξης των κυκλωμάτων προσομοίωσης.

- **Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα.**

- Αναλυτική παράθεση παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων τα οποία εξήχθησαν από τα μοντέλα προσομοίωσης που υλοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η αποτύπωση των αποτελεσμάτων λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια διαγραμμάτων και πινάκων.

- **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.**

- Ανασκόπηση αποτελεσμάτων με παράλληλη αξιολόγηση αυτών, εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς και υποβολή προτάσεων για περαιτέρω μελλοντική ανάπτυξη.

## 2. Τριβοηλεκτρικές γεννήτριες

---

### 2.1 Περιγραφή κατασκευής και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Κατά τη τριβή δύο υλικών πραγματοποιείται μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου, με αποτέλεσμα τα δύο υλικά να φορτίζονται με φορτία με αντίθετα πρόσημα. Τα φορτία αυτά περιορίζονται μονάχα στην επιφάνεια των υλικών, δεν επανασυνδυάζονται, ούτε καταστρέφονται. Αντίθετα μένουν εκεί για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα μέχρι να συμβεί η οποιαδήποτε, έστω και μικρή μεταβολή που θα τους δώσει την ευκαιρία να μεταπηδήσουν σε κάποιο άλλο υλικό.

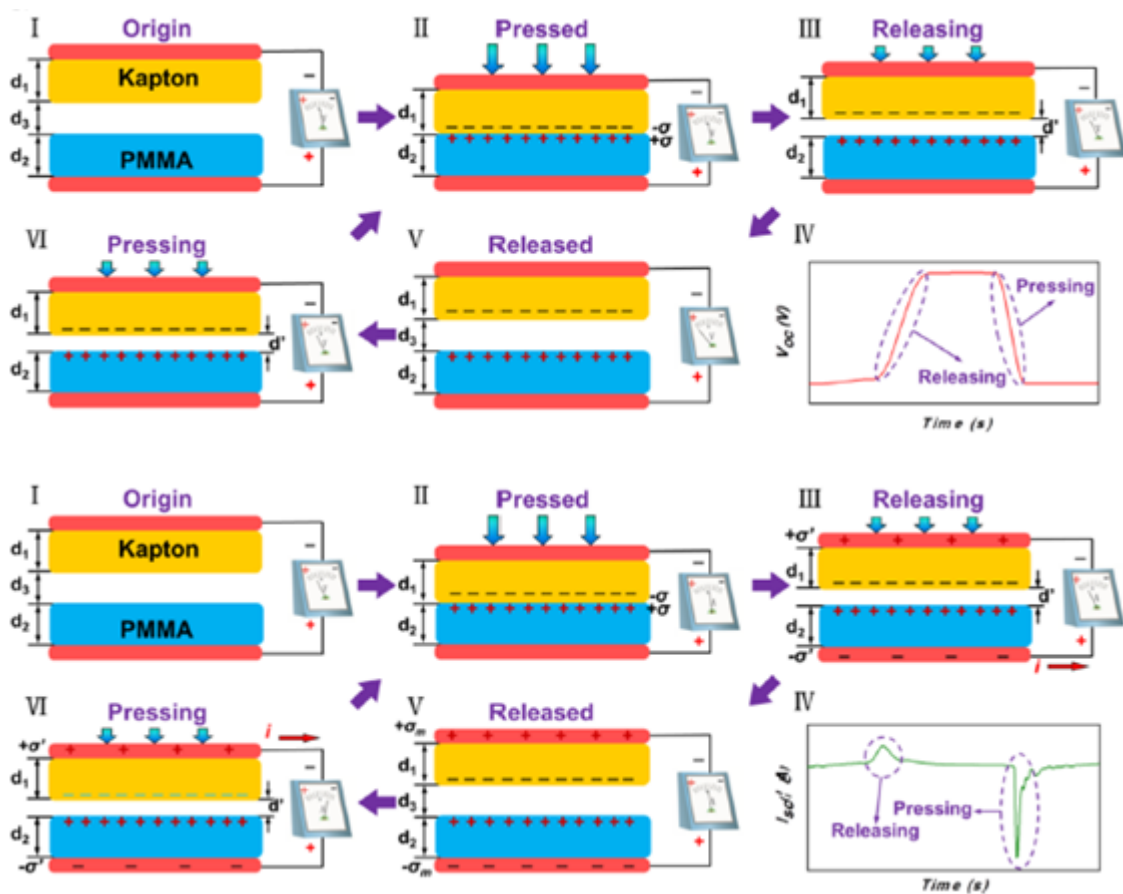
Δύο υλικά που μεταφέρουν φορτία διαφορετικής πολικότητας και πραγματοποιούν σχετική κίνηση στο χώρο, δημιουργούν διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Σε συνδυασμό με τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού φορτίου στα άκρα των υλικών, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα συνεπώς και μεταφορά ισχύος. Σε αυτή τη διαδικασία, η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για την τριβή των δυο υλικών, μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Μία τριβοηλεκτρική νανογεννήτρια (TENG) είναι ικανή να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από κάθε μορφή μηχανικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες στρατηγικές για την εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας όταν εμφανίζεται με μορφή επαφής ή ολίσθησης υλικών. Παρακάτω γίνεται περιγραφή μερικών εκ των πιο δημοφιλών τεχνικών για τη κατασκευή των γεννητριών TENG, με σχηματικά διαγράμματα τάσεων και ρευμάτων όπως αναπτύσσονται σε αυτές.

## Επαφή :

Αποτελεί τη βασική μορφή παραγωγής ενέργειας. Η κατεύθυνση κίνησης είναι κάθετη στην επιφάνεια που φορτίζεται. Για τη κατασκευή της γεννήτριας μπορεί να γίνει χρήση Polymethyl (PMMA) σε συνδυασμό με Polyimide (Kapton).

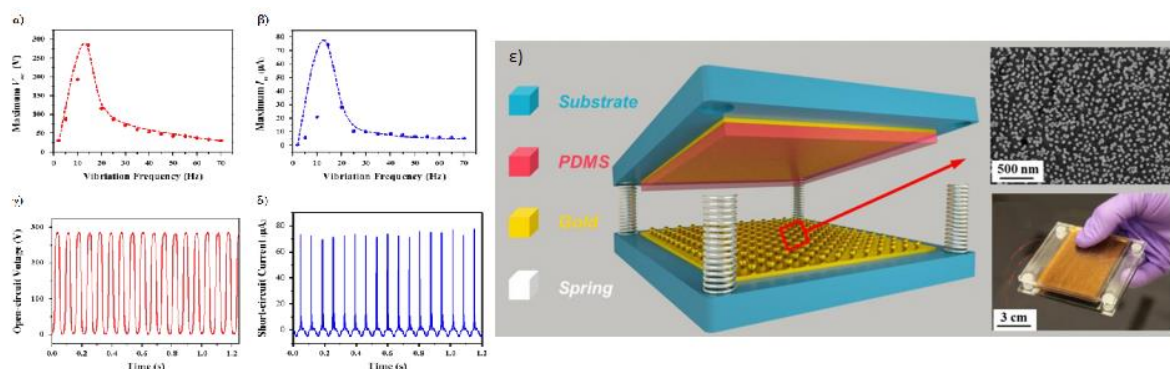
Στη κατάσταση κατά την οποία τα υλικά δεν βρίσκονται σε επαφή, η μεταφορά φορτίου δεν μπορεί να συμβεί μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο κύκλος λειτουργίας της συγκεκριμένης γεννήτριας. Με την εφαρμογή εξωτερικής δύναμης, τα δύο υλικά έρχονται σε επαφή. Σύμφωνα με τα φαινόμενα που αναλύθηκαν παραπάνω, τα αρνητικά φορτία περνάνε από το PMMA στο Kapton, αφήνοντας έτσι στην επιφάνεια του PMMA θετικά φορτία. Καθώς το PMMA απομακρύνεται, διαφορά δυναμικού ξεκινά να εμφανίζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, μέχρις ότου η απόσταση γίνει θεωρητικά άπειρη και μεταβούμε στην αρχική κατάσταση.



Σχήμα 2.1 - Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από επαφή [38].

### Παραγωγή από αδρανειακή δύναμη:

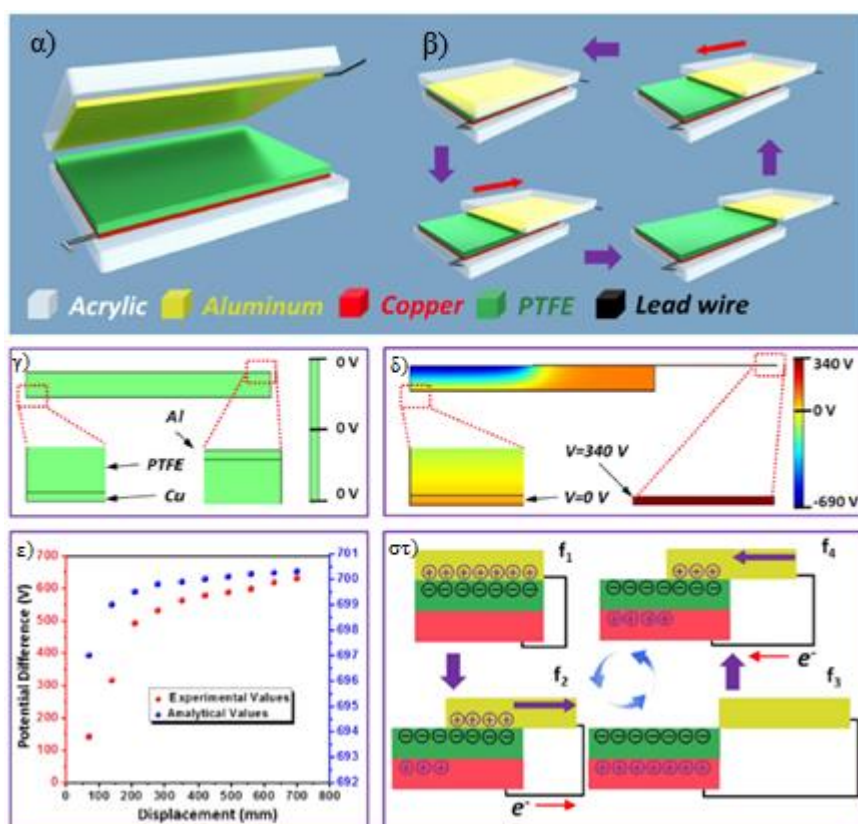
Η σχετική κίνηση μεταξύ δύο φορτισμένων υλικών μπορεί επίσης να προκληθεί από αδρανειακή δύναμη, δίνοντας τη δυνατότητα για αξιοποίηση μηχανικής ενέργειας από δόνηση. Η δομή της συγκεκριμένης γεννήτριας αποτελείται από δύο διαφορετικά εξαρτήματα (υλικά ικανά για τη δημιουργία τριβοηλεκτρικού φαινομένου) που είναι συνδεδεμένα με ελατήρια στις γωνίες και βρίσκονται σε επαφή. Αν στο ένα εξάρτημα εφαρμοστεί μία πηγή δονήσεων και το άλλο παραμένει ελεύθερο, τότε τα δύο υλικά πρόκειται να έρχονται σε συνεχή περιοδική επαφή και απομάκρυνση. Το παραπάνω φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης. Η ποιότητα της παραγόμενης ισχύος εξαρτάται από την απόδοση των δονήσεων, οι οποίες είναι ανάλογες της συχνότητας εφαρμογής, και μπορούν να ρυθμιστούν από χαρακτηριστικά όπως η μάζα του ελεύθερου εξαρτήματος και η ελαστικότητα των ελατηρίων. Παράδειγμα των σημάτων και της κατασκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2** - α) Τάση ανοικτοκύκλωσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, β) Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, γ) Τάση ανοικτοκύκλωσης σε συχνότητα λειτουργίας 14.5Hz, δ) Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συχνότητα λειτουργίας 14.5Hz, ε) Δομή του TENG [38].

## Ολίσθηση :

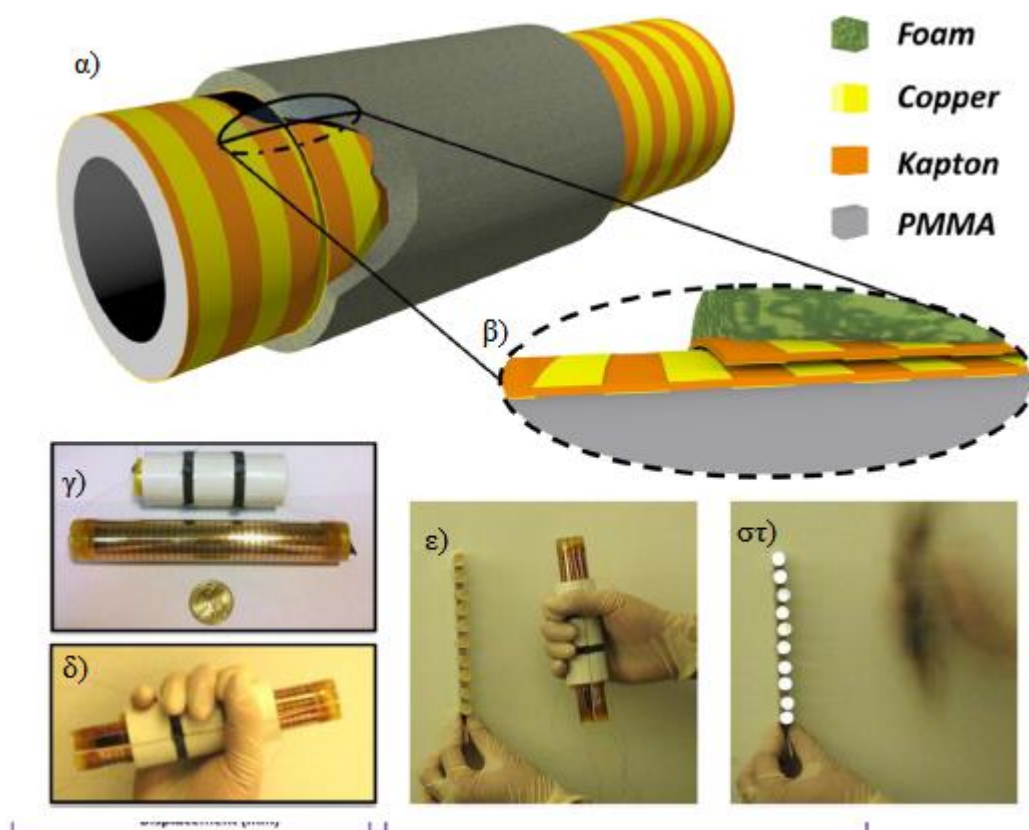
Δύο φορτισμένες επιφάνειες μπορούν να πραγματοποιήσουν η καθεμία, σχετική κίνηση η οποία είναι παράλληλη στην απέναντι επιφάνεια. Η βασική δομή του sliding TENG φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Περιέχει δύο επαπτόμενες επιφάνειες οι οποίες μπορούν να ολισθήσουν ομαλά η μία πάνω στην άλλη. Στην μία επιφάνεια, υπάρχει ένα λεπτό φιλμ αλουμινίου, το οποίο κατέχει το ρόλο τόσο του ηλεκτροδίου, όσο και της ολισθηρής επιφάνειας. Στην άλλη επιφάνεια, ένα ηλεκτρόδιο χαλκού βρίσκεται ανάμεσα στο υπόστρωμα και ενός PTFE φιλμ το οποίο δρα και αυτό ως ολισθηρή επιφάνεια. Σε αρχική θέση, οι δύο ολισθηρές επιφάνειες είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες. Με την άσκηση μιας επαπτόμενης δύναμης στο ένα υπόστρωμα, δημιουργείται σχετική κίνηση του υλικού. Όταν τα δύο υποστρώματα βρίσκονται πλήρως απομακρυσμένα, η αντιδραστική δύναμη τα επαναφέρει στην αρχική τους θέση. Τη στιγμή που το PTFE φιλμ έρθει σε επαφή με το φιλμ αλουμινίου, δημιουργείται τριβοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην αρχική θέση, τα θετικά τριβοηλεκτρικά φορτία που εμφανίζονται στο αλουμίνιο είναι ισάριθμα με εκείνα των αρνητικών φορτίων επάνω στην επιφάνεια του PTFE. Τη στιγμή που ξεκινά η μετακίνηση των δύο υλικών, εμφανίζεται ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ τους.



**Σχήμα 2.3** - α) Υλικά, β) και στ) σχετική κίνηση, γ) και δ) Σημεία διαφοράς δυναμικού, ε) τάση-απόσταση [38].

### Παραγωγή από ευθύγραμμη κίνηση :

Η μέθοδος αυτή υλοποιείται με τοποθέτηση ενός TENG μέσα σε μια κάψουλα και βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της ολίσθησης. Η αντίστοιχη δομή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Περιέχει δύο ομοκεντρικούς κυλίνδρους οι οποίοι μπορούν να ολισθήσουν μεταξύ τους. Η κάψουλα είναι στενά περιτυλιγμένη γύρω από τον εξωτερικό κύλινδρο, περιορίζοντας έτσι την κίνηση των δύο κυλίνδρων σε μονοδιάστατη ομοαξονική. Για την ανάπτυξη του τριβοηλεκτρικού φαινομένου έγινε η χρήση polyimide, στις πλευρές του οποίου τοποθετήθηκαν λωρίδες χαλκού ανά μερικά εκατοστά ενώ προστέθηκε πίσσα ανάμεσά τους. Η συσκευή αυτή έχει ως σκοπό να αξιοποιεί κάθε είδους κίνηση. Με μια μικρή κίνηση της κάψουλας, το TENG είναι ικανό να τροφοδοτήσει έως και δέκα LEDs σε παράλληλη σύνδεση. Επίσης μπορεί να τοποθετηθεί σε αρκετά σημεία του ανθρώπινου σώματος (όπως πχ. χέρια, πόδια, ώμοι κλπ.), κατά την καθημερινή κίνηση των οποίων θα μπορούν να φορτιστούν μικροηλεκτρονικές συσκευές.

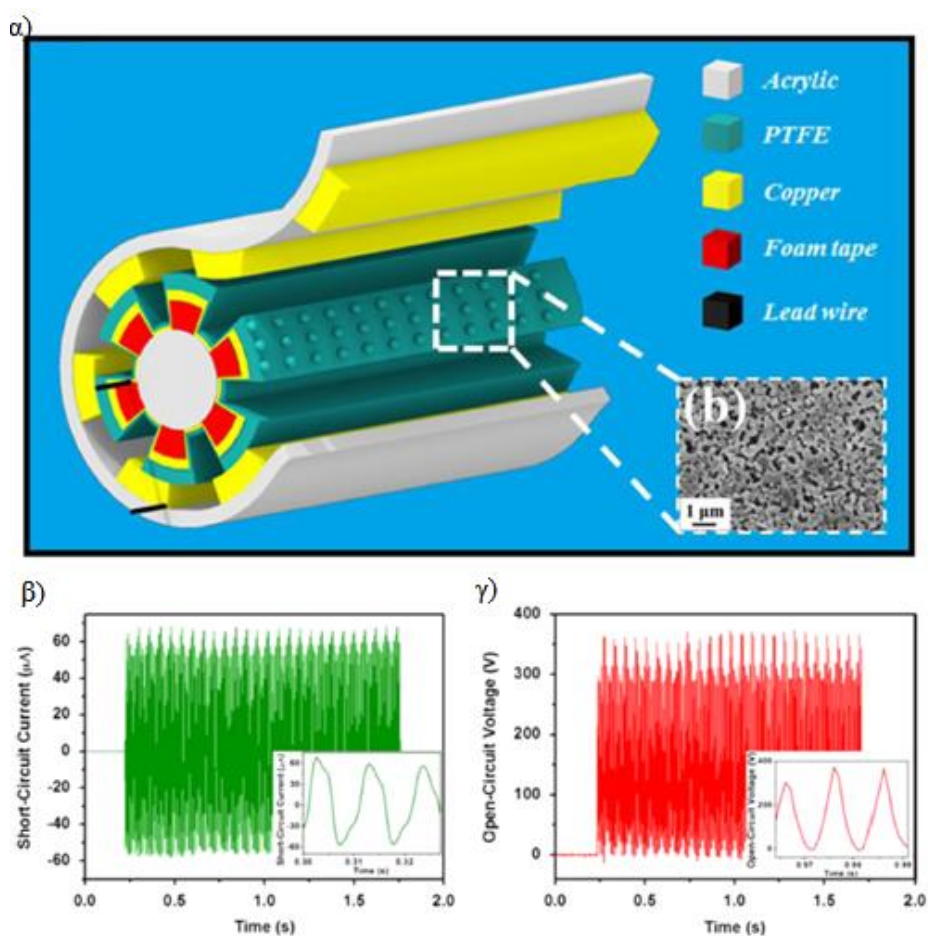


**Σχήμα 2.4** - α) Σχηματική περιγραφή TENG, β) Προβολή διατομής, γ) πριν, δ) μετά την συναρμολόγηση, ε) και στ) Αποτελέσματα λειτουργίας [38].



### Παραγωγή από περιστροφή :

Μια ομοαξονική κυλινδρική δομή περιστρεφόμενου TENG έχει αναπτυχθεί προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τη μηχανική ενέργεια που προκύπτει από περιστροφή. Ένα TENG με συνολική επιφάνεια 12 τετραγωνικών εκατοστών περιέχει μερικές λωρίδες υλικού, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Μια κατασκευή με οκτώ λωρίδες σε μια γραμμική περιστροφική κίνηση με ταχύτητα 1.33 m/s μπορεί να φτάσει τιμές ρεύματος βραχυκύκλωσης μέχρι 90  $\mu\text{A}$  και τάση ανοικτοκύκλωσης έως 410 V (τιμές κορυφής), παρουσιάζοντας έτσι μια πυκνότητα ισχύος στα 36.9 W/m<sup>2</sup> [38]. Η πυκνότητα ισχύος αυτή μπορεί να αναπτυχθεί με τη χρήση περισσότερων λωρίδων ή με μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Δεδομένου ότι η περιστροφή αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες κινήσεις στο περιβάλλον, η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει προοπτικές ανάπτυξης, από τις ρόδες αυτοκινήτων, μέχρι και σε υποθαλάσσια ρεύματα. Τα υλικά κατασκευής, καθώς και οι τιμές τάσης ανοικτοκύκλωσης και ρεύματος βραχυκύκλωσης φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 - α) Σχηματικό διάγραμμα της γεννήτριας, β) Ρεύμα βραχυκύκλωσης και γ) Τάση ανοικτοκύκλωσης [38].



Συμπερασματικά με βάση τα ανωτέρω, η τάση των TENGs είναι εναλλασσόμενη ενώ παρουσιάζει και μια συνιστώσα DC. Η τάση ανοικτοκύκλωσης των γεννητριών κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Volt έως και μερικές χιλιάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους. Ωστόσο, το ρεύμα βραχυκύκλωσης που διαθέτουν είναι ιδιαίτερα μικρό, καθώς οι χωρητικές σύνθετες αντιστάσεις το περιορίζουν στις τιμές των  $\mu A$ .

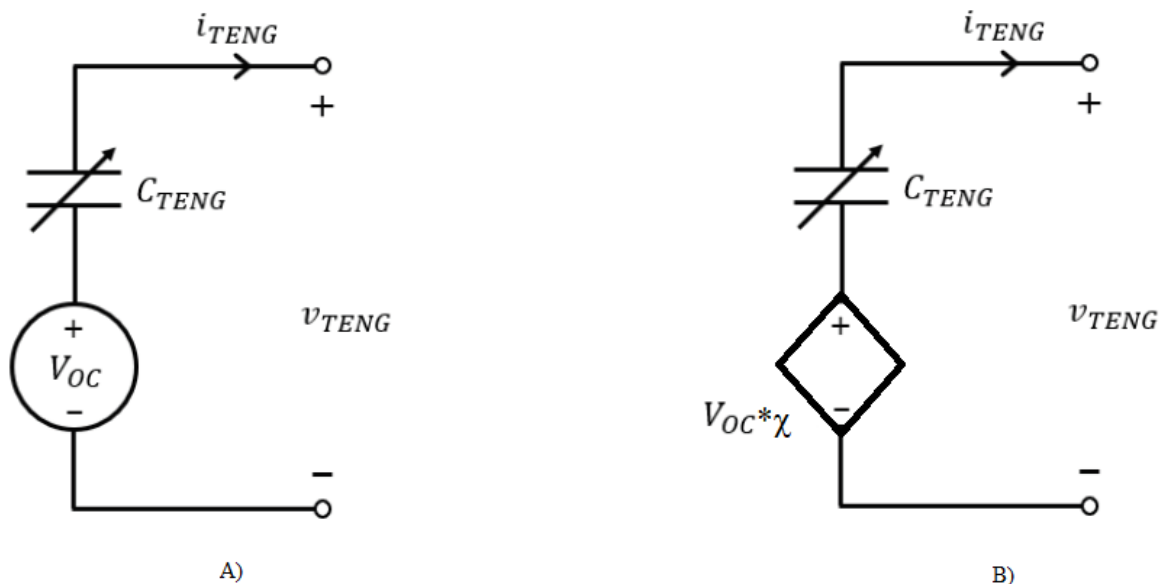
Τέλος, τα TENGs εμφανίζουν όπως τονίστηκε και στην αρχή, πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος (της τάξης των  $10-50 W/m^2$ ) συνεπώς μπορούν να λογισθούν ως προσιτή πηγή ενέργειας.

Συνοψίζοντας, η χρήση των TENG είναι ιδανική για την φόρτιση μικροηλεκτρικών συσκευών όπως πχ. κινητά τηλέφωνα ή smartwatch, καθώς δεν απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας. Επιπλέον, μπορούν να φανούν χρήσιμα και σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπως αιολικά πάρκα, υποθαλάσσιους σταθμούς και άλλα, όπου η μηχανική ενέργεια είναι ιδιαίτερα υψηλή και σε συνδυασμό με την δυνατότητα αύξησης μεγέθους της γεννήτριας είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικά υψηλών επιπέδων παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

## 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα & Χαρακτηριστικές

Όπως προαναφέρθηκε μελετήθηκαν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις των τριβοηλεκτρικών γεννητριών. Το πρώτο μοντέλο υλοποίησης αποτελείται από μια ιδανική πηγή εναλλασσόμενης τάσης σε διάφορες συχνότητες και πλάτη όπως αυτά δίνονται στη βιβλιογραφία (ενδεικτικά 140 Volt @ 1 Hz και 110 Volt @ 50 Hz). Η πηγή τάσης συνδέεται σε σειρά με ένα μεταβλητό πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα ρυθμίζεται από τις εξισώσεις (1.1), (1.2) και (1.3) όπως μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Στη συνέχεια, το μοντέλο τροποποιήθηκε, αφαιρώντας την ιδανική πηγή τάσης και τοποθετώντας στη θέση της μια ελεγχόμενη πηγή τάσης. Η ελεγχόμενη πηγή τάσης ενώ έχει ημιτονοειδή μορφή, περιέχει και μια συνιστώσα DC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (γ) και 2.5 (γ). Οι συχνότητες παρέμειναν όπως ήταν, ωστόσο το πλάτος, διέφερε ανάλογα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία (ενδεικτικά 100 Volt, 140 Volt, 280 Volt, 400 Volt και 3000 Volt). Τα ισοδύναμα κυκλώματα και για τις δύο υλοποιήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.

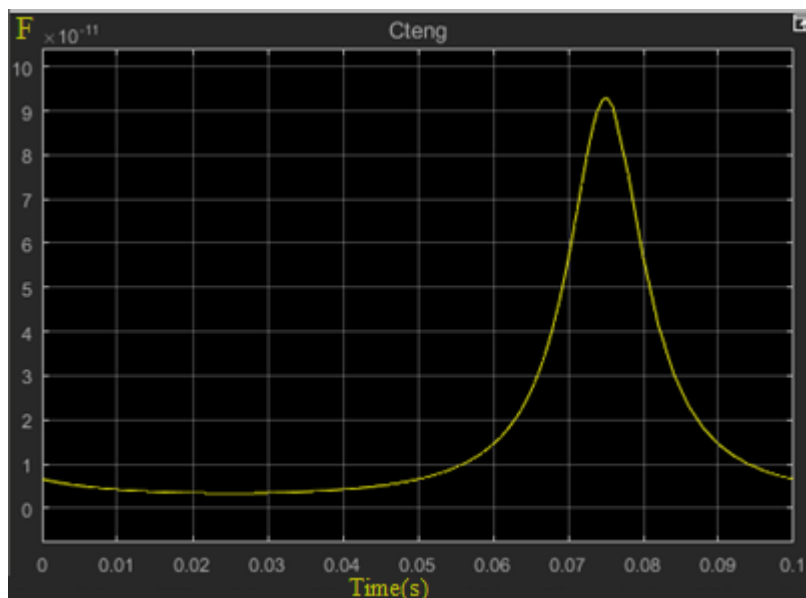


**Σχήμα 2.6** - Α) Ιδανική πηγή τάσης Β) Ελεγχόμενη πηγή τάσης, εξαρτώμενη από την απόσταση  $\chi$ .

Για την υλοποίηση του μεταβλητού πυκνωτή, οι εξισώσεις (1.1), (1.2), (1.3) έλαβαν τις τιμές τους από τον Πίνακα 2.1. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση χωρητικότητας TENG,  $C_{TENG}$  από το περιβάλλον Simulink σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου.

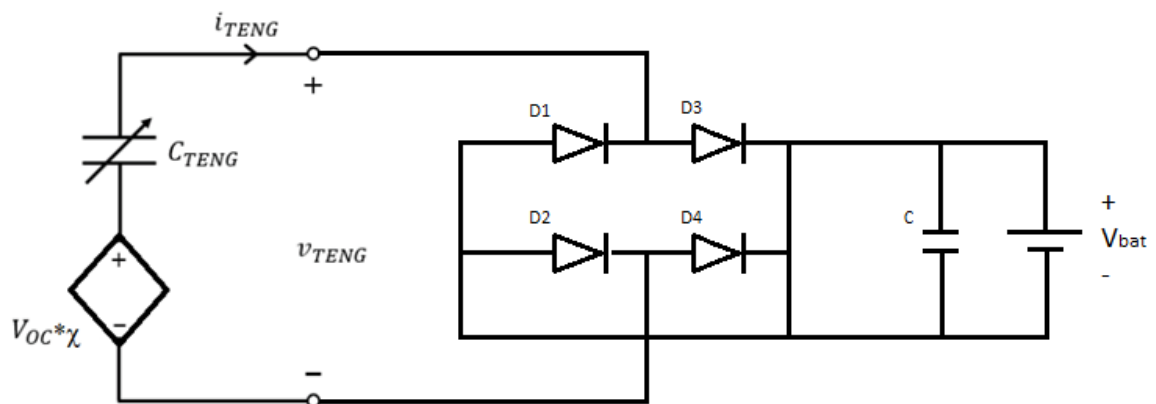
**Πίνακας 2.1** – Τιμές διαστάσεων και υλικών τριβοηλεκτρικής γεννήτριας [35].

Μεταβλητές	Τιμές
$A$	$4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$\varepsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
$\varepsilon_{r1}$	2.1
$\varepsilon_{r2}$	10
$d_1$	$80 \times 10^{-6} \text{ m}$
$d_2$	$30 \times 10^{-6} \text{ m}$
$\sigma$	$1.24 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$

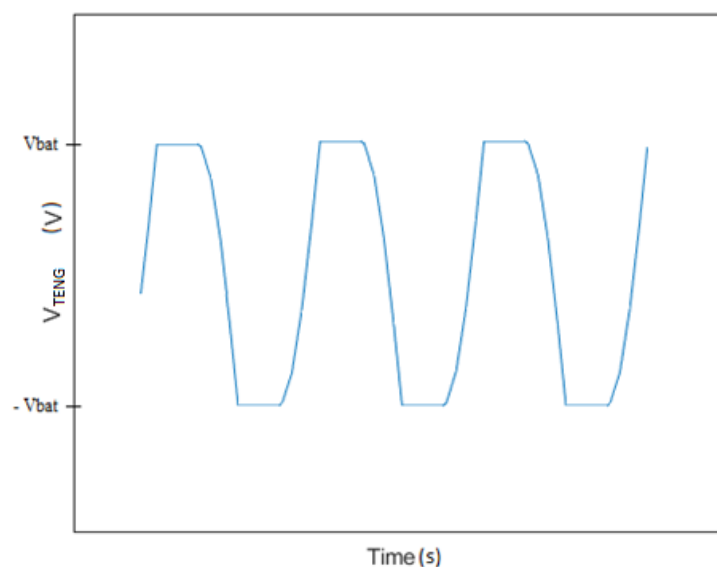


**Σχήμα 2.7** – Γραφική αναπαράσταση χωρητικότητας TENG σε μια περίοδο με συχνότητα 10 Hz.

Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας θεωρούμε πως η συχνότητα τριβής των υλικών της βρίσκεται στο 1 Hz. Για τον υπολογισμό των ρευμάτων, τάσεων, φορτίου, ισχύος αλλά και τις σχέσεις μεταξύ αυτών, οι μετρήσεις έγιναν στο συμβατικό κύκλωμα που αποτελείται από γεννήτρια, ανορθωτή και μπαταρία στη θέση του φορτίου σύμφωνα με την τοπολογία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Οι χαρακτηριστικές αφορούν και τα δύο μοντέλα TENG που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της τάσης,  $v_{TENG}$ , της γεννήτριας σε συνάρτηση με το χρόνο. Παρατηρείται ψαλιδισμός στην τάση, καθώς ο ανορθωτής γέφυρας δεν αφήνει την γεννήτρια να υπερβεί την τιμή της μπαταρίας  $V_{bat}$ .

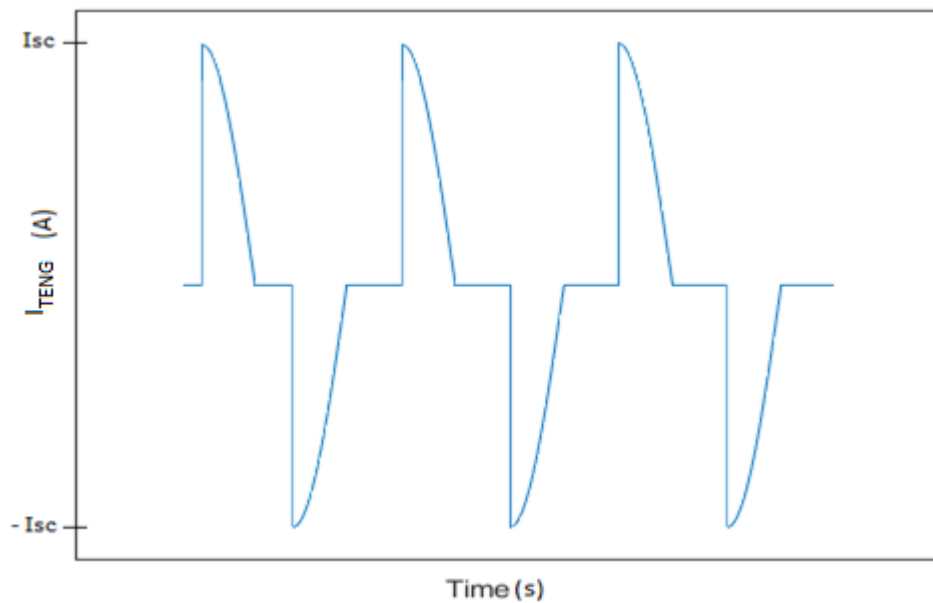


Σχήμα 2.8 - Συμβατικό κύκλωμα απευθείας φόρτισης.

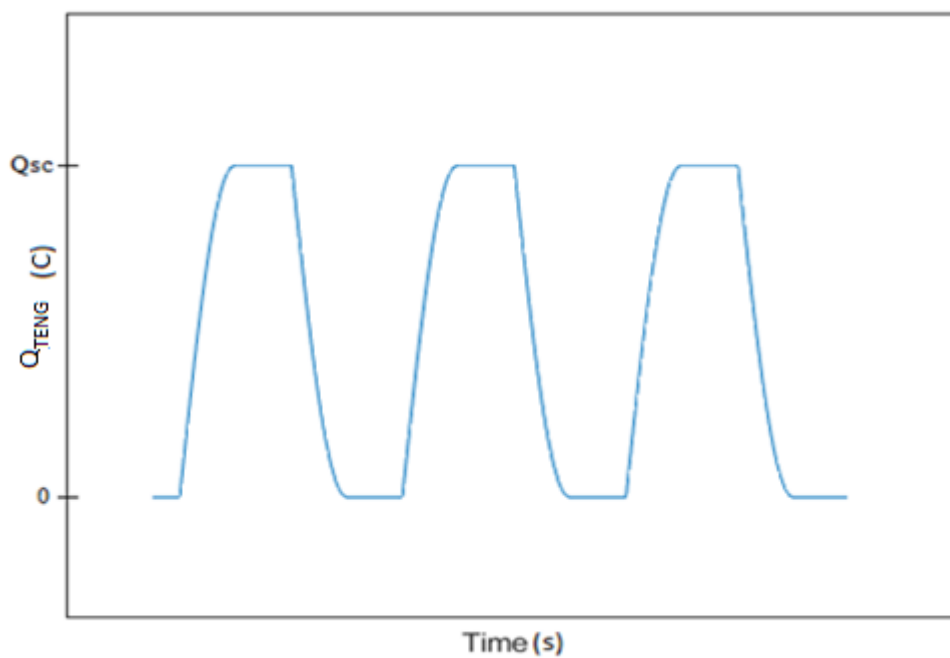


Σχήμα 2.9 - Γραφική αναπαράσταση τάσης-χρόνου της γεννήτριας.

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος της γεννήτριας  $i_{TENG}$  σε συνάρτηση με το χρόνο. Στη συνέχεια, για την πορεία του φορτίου  $Q_{TENG}$  της γεννήτριας με την πάροδο του χρόνου, χρησιμοποιήθηκε ένας ολοκληρωτής στο ρεύμα και έγινε καταγραφή των αποτελεσμάτων στο Σχήμα 2.11 (όπου  $I_{sc}$  είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και  $Q_{sc}$  η μέγιστη τιμή του φορτίου βραχυκύκλωσης).



**Σχήμα 2.10** - Γραφική αναπαράσταση ρεύματος-χρόνου της γεννήτριας.



**Σχήμα 2.11** - Γραφική αναπαράσταση φορτίου-χρόνου της γεννήτριας.

Στη γραφική παράσταση του φορτίου παρατηρείται ψαλιδισμός. Στις τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την μεγιστοποίηση παραγωγής ισχύος θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο, η τιμή του φορτίου μπορεί να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή για το σύστημα.

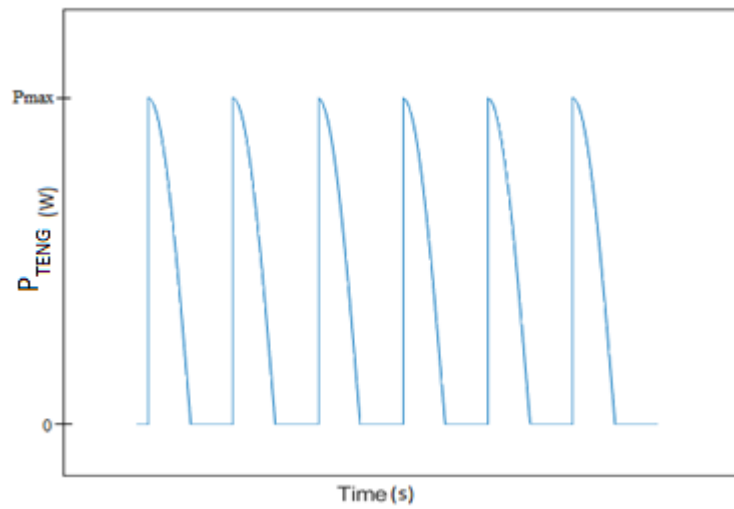
Τέλος, η γραφική αναπαράσταση της ισχύος της γεννήτριας κατά τη πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12, όπου  $P_{\max}$  είναι η μέγιστη τιμή ισχύος.

Με την ανωτέρω ολοκληρώνεται η μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε συνάρτηση με το χρόνο, καθώς στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στις σχέσεις που παρουσιάζουν αυτά μεταξύ τους, ξεκινώντας από τη χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος.

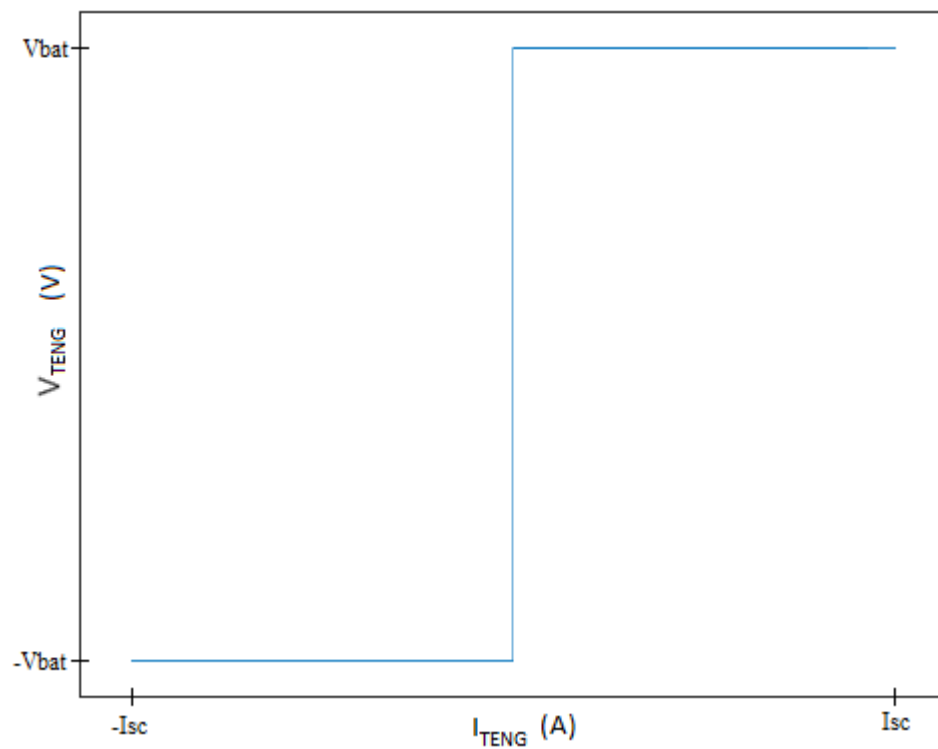
Η χαρακτηριστική περιγράφεται στο Σχήμα 2.13, και ο κύκλος λειτουργίας φόρτισης της γεννήτριας ακολουθεί.

Στην αρχική θέση ( $V_{\text{TENG}} = I_{\text{TENG}} = 0$ ), η  $V_{\text{TENG}}$  ξεκινά να αυξάνεται όσο το  $I_{\text{TENG}}$  παραμένει σταθερό. Όταν η  $V_{\text{TENG}}$  φτάσει τη μέγιστη δυνατή τιμή, δηλαδή εκείνη της  $V_{\text{bat}}$ , ξεκινά να αναπτύσσεται το  $I_{\text{TENG}}$ , διατηρώντας την  $V_{\text{TENG}}$  σταθερή σε αυτή τη τιμή. Το  $I_{\text{TENG}}$  φτάνει τη μέγιστη τιμή  $I_{\text{sc}}$ , και στη συνέχεια επιστρέφει στο μηδέν, τότε η  $V_{\text{TENG}}$  ξεκινά να αναπτύσσεται από τα αρνητικά. Τη στιγμή που η  $V_{\text{TENG}}$  θα αποκτήσει τη μέγιστη αρνητική τιμή, θα παραμείνει σταθερή ξανά, και το  $I_{\text{TENG}}$  θα ξεκινήσει τη δική του αρνητική πορεία, μέχρι να μηδενιστούν και τα δύο σήματα και να ξαναρχίσει ο κύκλος.

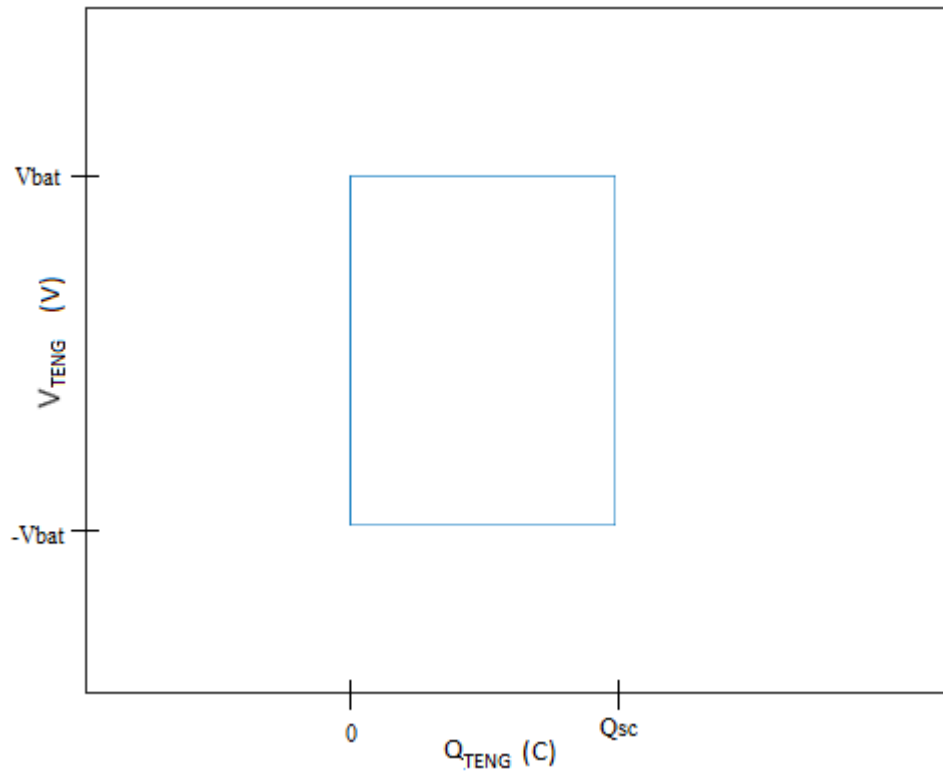
Ομοίως και για την χαρακτηριστική τάσης-φορτίου, η πορεία της  $V_{\text{TENG}}$  είναι ίδια με πριν. Όταν η  $V_{\text{TENG}}$  φτάσει στη μέγιστη τιμή το  $Q_{\text{TENG}}$  ξεκινά να αυξάνεται. Τη στιγμή που το  $I_{\text{TENG}}$  φτάνει σε μηδενική τιμή, το  $Q_{\text{TENG}}$  αποκτά τη μέγιστη δυνατή τιμή του, το  $Q_{\text{TENG}}$  διατηρεί την τιμή αυτή και η  $V_{\text{TENG}}$  ξεκινά να φθίνει μέχρι να φτάσει στο αντίστοιχο αρνητικό μέγιστο. Εκείνη τη στιγμή το  $Q_{\text{TENG}}$  οδεύει προς το μηδέν. Η αντίστοιχη χαρακτηριστική παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.12 - Γραφική αναπαράσταση ισχύος-χρόνου της γεννήτριας.



Σχήμα 2.13 - Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της γεννήτριας.



**Σχήμα 2.14** - Χαρακτηριστική τάσης-φορτίου της γεννήτριας.

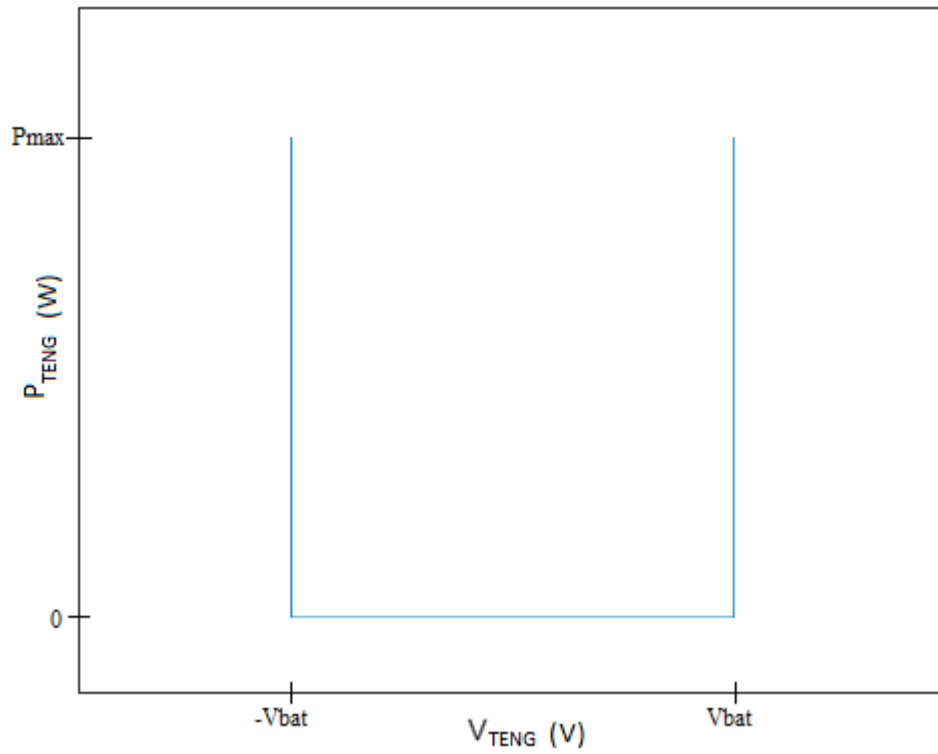
Επίσης, πραγματοποιήθηκε μελέτη των κύκλων των χαρακτηριστικών σε σχέση με την ισχύ.

Πρώτα έγινε μελέτη της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.15. Οι πορείες της  $v_{TENG}$  και του  $i_{TENG}$  είναι γνωστές από την πρώτη χαρακτηριστική που μελετήθηκε στο Σχήμα 2.13. Συνεπώς η χαρακτηριστική του Σχήματος 2.15 θα αποτελεί το ολοκλήρωμα του γινομένου των τιμών των δύο μεγεθών του Σχήματος 2.13.

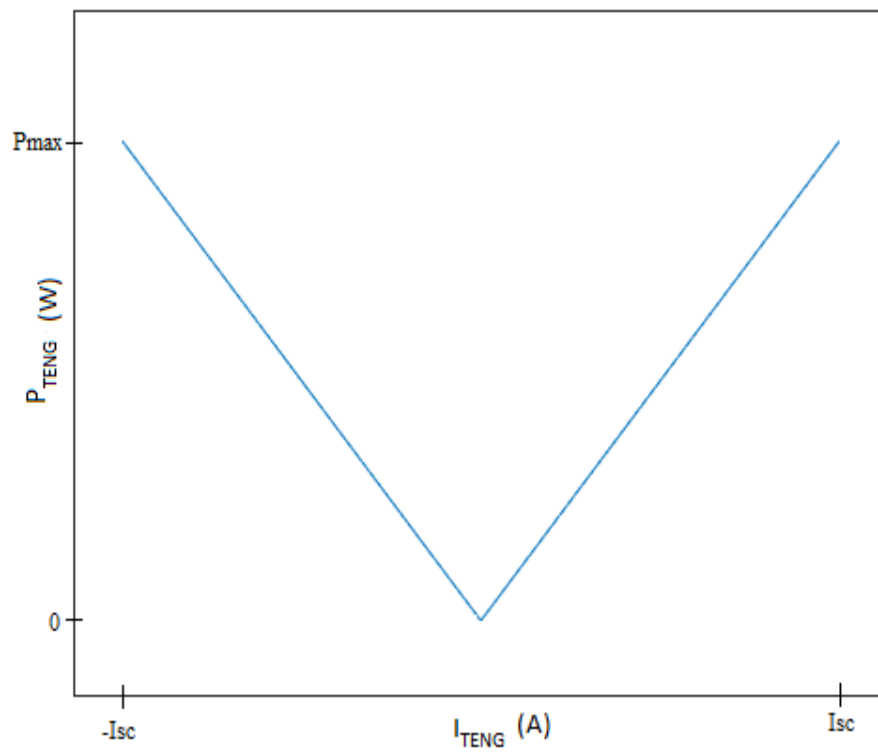
Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική ισχύος-ρεύματος, κατά την οποία παρατηρείται πως η  $P_{TENG}$  αυξάνεται γραμμικά με το  $i_{TENG}$  αφού η  $v_{TENG}$  παραμένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της. Τέλος, από το ολοκλήρωμα του  $I_{TENG}$  προκύπτουν οι τιμές του ηλεκτρικού φορτίου.

Η χαρακτηριστική ισχύος-φορτίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η  $P_{TENG}$  αυξάνεται, καθώς το  $Q_{TENG}$  είναι σταθερά μηδέν και φθίνει εκθετικά όσο το  $Q_{TENG}$  αυξάνεται. Καθώς το  $Q_{TENG}$  διατηρεί τη μέγιστη τιμή του, η  $P_{TENG}$  αυξάνεται μέχρι να φτάσει και εκείνη στο μέγιστο. Στη συνέχεια, και οι δύο παρουσιάζουν φθίνουσα πορεία προς την αρχική τους κατάσταση.

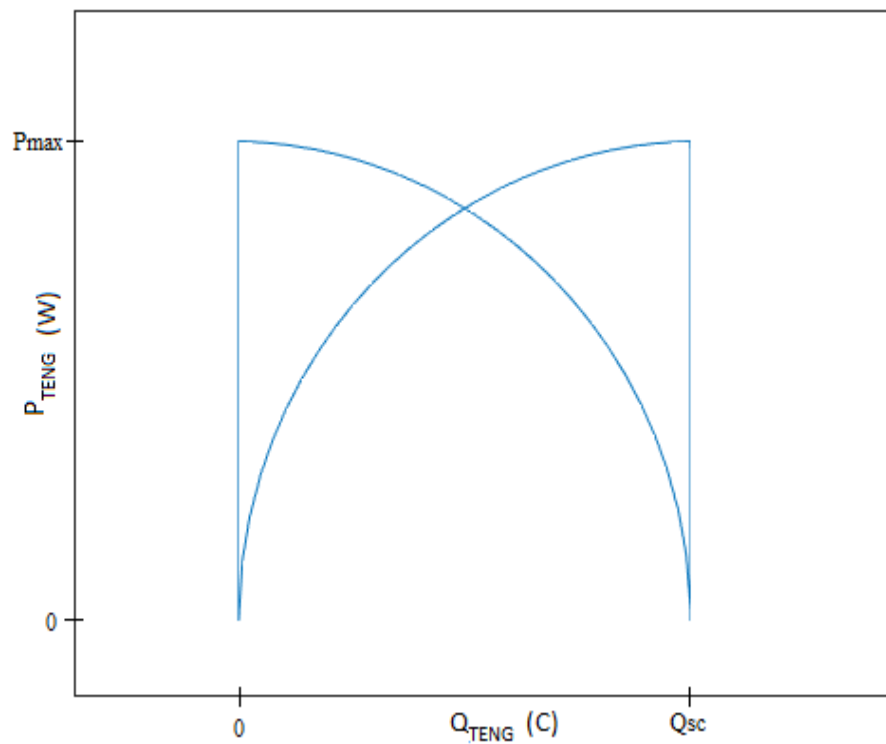




Σχήμα 2.15 – Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της γεννήτριας.



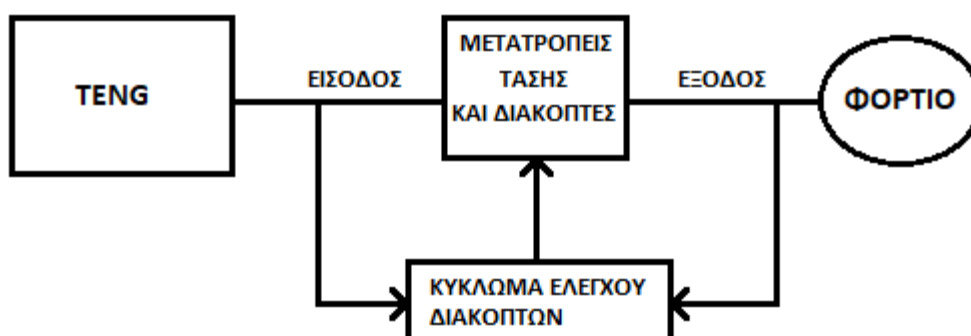
Σχήμα 2.16 – Χαρακτηριστική ισχύος-ρεύματος της γεννήτριας.



**Σχήμα 2.17** – Χαρακτηριστική ισχύος-φορτίου της γεννήτριας.

### 3. Κυκλώματα μετατροπών ισχύος – Περιγραφή των κυκλωμάτων που μελετήθηκαν

Το σύστημα για τη διαχείριση ενέργειας των TENG αποτελείται από ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία επεξεργάζονται την ηλεκτρική ισχύ και αποτελούν τις διεπαφές μεταξύ των πηγών παραγωγής ενέργειας και του φορτίου. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή των δομικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος σε TENG. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα του ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας TENG με βάση το οποίο έγινε η ανάπτυξη των συστημάτων της παρούσας διπλωματικής.



**Σχήμα 3.1** –Διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας TENG.

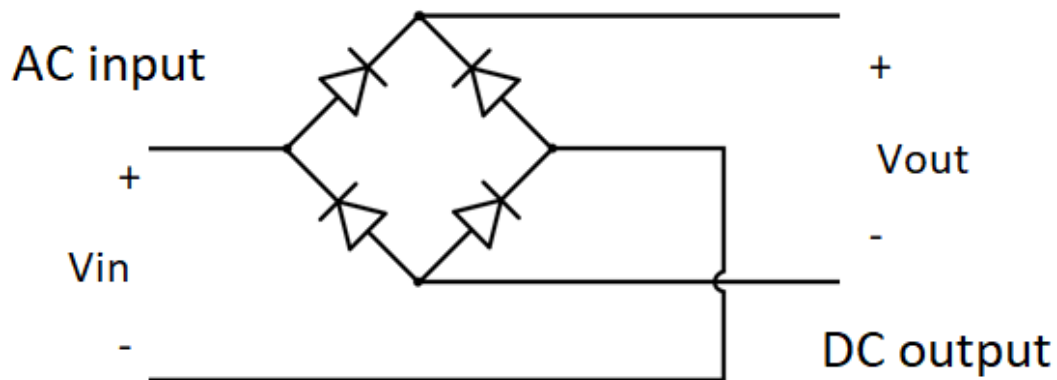
Χρησιμοποιήθηκαν δύο κυκλώματα μετατροπής τάσης, ένα για την μετατροπή εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση (επιλέχθηκε ανορθωτής γέφυρας [AC/DC]) και ένα για τον υποβιβασμό συνεχούς τάσης (επιλέχθηκε μετατροπέας Buck [DC/DC]). Τα παραπάνω συνδέονται διαδοχικά με απώτερο σκοπό την ορθή διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος στο σύστημα.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας περιλαμβάνει κυκλώματα ελέγχου διακοπών προκειμένου να επιτύχει υψηλές τιμές ισχύος τόσο στα άκρα της γεννήτριας όσο και στα άκρα του φορτίου.

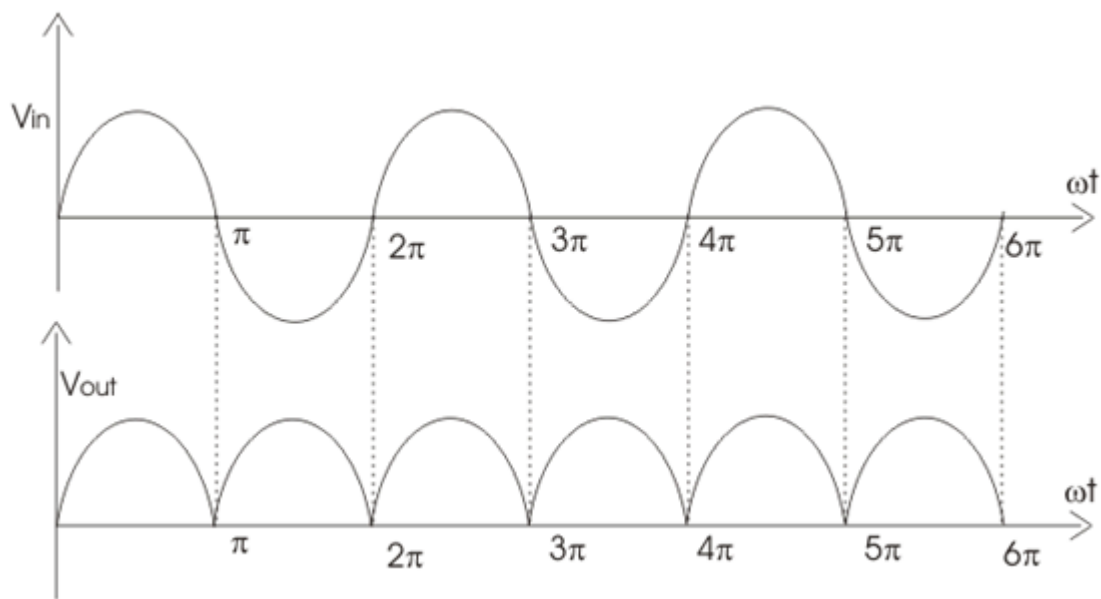
### 3.1 Ανορθωτής Γέφυρας

Ο ανορθωτής γέφυρας είναι μια διάταξη τεσσάρων διόδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Η συνηθέστερη εφαρμογή του είναι για μετατροπή μιας εισόδου εναλλασσόμενης τάσης (AC) σε έξοδο συνεχούς τάσης (DC).

Ένας ανορθωτής γέφυρας χρησιμοποιεί τις τέσσερις διόδους ως ζευγάρια για την κατεύθυνση του ρεύματος. Ένα ζευγάρι για την θετική ημιπερίοδο και ένα για την αρνητική. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου του ανορθωτή. Με τη χρήση ενός πυκνωτή στην έξοδο του ανορθωτή, η τάση μετατρέπεται σε συνεχή με μια μικρή διακύμανση, η οποία ρυθμίζεται από την χωρητικότητα του πυκνωτή.



Σχήμα 3.1 – Τοπολογία ανορθωτή γέφυρας.

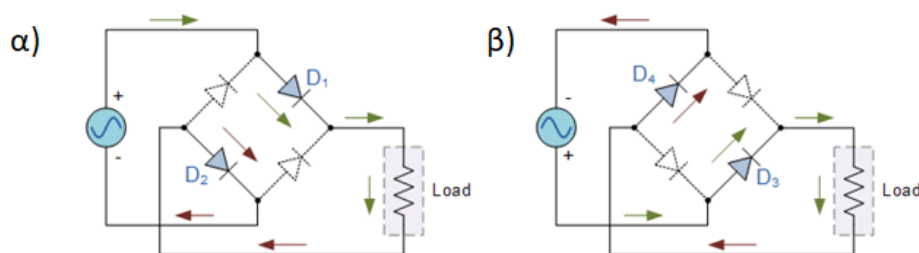


**Σχήμα 3.2** – Γραφική αναπαράσταση των τάσεων εισόδου και εξόδου του ανορθωτή γέφυρας.

Καθώς το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο έχει πάντα την ίδια κατεύθυνση, η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του έχει πάντα θετικό πρόσημο. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η ροή ρεύματος σε μια περίοδο σε ένα κύκλωμα πηγής-ανορθωτή-φορτίου.

**ΘΕΤΙΚΗ ΗΜΙΠΕΡΙΟΔΟΣ ΤΑΣΗΣ ΠΗΓΗΣ**

**ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΗΜΙΠΕΡΙΟΔΟΣ ΤΑΣΗΣ ΠΗΓΗΣ**



**Σχήμα 3.3** – Ροή ρεύματος σε διάταξη ανορθωτή γέφυρας: α) στην θετική ημιπερίοδο β) στην αρνητική ημιπερίοδο.

### 3.2 Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης (Buck Converter)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buck converter) αποτελεί δημοφιλή υποκατηγορία των διακοπτικών μετατροπέων ισχύος (switching converters).

Οι διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές DC κινητήριων συστημάτων και σε DC τροφοδοτικά. Βασική τους λειτουργία είναι η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης η οποία εφαρμόζεται στην είσοδο τους σε μία διαφορετικής τιμής συνεχή τάση στην έξοδο τους, με τη χρήση διακοπών και τεχνικές ελέγχου αυτών. Η DC τάση στην έξοδο είναι είτε μεγαλύτερου είτε μικρότερου πλάτους από την είσοδο. Αποθηκεύουν προσωρινά την ενέργεια εισόδου, και την απελευθερώνουν μετά στην έξοδο σε ένα διαφορετικό επίπεδο τάσης. Η προσωρινή αποθήκευση αυτή γίνεται είτε σε επαγωγικά στοιχεία αποθήκευσης μαγνητικού πεδίου όπως τα πηνία, είτε σε χωρητικά στοιχεία αποθήκευσης ηλεκτρικού πεδίου όπως οι πυκνωτές.

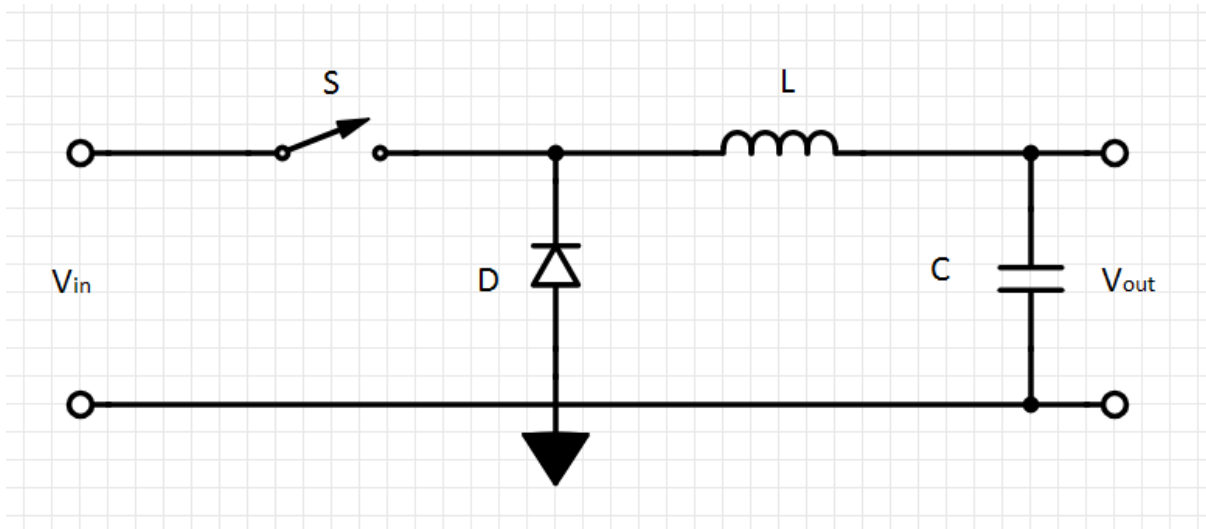
Οι διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC εξασφαλίζουν μια σταθερή DC τάση στην έξοδο τους, η οποία είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη τόσο για την λειτουργία διαφόρων ηλεκτρονικών συσκευών όσο και σε εφαρμογές όπως η εύρεση της μέγιστης δυνατής ισχύος της πηγής εισόδου, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Οι βασικές τοπολογίες των μετατροπέων DC/DC είναι τρεις: Buck Converter, Boost Converter και Buck-Boost Converter. Στην παρούσα εργασία, καθώς απαιτείται υποβιβασμός συνεχούς τάσης από την υψηλή τιμή τάσης που διαθέτουν οι γεννήτριες σε μικρές τιμές μπαταριών (ενδεικτικά τιμές στο  $\Delta = [1.2, 24]$  V), έγινε χρήση μόνο του μετατροπέα Buck. Στη συνέχεια, πρόκειται να αναλυθεί η λειτουργία του μετατροπέα Buck, καθώς και η τοπολογία αυτού. Ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης μετασχηματίζει μια συνεχή τάση εισόδου σε μια τάση εξόδου με μικρότερο πλάτος. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC τύπου Buck. Ο διακόπτης του μετατροπέα ελέγχεται από ένα τετραγωνικό σήμα Pulse-Width-Modulation (PWM), του οποίου ο κύκλος λειτουργίας  $D_c$  ισούται με:

$$D_c = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3.1)$$

όπου:

$t_{on}$  είναι ο χρόνος για τον οποίο το PWM σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη (s), και

$T_s$  είναι η περίοδος του σήματος PWM.



**Σχήμα 3.4** – Κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης.

Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης έχει ως εξής: όταν ο διακόπτης του μετατροπέα είναι κλειστός, η διόδος (D στο Σχήμα 3.4) είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν διαρρέεται από ρεύμα και έτσι η ενέργεια που παρέχει η πηγή εισόδου διοχετεύεται στο πηνίο L και στο φορτίο. Έτσι η τάση του φορτίου θα είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η πηγή στην είσοδο αποκόπτεται από το κύκλωμα και έτσι το ρεύμα του πηνίου αρχίζει να μειώνεται. Το ρεύμα που μειώνεται δημιουργεί μια πτώση τάσης στα άκρα του πηνίου, το οποίο λειτουργεί ως μια πηγή ρεύματος προς το φορτίο απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη του ενέργεια.

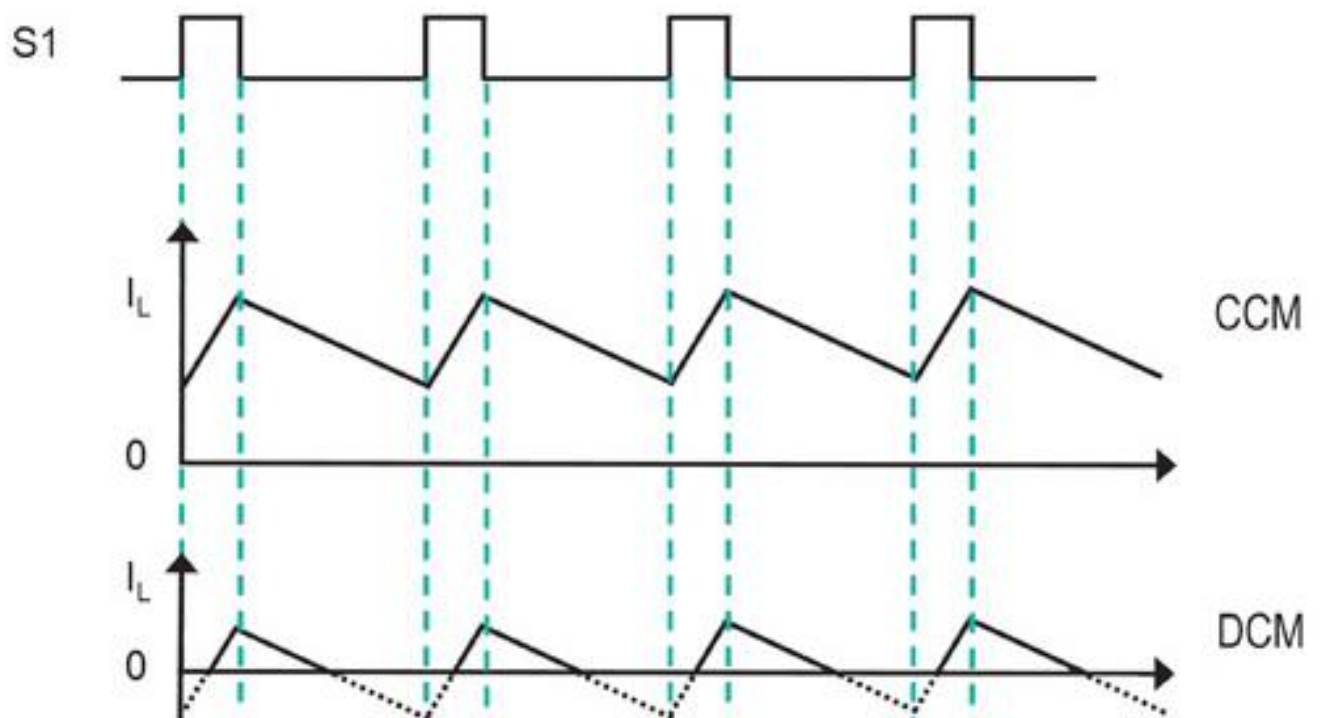
Ένας μετατροπέας DC/DC τύπου Buck μπορεί να λειτουργεί είτε με συνεχή αγωγή ρεύματος (continuous conduction mode), είτε με ασυνεχή αγωγή ρεύματος (discontinuous conduction mode). Όταν ο μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος, το ρεύμα  $I_L$  που διαρρέει το πηνίο δεν γίνεται ποτέ ίσο με το μηδέν κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας. Κατά τη συνεχή αγωγή ρεύματος, που αποτελεί την επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας για την αναλυόμενη εφαρμογή, η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου  $V_{in}$  με την τάση εξόδου  $V_{out}$  και το κύκλο λειτουργίας  $D_c$  δίδεται από τη σχέση:

$$V_{out} = D_c \cdot V_{in} \quad (3.2)$$

Η σχέση αυτή υποδεικνύει ότι η τάση εξόδου θα είναι πάντα μικρότερη ή ίση της τάσης εισόδου καθώς η σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle)  $D_c$  παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή ρεύματος, τότε το πηνίο θα έχει εκφορτιστεί τελείως πριν από το τέλος ενός κύκλου λειτουργίας, συνεπώς το ρεύμα  $I_L$  θα είναι ίσο με μηδέν στο τέλος του κύκλου.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται οι κυματομορφές των ρευμάτων του πηνίου και του σήματος ελέγχου PWM για ένα μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσης που λειτουργεί με συνεχή και ασυνεχή αγωγή ρεύματος, αντίστοιχα.



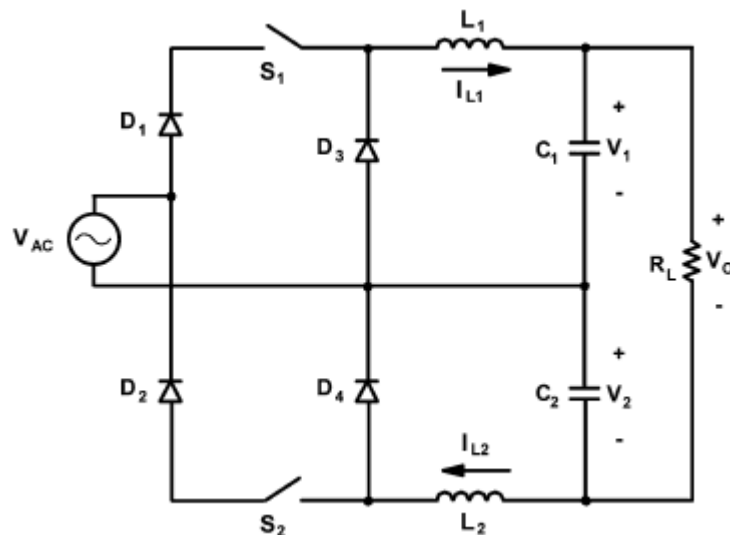
Σχήμα 3.5 – Γραφική αναπαράσταση ρεύματος πηνίου και σήματος PWM σε CCM και DCM.



### 3.3 Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter

Ο Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier αποτελεί το πρώτο κύκλωμα που μελετήθηκε με σκοπό τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Πρόκειται για μια διάταξη ηλεκτρονικών στοιχείων με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη λειτουργία του, μονάχα μία διόδος του ανορθωτή βρίσκεται σε λειτουργία αντί των δύο που χρησιμοποιεί το συμβατικό μοντέλο (βλ. Παράγραφος 3.1). Η τοπολογία αυτή επιπλέον διπλασιάζει την τάση εξόδου του ανορθωτή.

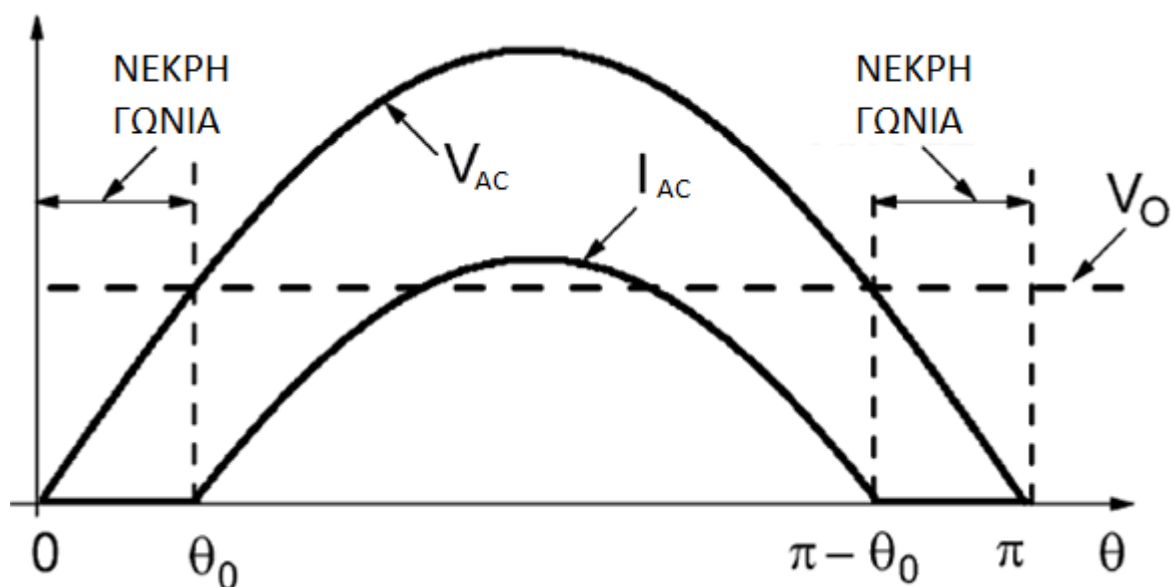
Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η τοπολογία της διάταξης του Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier.



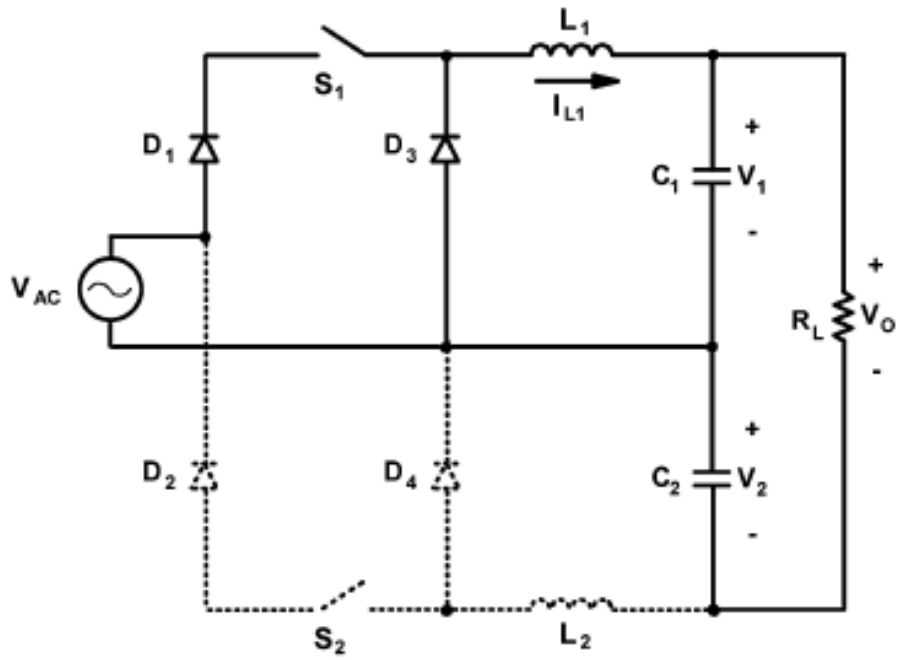
**Σχήμα 3.7** - Τοπολογία του Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier [32].

Ο Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier, περιέχει δύο μετατροπείς Buck, όπου ο ένας τίθεται σε λειτουργία για το πρώτο μισό της περιόδου του σήματος τάσης της πηγής  $V_{AC}$  κατά τις θετικές τιμές και ο άλλος για το δεύτερο μισό κατά τις αρνητικές τιμές. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται το ισοδύναμο του μετατροπέα κατά τη θετική ημιπερίοδο της  $V_{AC}$ . Αποτελείται από τις διόδους  $D_1, D_3$ , το διακόπτη  $S_1$ , το πηνίο  $L_1$  και τον πυκνωτή  $C_1$ . Κατά τη λειτουργία του ανορθωτή, η τάση στον πυκνωτή  $C_1$  που πρέπει να είναι μικρότερη από το μέγιστο της  $V_{AC}$ , ρυθμίζεται από τον έλεγχο που ασκείται στο διακόπτη  $S_1$ . Με όμοιο τρόπο, τα στοιχεία που διαρρέονται από ρεύμα κατά την αρνητική ημιπερίοδο της  $V_{AC}$  είναι οι διόδους  $D_2, D_4$ , ο διακόπτης  $S_2$ , το πηνίο  $L_2$  και ο πυκνωτής  $C_2$ , καθώς οι διόδους  $D_1, D_3$  και ο διακόπτης  $S_1$  που βρίσκονταν σε αγωγή πριν είναι πλέον ανενεργοί και η τάση στα άκρα του πυκνωτή  $C_2$  ρυθμίζεται από το διακόπτη  $S_2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.

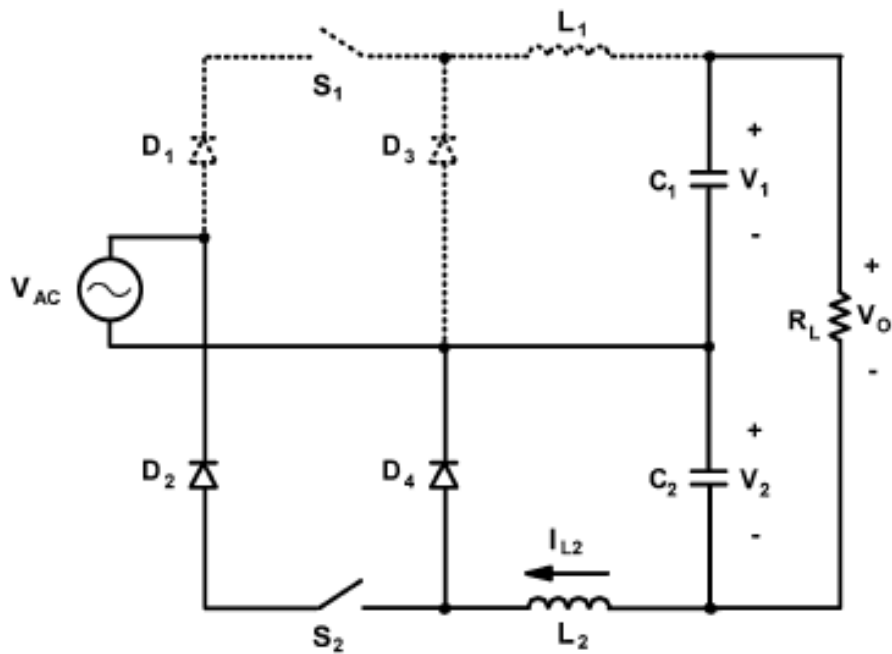
Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το πρόβλημα που επιθυμεί να επιλύσει η τεχνική αυτή, τη βελτίωση δηλαδή του συντελεστή ισχύος κάνοντας την νεκρή γωνία που εμφανίζεται μεταξύ της φάσης του ρεύματος και της τάσης όσο το δυνατόν μικρότερη.



**Σχήμα 3.8** - Τάση και ρεύμα εισόδου στον Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier [32].



Σχήμα 3.9 - Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη θετική ημιπερίοδο της πηγής τάσης [32].



Σχήμα 3.10 - Ισοδύναμο κύκλωμα κατά την αρνητική ημιπερίοδο της πηγής τάσης [32].

Η τάση εξόδου του Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier είναι το άθροισμα των τάσεων στα άκρα των δύο πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$ . Συμπεριλαμβάνοντας την εξάρτηση που έχουν οι τάσεις στα άκρα των πυκνωτών από το duty cycle ισχύει ότι:

$$V_o = 2 \cdot D_c \cdot V_{IN} \quad (3.3)$$

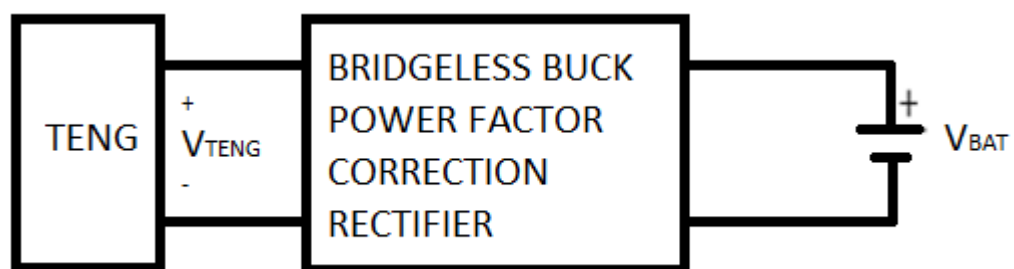
όπου:

$V_{IN}$  η ανορθωμένη τάση εισόδου.

Ρυθμίζοντας το  $D_c$ , μαζί με την τάση εξόδου, αλλάζει και η νεκρή γωνία. Έτσι με τη χρήση ενός κατάλληλου αλγορίθμου μπορεί να επιτευχθεί βελτιστοποίηση του συντελεστή ισχύος.

Εξαιτίας της τοπολογίας του Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier, η σχέση παραπάνω ισχύει μονάχα για τάσεις εισόδου  $V_{IN}$  μεγαλύτερες από το μισό της τάσης εξόδου  $V_o$ . Όταν η  $V_{IN}$  γίνει μικρότερη από τη μισή της  $V_o$  οι μετατροπείς δεν μεταφέρουν ενέργεια από την είσοδο στην έξοδο.

Έχοντας αναλύσει την λειτουργία του Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier, επόμενο βήμα είναι η σύνδεση του μεταξύ του TENG και της μπαταρίας που χρησιμοποιείται ως φορτίο. Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το κυκλωματικό διάγραμμα σύνδεσης.

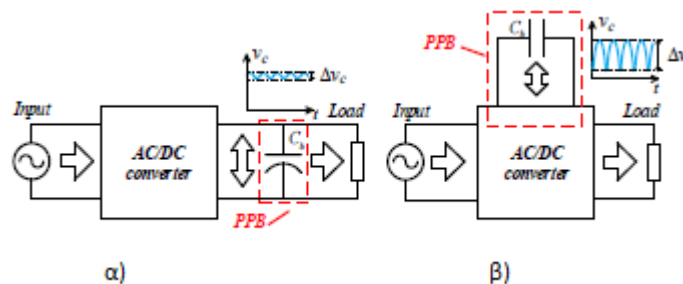


**Σχήμα 3.11** - Διάγραμμα σύνδεσης γεννήτριας με Bridgeless Buck Power Factor Correction (PFC) Rectifier και φορτίο.

### 3.4 Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier

Οι μονοφασικοί power factor correction ανορθωτές με χαρακτηριστικά όπως υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση μετατροπής καθώς και υψηλή αξιοπιστία αποτελούν το ιδανικό πρότυπο για τη σχεδίαση πολλών εφαρμογών. Κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη των τριών αυτών χαρακτηριστικών αποτελεί η χρήση των πυκνωτών στην έξοδο του ανορθωτή, καθώς φιλτράρουν το σήμα του ρεύματος εξόδου του.

Για την επίτευξη των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στην αρχή, αναπτύχθηκαν εναλλακτικά κυκλώματα, παράγωγα του μονοφασικού ανορθωτή βελτίωσης συντελεστή ισχύος με τρεις θύρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Σε αυτή τη διάταξη, ο πυκνωτής που υπήρχε στην έξοδο, συνδέεται πλέον στη νέα θύρα, προσφέροντας ελευθερία για μεγαλύτερη διακύμανση τάσης στα άκρα του.



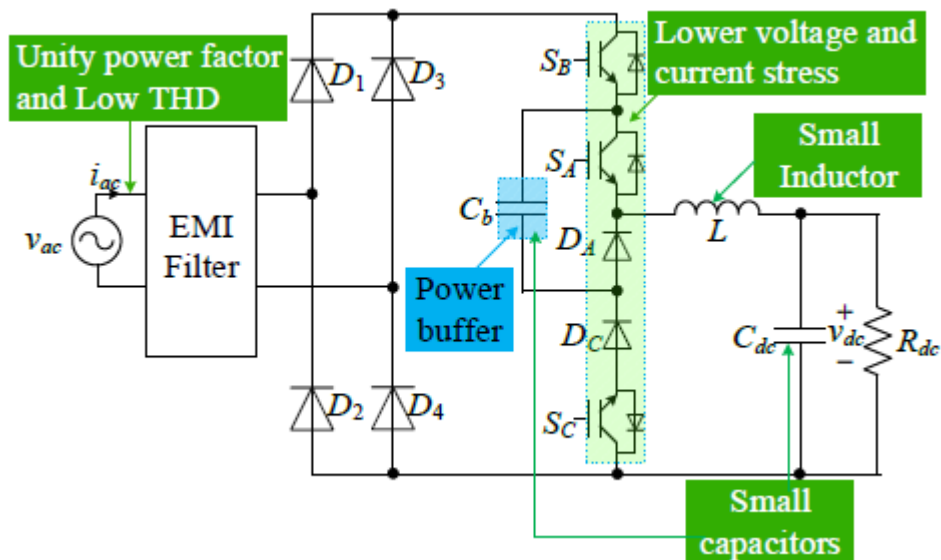
Σχήμα 3.12 - α) Συμβατικοί ανορθωτές β) 3-port ανορθωτές [33].

Κατ' επέκταση, μια διάταξη με τρεις διακόπτες προσθέτει νέα στάδια στο κύκλο λειτουργίας του νέου ανορθωτή με το όνομα Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier, ο οποίος πλέον πλησιάζει αρκετά τα ιδανικά πρότυπα.

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η τοπολογία του Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier. Συγκριτικά με ένα συμβατικό Buck PFC ανορθωτή, ο Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier περιέχει επιπλέον δύο ενεργούς διακόπτες ( $S_b, S_c$ ), μια δίοδο ( $D_c$ ), και ένα πυκνωτή ( $C_b$ ). Επιπλέον, το πηνίο  $L$  με τους πυκνωτές  $C_b$  και  $C_{dc}$  έχουν πολύ μικρότερες τιμές

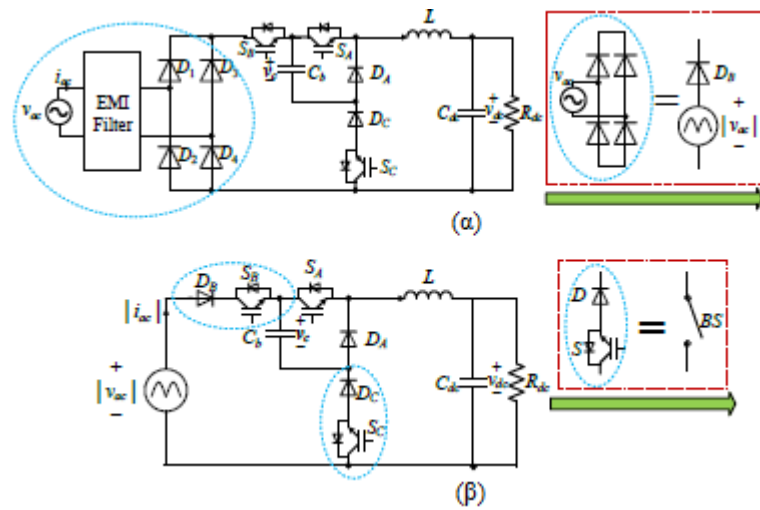
Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η προσθήκη των παραπάνω στοιχείων θα έχει ως αποτέλεσμα τα εξής έναντι των συμβατικών Buck PFC ανορθωτών:

- Μικρότερη τιμή του πυκνωτή  $C_b$ .
- Μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και χαμηλό Total Harmonic Distortion (THD).
- Λιγότεροι περιορισμοί στην τάση και το ρεύμα των διακοπών.
- Μικρότερη τιμή του πηνίου  $L$  λόγω της μείωσης μέγιστης τιμής του ρεύματος που το διαρρέει.

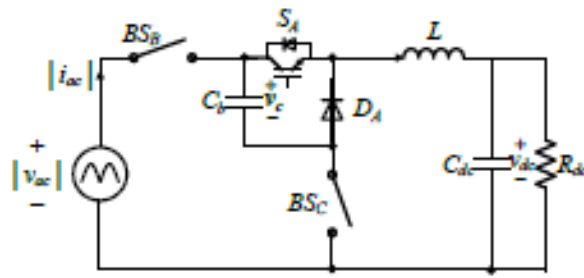


**Σχήμα 3.13** - Τοπολογία Three-level Flying-Capacitor Buck Power Factor Rectifier [33].

Για την απλούστερη ανάλυση του κυκλώματος στο Σχήμα 3.13, θα χρειαστεί να γίνει μετασχηματισμός στοιχείων, καθώς και περιγραφή των ισοδύναμων τους. Πρώτο βήμα είναι να γίνει απαλοιφή του φίλτρου EMI, καθώς επίσης θεώρηση της πηγής τάσης και του ανορθωτή ως μια ανορθωμένη ημιτονοειδή πηγή τάσης  $|V_{ac}|$  σε σειρά με μία δίοδο  $D_B$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14(α). Στη συνέχεια θα γίνει αντικατάσταση κάθε MOSFET ( $S$ ) και διόδου ( $D$ ) με ένα απλό διακόπτη ( $BS$ ), όπου θα άγει μόνο θετικό ρεύμα, χωρίς να παρουσιάζει πτώση τάσης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14(β). Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η μορφή του ισοδύναμου κυκλώματος που προκύπτει.



**Σχήμα 3.14** - α) Ισοδύναμο τάσης με ανορθωτή β) Ισοδύναμος διακόπτης ισχύος με δίοδο [33].



**Σχήμα 3.15** - Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα [33].

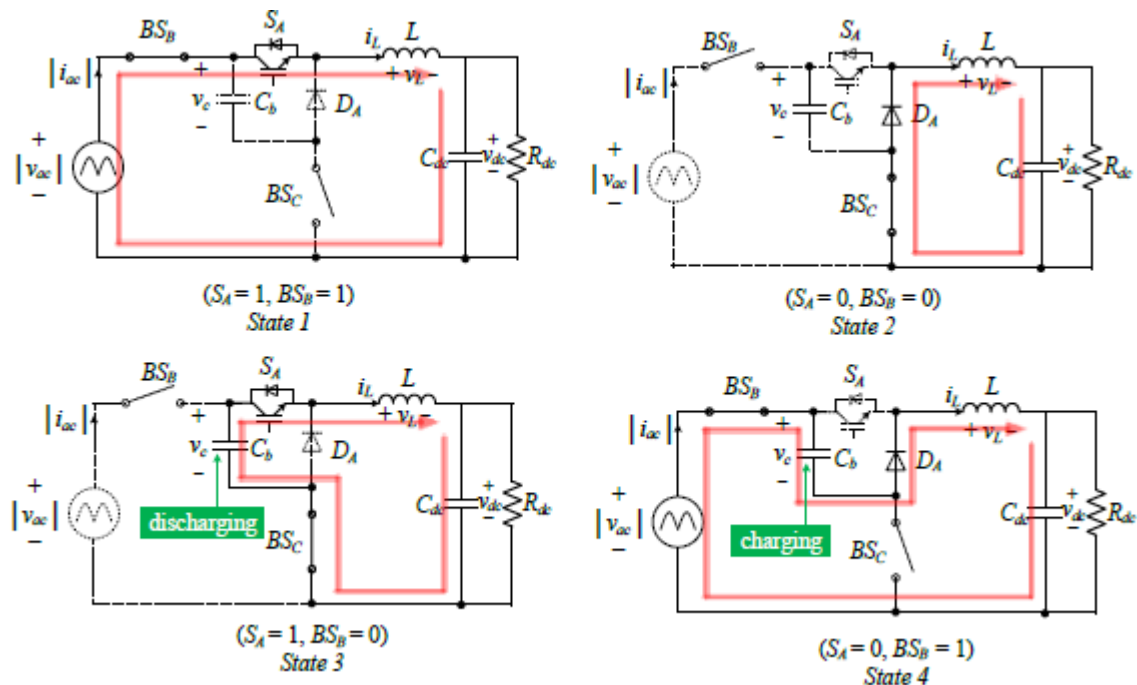
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15, οι διακόπτες  $BS_B$ ,  $BS_C$  είναι συμπληρωματικοί. Καθώς βρισκόμαστε σε μια λειτουργία continuous conduction mode (CCM), ο ανορθωτής έχει τέσσερεις διαφορετικές καταστάσεις ανάλογα με την κατάσταση των διακοπών όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Στο Σχήμα 3.16 φαίνεται η ροή του ρεύματος στις καταστάσεις αυτές.

Στην κατάσταση 1 το πηνίο  $L$  φορτίζεται από τη πηγή  $|v_{ac}|$ , ενώ κατά τη διάρκεια της κατάστασης 2 το πηνίο αποφορτίζεται στο φορτίο. Κατά τη διάρκεια των καταστάσεων αυτών ο πυκνωτής  $C_b$  δεν διαρρέεται από ρεύμα. Αυτές οι δύο καταστάσεις είναι όμοιες με εκείνες ενός μετατροπέα Buck.

Στις καταστάσεις 3 και 4, ο πυκνωτής  $C_b$  διαρρέεται από ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, αποφορτίζεται από ρεύμα ισοδύναμο με εκείνο που διαρρέει το πηνίο  $i_L$  στη κατάσταση 3 και φορτίζεται ξανά από ρεύμα ισοδύναμο με εκείνο του πηνίου  $i_L$  για την κατάσταση 4. Με τον έλεγχο της διάρκειας των καταστάσεων 3 και 4, η ποσότητα ισχύος που ρέει εντός και εκτός του πυκνωτή, μπορεί να ρυθμιστεί. Επιπλέον, το ρεύμα της πηγής  $|i_{ac}|$  μπορεί να ρυθμιστεί ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα από την τάση  $|v_{ac}|$ . Αυτό συμβαίνει διότι το ρεύμα  $|i_{ac}|$  ισούται με το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο  $i_L$  στις καταστάσεις 1 και 4 (όπου ο διακόπτης  $BS_B$  είναι ενεργός), ενώ είναι ίσο με μηδέν στις άλλες δύο καταστάσεις.

Αντίθετα, στους συμβατικούς μετατροπείς τύπου Buck, το ρεύμα  $|i_{ac}|$  δεν μπορεί να διαμορφωθεί όταν η τάση εξόδου του ανορθωτή  $V_{DC}$  είναι μεγαλύτερη από εκείνη της πηγής  $|v_{ac}|$ .

Ακόμα, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ότι η τάση στα άκρα των  $S_A$  και  $D_A$  βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης του πυκνωτή  $v_c$ , ενώ και οι τάσεις των  $S_B$ ,  $S_C$  και  $D_C$  έχουν μειωθεί εξίσου, χάρη στον πυκνωτή  $C_b$  που βρίσκεται σε σειρά.



Σχήμα 3.16 - Καταστάσεις ισοδύναμου κυκλώματος [33].



**Πίνακας 3.1 – Καταστάσεις Διακοπών.**

Κατάσταση λειτουργίας	$S_A$	$BS_B$	$C_b$	$v_L$
Κατάσταση 1	1	1	Αδράνεια	$ v_{ac}  - v_{dc}$
Κατάσταση 2	0	0	Αδράνεια	$-v_{dc}$
Κατάσταση 3	1	0	Αποφόρτιση	$v_c - v_{dc}$
Κατάσταση 4	0	1	Φόρτιση	$ v_{ac}  - v_c - v_{dc}$

Για την ανάλυση του κυκλώματος σε ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, θεωρούμε πως έχουμε επιτύχει συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα, συνεπώς η πηγή μας είναι ιδανική και τα  $v_{ac}$  και  $i_{ac}$  περιγράφονται από τις εξής σχέσεις:

$$v_{ac} = V_{ac} \cdot \sin \omega t \quad (3.4)$$

$$i_{ac} = I_{ac} \cdot \sin \omega t \quad (3.5)$$

όπου:

$V_{ac}$  το πλάτος της τάσης της γεννήτριας

$I_{ac}$  το πλάτος του ρεύματος της γεννήτριας

$\omega$  η γωνιακή συχνότητα της γεννήτριας και

$t$  ο χρόνος

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να θεωρήσουμε πως η στιγμιαία ισχύς της πηγής εκφράζεται από τον τύπο:

$$p_{AC} = v_{AC} i_{AC} = \frac{V_{AC}I_{AC}}{2} - \frac{V_{AC}I_{AC}}{2} \cos (2\omega t) \quad (3.6)$$

όπου

Το  $P_{dc}$  είναι σταθερά για τη συνεχόμενη ισχύς  $\frac{V_{AC}I_{AC}}{2}$

Και  $P_r$  η τιμή της εναλλασσόμενης ισχύος  $\frac{V_{AC}I_{AC}}{2} \cos (2\omega t)$

Θεωρώντας πως η  $P_r$  εξαρτάται από τον  $C_b$ , τότε η τάση και το ρεύμα στα άκρα του πυκνωτή θα είναι ίσα με [33]:

$$v_c = \sqrt{\bar{V}_c^2 - \frac{P_{dc}}{\omega C_b} \sin(2\omega t)} \quad (3.7)$$

$$i_c = - \frac{P_{dc} \cos(2\omega t)}{\sqrt{\bar{V}_c^2 - \frac{P_{dc}}{\omega C_b} \sin(2\omega t)}} \quad (3.8)$$

όπου η  $\bar{V}_c$  είναι η μέση τιμή της τάσης του  $v_c$ .

Έχοντας πλέον τους τύπους για τις τάσεις και τα ρεύματα στην μόνιμη κατάσταση, μπορούμε να υπολογίσουμε τα duty cycles των διακοπών, καθώς και τους λειτουργικούς περιορισμούς του ανορθωτή. Επισημαίνοντας πως οι διάρκειες των καταστάσεων 1 έως 4 όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.16 είναι  $d_1 T_s$ ,  $d_2 T_s$ ,  $d_3 T_s$ ,  $d_4 T_s$ , αντίστοιχα, όπου  $T_s$  είναι η περίοδος εναλλαγής κατάστασης του διακόπτη, τότε ισχύει ότι:

$$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 = 1 \quad (3.9)$$

Δεδομένων όλων των παραπάνω, τα duty cycles των  $S_a$  και  $BS_b$ , μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$d_A = d_1 + d_3 \quad (3.10)$$

$$d_B = d_1 + d_4 \quad (3.11)$$

Με βάση τη ροή ρεύματος στο Σχήμα 3.16, το ρεύμα της πηγής  $i_{ac}$ , το ρεύμα του φορτίου  $i_{dc}$ , αλλά και το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή  $i_c$  - για περίοδο  $T_s$  - μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$|i_{ac}| = (d_1 + d_4)i_L = d_B i_L \quad (3.12)$$

$$i_{dc} = i_L \quad (3.13)$$

$$i_c = (d_4 - d_3)i_L = (d_B - d_A)i_L \quad (3.14)$$

Από την εξίσωση του ρεύματος του πυκνωτή (3.14), μπορούμε να αποφανθούμε ότι το ρεύμα είναι πάντοτε θετικό εάν ισχύει ότι  $d_3 < d_4$  (ή  $d_A < d_B$ ) και αντιστρόφως, πάντα αρνητικό όταν  $d_3 > d_4$ . Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως:

$$d_A = \frac{|i_a| - i_c}{i_L} = \frac{|i_a| - i_c}{i_{dc}} \quad (3.15)$$

$$d_B = \frac{|i_{ac}|}{i_L} = \frac{|i_{ac}|}{i_{dc}} \quad (3.16)$$

Η τιμή των duty cycle  $d_A$  και  $d_B$  πρέπει να βρίσκεται στο διάστημα 0-100%. Ως εκ τούτου, οι περιορισμοί λειτουργίας του ανορθωτή μπορούν να ορισθούν ως εξής:

$$|i_{ac}| \leq i_{dc} + i_c \quad (3.17)$$

$$|i_{ac}| \geq i_c \quad (3.18)$$

$$|i_{ac}| \leq i_{dc} \quad (3.19)$$

Για την επαλήθευση της εξίσωσης 3.18, θα πρέπει η μέση τάση του πυκνωτή  $\bar{V}_c$  να είναι μεγαλύτερη από το ήμισυ του πλάτους της τάσης της πηγής  $V_{ac}$ , και για την Εξίσωση 3.19, η τάση εξόδου  $V_{dc}$  πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το ήμισυ της τάσης της πηγής  $V_{ac}$ .

Για την υλοποίηση ελέγχου των διακοπών, θεωρητικά αρκεί να εφαρμοστούν οι εξισώσεις 3.15 και 3.16. Επιπλέον στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι τάσεις στα άκρα των διακοπτικών στοιχείων για κάθε μια από τις καταστάσεις που έχει ο κύκλος λειτουργίας του flying-capacitor buck PFC Rectifier.

**Πίνακας 3.2** - Τιμή τάσης κάθε στοιχείου για κάθε δυνατή κατάσταση [33].

Κατάσταση Λειτουργίας	$S_A$	$d_A$	$BS_B$	$BS_C$
Κατάσταση 1	0	$v_c$	0	$ v_{ac}  - v_{dc}$
Κατάσταση 2	$v_c$	0	$ v_{ac}  - v_{dc}$	0
Κατάσταση 3	0	$v_c$	$ v_{ac}  - v_{dc}$	0
Κατάσταση 4	$v_c$	0	0	$ v_{ac}  - v_{dc}$

---

## 4. Μεγιστοποίηση παραγωγής ισχύος τριβοηλεκτρικών γεννητριών

---

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός ηλεκτρονικού συστήματος για την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ισχύος από τριβοηλεκτρικές γεννήτριες. Το σύστημα αυτό ακολουθεί μια διαδικασία η οποία ονομάζεται εντοπισμός σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Για την εύρεση του σημείου αυτού, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι οι οποίες έχουν εφαρμοστεί σε ηλεκτρικές πηγές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τη μεγιστοποίηση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος σε TENG.

Σαν πρώτη μέθοδο αναπτύχθηκε η λειτουργία ενός διακόπτη ο οποίος βρίσκεται παράλληλα της γεννήτριας, μεταξύ αυτής και του ανορθωτή γέφυρας του συμβατικού μοντέλου που περιγράφεται στο Σχήμα 2.8. Στην συνέχεια με την προσθήκη του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης DC/DC ή αλλιώς μετατροπέα Buck, έγινε εφαρμογή ενός αλγορίθμου για την εύρεση του κατάλληλου duty cycle κατά το οποίο η γεννήτρια αλλά και το φορτίο παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος.

Για τον έλεγχο του Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter, έγινε χρήση της ίδιας τεχνικής με εκείνη του μετατροπέα Buck, καθώς όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 3.3, ο Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter έχει παρόμοια λειτουργία. Κατά τη διαδικασία υλοποίησης του Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier, η βιβλιογραφία περιγράφει τον σχετικό έλεγχο των διακοπών που διαθέτει, για τον οποίο έχει γίνει αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

#### 4.1 Περιγραφή των μεθόδων MPPT

Για την περιγραφή των μεθόδων εύρεσης του μέγιστου σημείου παραγωγής ισχύος είναι απαραίτητο να γίνει ανάλυση του κύκλου λειτουργίας του κυκλώματος. Η χρήση ενός πλήρους ανορθωτή για τη μεταφορά της ισχύος που παράγει ένα TENG σε DC ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή απόδοση. Έτσι για την πρώτη σχεδίαση, πραγματοποιήθηκε μια τεχνική κύκλου φόρτισης, με τη χρήση ενός διακόπτη ο οποίος θα αυξήσει τη ροή φορτίου στο σύστημα.

Οι περισσότερες από τις προηγούμενες έρευνες πάνω σε TENGs, έχουν επικεντρωθεί κυρίως στην απόδοση υπό φορτίο αντίστασης, ωστόσο ελάχιστες έχουν μελετήσει τι συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση αποθηκευτικών μονάδων (όπως μπαταρίες).

Δεδομένου πως το εμβαδόν της καμπύλης της χαρακτηριστικής τάσης – φορτίου, αντιστοιχεί στην τιμή της μέσης ισχύος, ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η μεγιστοποίηση του εμβαδού αυτού, το οποίο θεωρητικά ορίζεται ως το γινόμενο της τάσης ανοικτοκύκλωσης  $V_{ocMAX}$  της γεννήτριας με την τιμή του μέγιστου φορτίου  $Q_{scMAX}$  που μεταφέρεται στη μπαταρία για ρεύμα ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κατά τη μελέτη του συγκεκριμένου κυκλώματος, αρχικά αναλύθηκε ο κύκλος λειτουργίας χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια για απευθείας φόρτιση μπαταρίας (DC πηγή τάσης) μέσω ενός ανορθωτή πλήρους κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Η μοντελοποίηση του TENG έγινε με βάση την Παράγραφο 2.1.

Για την ανάλυση του απευθείας κύκλου φόρτισης, έχουμε έξι στάδια τα οποία αναφέρονται σχηματικά αλλά και με θεωρητική περιγραφή. Αρχικά, η λειτουργία του κυκλώματος ξεκινάει από το σημείο όπου η τάση αλλά και το φορτίο είναι μηδέν, πρώτο στάδιο  $(Q_{TENG}, V_{TENG}) = (0, 0)$ . Για τον πρώτο κύκλο, επειδή η τάση της γεννήτριας  $V_{TENG}$  είναι μικρότερη από εκείνη του φορτίου  $V_{BAT}$ , καμία διάδος δεν άγει, έχοντας έτσι την αρχική κατάσταση με χαρακτηριστικά ανοικτοκυκλώματος. Έπειτα, το πρώτο βήμα είναι να αυξηθεί η τάση στα άκρα της γεννήτριας  $V_{TENG}$  και να φτάσει την τάση της μπαταρίας  $V_{BAT}$ , ενώ η μεταφορά του φορτίου δεν έχει ξεκινήσει ακόμα. Όταν συμβεί πλέον αυτό βρισκόμαστε στο δεύτερο στάδιο  $(Q_{TENG}, V_{TENG}) = (0, V_{BAT})$ , κατά το οποίο ξεκινούν να άγουν οι δύο μόνο διάδοι μαζί με τη διαδικασία ροής φορτίου. Σημειώνεται πως το φορτίο δεν πρόκειται να φτάσει τη μέγιστη τιμή του, καθώς η τάση της γεννήτριας  $V_{TENG}$  δεν μπορεί να ξεπεράσει την τάση της μπαταρίας  $V_{BAT}$  κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

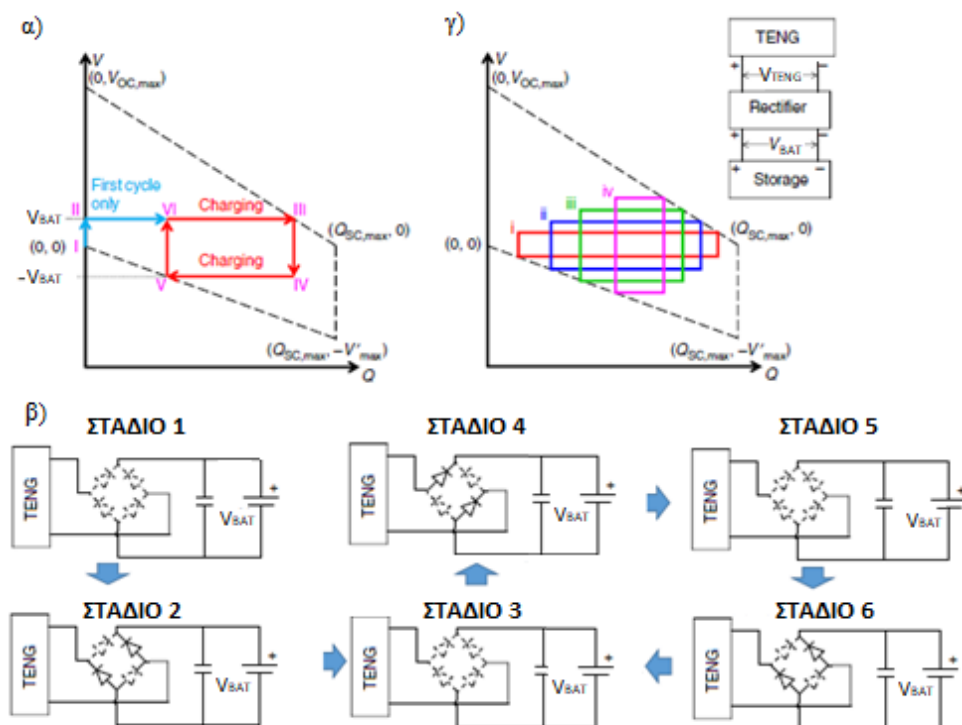
Στο τρίτο στάδιο  $(Q_{TENG}, V_{TENG}) = (Q_{SC}, V_{BAT})$ , έχοντας φτάσει τη μέγιστη δυνατή έως τώρα ροή φορτίου  $Q_{SC}$ , και με την τάση ίση με  $V_{BAT}$ , οι δίοδοι σταματούν να άγουν, η τάση θα ξεκινήσει να φθίνει με σταθερή ροή φορτίου, μέχρι να φτάσει στην αντίστοιχη αρνητική τιμή της τάσης της μπαταρίας  $-V_{BAT}$ . Έτσι, η λειτουργία καταλήγει στο τέταρτο στάδιο  $(Q_{TENG}, V_{TENG}) = (Q_{SC}, -V_{BAT})$ , κατά το οποίο ξεκινά να φθίνει η ροή φορτίου έως το ελάχιστο:

$$Q_{MIN} = Q_{SC_{max}} \cdot V_{BAT} / V_{max} \quad (4.1)$$

όπου:

$V_{max}$  η μέγιστη απόλυτη τάση γεννήτριας για  $Q = Q_{SC_{max}}$ .

Οι δύο δίοδοι που δεν ήγαγαν κατά τη διάρκεια του δευτέρου σταδίου ξεκινούν να άγουν όντας πλέον στο πέμπτο στάδιο  $(Q_{TENG}, V_{TENG}) = (Q_{MIN}, -V_{BAT})$ . Με το επόμενο βήμα ο κύκλος φόρτισης πηγαίνει στο έκτο στάδιο  $(Q_{TENG}, V_{TENG}) = (Q_{MIN}, V_{BAT})$  με την άνοδο ξανά της τάσης. Ο κύκλος ολοκληρώνεται καθώς επόμενο στάδιο είναι ξανά το τρίτο, για την επανάληψη της διαδικασίας. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται γραφικά ο απευθείας κύκλος φόρτισης.



**Σχήμα 4.1** – α) Πρώτος κύκλος. β) Αναπαράσταση ροής ρεύματος και τιμών τάσης, φορτίου ανά τους κύκλους γ) Χαρακτηριστικές για διάφορες τάσεις μπαταρίας [40].

Το ρεύμα εξόδου του ανορθωτή είναι σε μορφή παλμών. Φιλτράροντας το ρεύμα με τη χρήση πυκνωτή, η ισχύς της μπαταρίας  $P_b$  υπολογίζεται εύκολα από το γινόμενο της τάσης που διαθέτει η μπαταρία και την τιμή της DC συνιστώσας του ρεύματος που τη διαρρέει:

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{TENG}(x) * i_{TENG}(x) dx \quad (4.2)$$

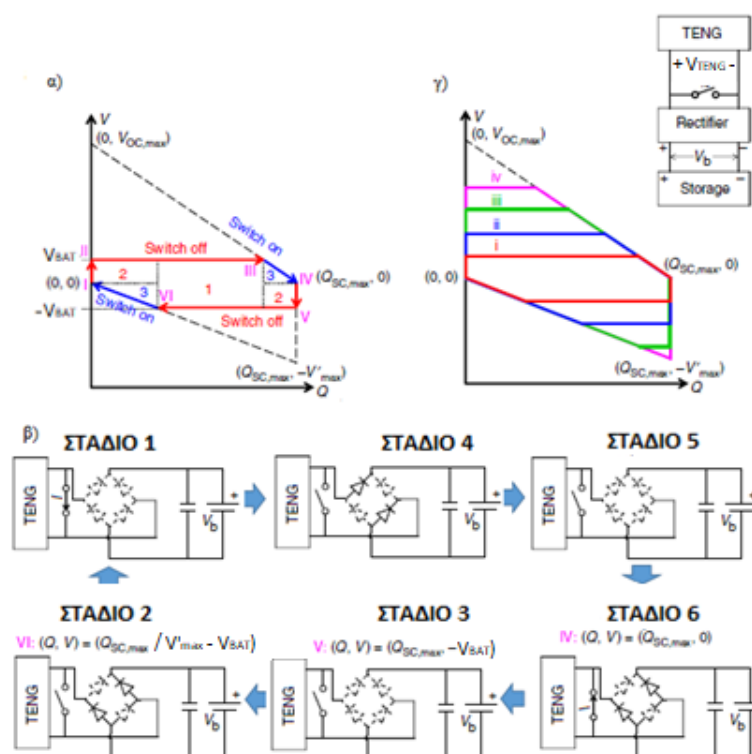
όπου:

T η περίοδος κίνησης των ηλεκτροδίων της γεννήτριας,

x η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων της γεννήτριας,

Σκοπός μας είναι να αυξήσουμε τόσο την τιμή της μέσης ισχύος, όσο και το να φέρουμε τη τιμή της απόδοσης,  $\frac{P_b}{P_{avg}}$  όσο το δυνατό πιο κοντά στη μονάδα.

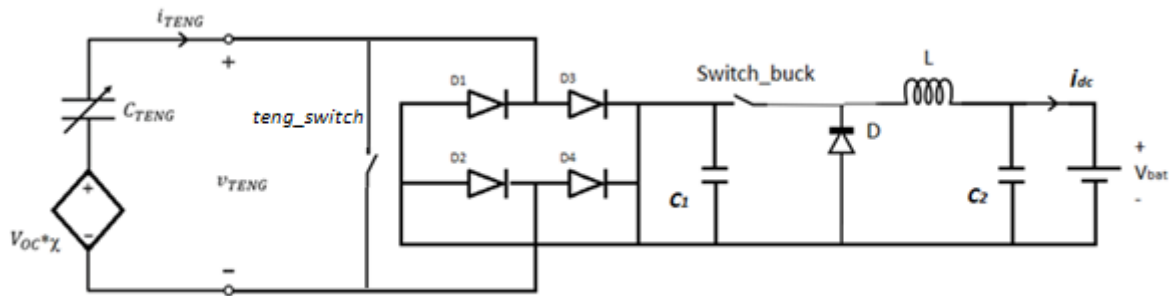
Ο έλεγχος του διακόπτη έχει ως σκοπό την βελτιστοποίηση παραγωγής ισχύος, καθώς λειτουργεί με τρόπο κατάλληλο ώστε να διαχειρίζεται αποτελεσματικά το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Ως αρχική κατάσταση ο διακόπτης είναι ανοικτός και με βάση μετρήσεις των τιμών ρεύματος  $i_{TENG}$  και τάσης  $v_{TENG}$  ανοίγει και κλείνει. Μόλις το ρεύμα της γεννήτριας  $i_{TENG}$  γίνει ίσο με το μηδέν και κατά συνέπεια όταν το φορτίο φτάσει στη μέγιστη τιμή του, ο διακόπτης κλείνει (on-state). Η κατάσταση αυτή διατηρείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα έως ότου η τάση στα άκρα της γεννήτριας μηδενιστεί λόγω της βραχυκύκλωσης. Αυτή η λειτουργία του διακόπτη συμβαίνει δύο φορές ανά περίοδο. Τα βήματα του κύκλου είναι ακριβώς ίδια με εκείνα της απευθείας φόρτισης, με τη διαφορά ότι πλέον το φορτίο φτάνει στη τιμή  $Q_{sc_{max}}$  που δεν μπορούσε προηγουμένως. Αυτό συμβαίνει διότι μόλις ο διακόπτης κλείσει, η ροή φορτίου αυξάνεται καθώς έχει μπει σε κατάσταση βραχυκύκλωσης μέχρι τη μέγιστη τιμή φορτίου βραχυκύκλωσης, καθ' όλο το χρονικό διάστημα που φθίνει η τάση  $v_{TENG}$ . Όταν πλέον ο διακόπτης ανοίξει ξανά και θέσει το κύκλωμα υπό λειτουργία, το φορτίο θα παραμείνει στη μέγιστη τιμή που απέκτησε και με τη άνοδο της τάσης στη γεννήτρια η ισχύς μεγιστοποιείται. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ο κύκλος φόρτισης με τη χρήση του διακόπτη.



**Σχήμα 4.2** – α) Πρώτος κύκλος λειτουργίας, β) Αναπαράσταση ροής ρεύματος και τιμών τάσης, φορτίου ανά τους κύκλους γ) Χαρακτηριστικές για διάφορες τιμές τάσης της μπαταρίας [40].

Έχοντας πλέον ένα πιο αποδοτικό κύκλο φόρτισης για τη μπαταρία, επόμενο βήμα είναι η εύρεση της μέγιστης δυνατής ισχύος που μπορεί να παράγει η γεννήτρια, αλλά επίσης και τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει η μπαταρία. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να γίνει χρήση εφαρμογής που να μεγιστοποιεί το εμβαδόν της χαρακτηριστικής τάσης-φορτίου στη γεννήτρια. Μέχρι σήμερα, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διάφορων τιμών τάσεως μπαταρίας ως φορτίο, επιλέγοντας εν τέλει εκείνη με το μεγαλύτερο εμβαδόν. Αντίθετα, στην παρούσα διπλωματική εργασία, η χρήση ενός μετατροπέα τάσης τύπου Buck μεταξύ μπαταρίας-ανορθωτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, αποτελεί μια ιδανική προσέγγιση για την επιλογή τάσης στα άκρα του ανορθωτή. Ο εν λόγω μετατροπέας κάνει χρήση αλγορίθμου που περιγράφεται παρακάτω για την εύρεση της βέλτιστης τιμής τάσης κατά την οποία παρουσιάζεται το μέγιστο ισχύος και τη διατηρεί κατά τη λειτουργία του κυκλώματος.



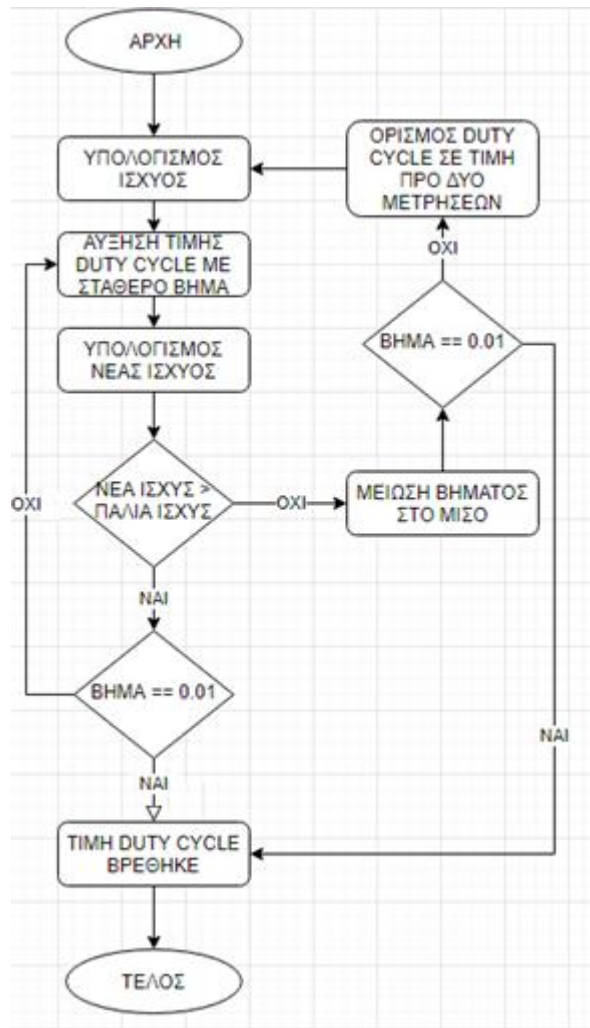


Σχήμα 4.3 - Σχηματικό διάγραμμα του τελικού κυκλώματος.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση 3.2, η τάση εξόδου του μετατροπέα Buck ρυθμίζεται από την είσοδο του. Στην εφαρμογή μας όμως έχουμε σταθερή τάση στην έξοδο, καθώς έχουμε ορίσει μια ιδανική πηγή τάσης ως φορτίο (μπαταρία). Έτσι η μεταβολή που θα συμβαίνει στο κύκλωμα θα είναι στην τάση εισόδου του μετατροπέα Buck και η τιμή της θα ρυθμίζεται από τη σχέση:

$$V_{in} = V_{out}/D \quad (4.3)$$

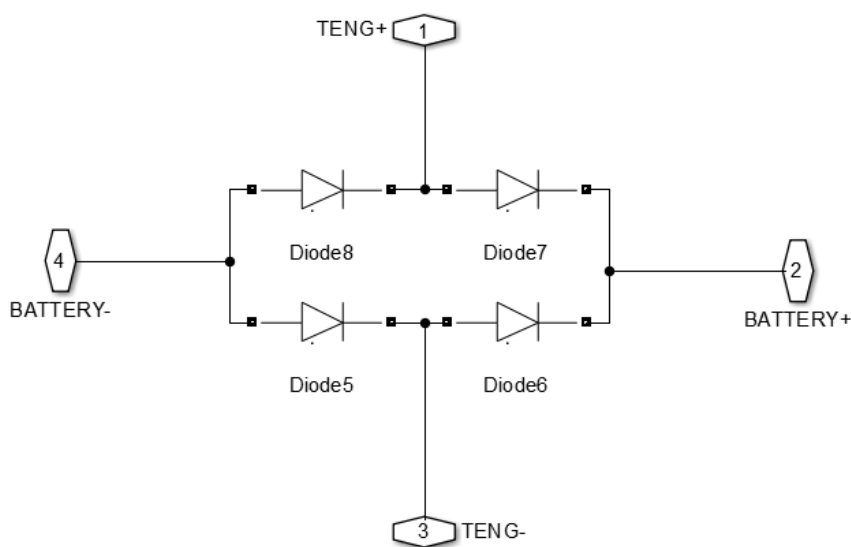
Ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε στον μετατροπέα τάσης τύπου Buck προσπελαύνει αυξητικά τιμές του duty cycle σε όλο το εύρος τιμών (0 έως 1) μέχρι να εντοπίσει το μέγιστο ισχύος (η νέα μέτρηση να είναι μικρότερη από την προηγούμενη). Όταν συμβεί αυτό, τότε ο αλγόριθμος ορίζει ένα νέο διάστημα τιμών duty cycle (μεταξύ της προτελευταίας προσπέλασης και της τελευταίας) το βήμα προσπέλασης των τιμών του duty cycle μειώνεται κατά το ήμισυ και πράττει όπως πριν, μέχρις ότου το διάστημα να είναι αρκετά μικρό ώστε να θεωρηθεί ως μια διακριτή τιμή στην οποία παρουσιάζεται το μέγιστο ισχύος. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.4 – Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου.

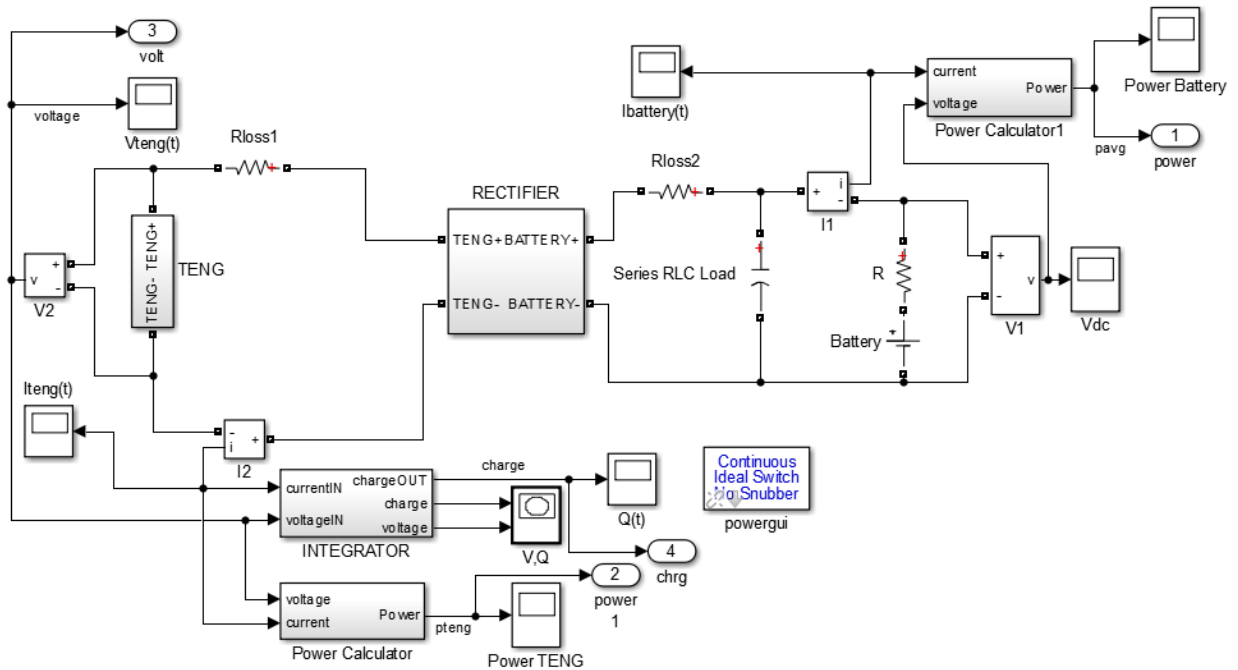
## 4.2 Περιγραφή προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν

Η διαδικασία της περιγραφής των προσομοιώσεων περιλαμβάνει την αναλυτική σύνθεση του κυκλώματος, βήμα προς βήμα μέχρι τη σύνθεση του τελικού συστήματος και την προσθήκη των μεθόδων ελέγχου. Το συμβατικό κύκλωμα, όπως έγινε αναφορά στα προηγούμενα κεφάλαια (βλ. Σχήμα 2.8), αποτελείται από το TENG που είναι συνδεδεμένο με έναν ανορθωτή γέφυρας. Η υλοποίηση αυτή έγινε υποσύστημα και ονομάζεται RECTIFIER.



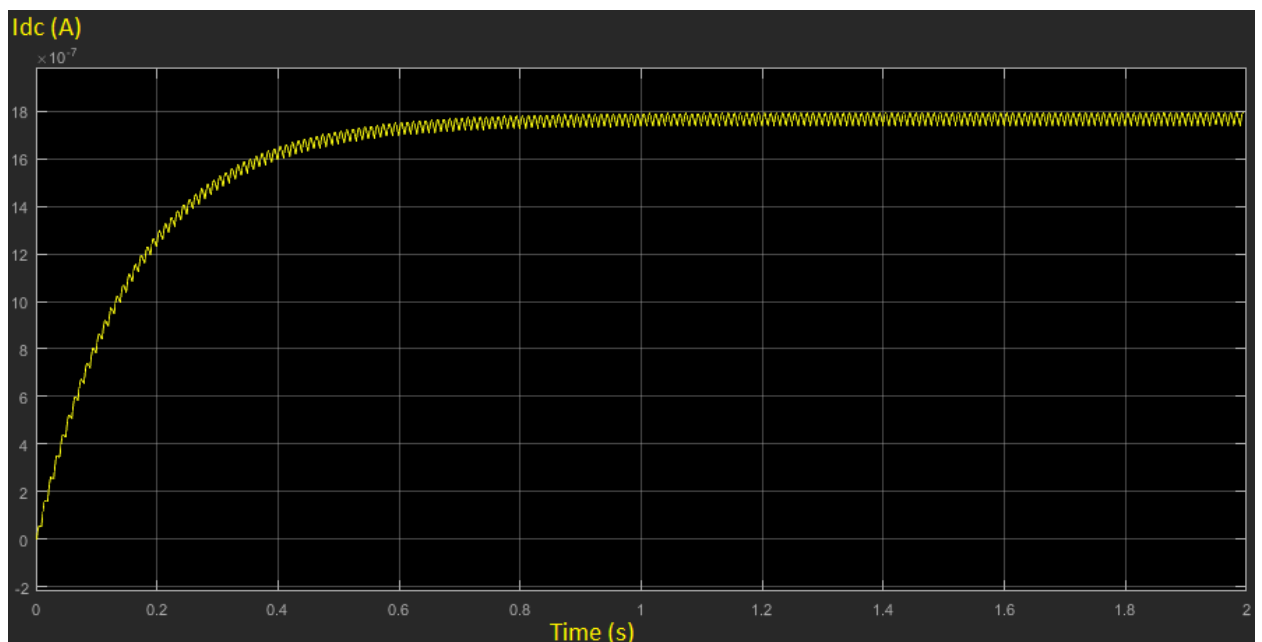
Σχήμα 4.5 – Μοντέλο ανορθωτή γέφυρας

Στη συνέχεια με τη χρήση πυκνωτή στην έξοδο του ανορθωτή, το ρεύμα φιλτράρεται και μετατρέπεται σε DC. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται το τελικό κύκλωμα προσομοίωσης, το οποίο αποτέλεσε και τη βασική μονάδα επάνω στην οποία προστέθηκαν τα επιμέρους στοιχεία που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 3, καθώς επίσης αποτέλεσε και το κύκλωμα με βάση το οποίο έγιναν όλες οι συγκρίσεις και εξήχθησαν όλα τα αποτελέσματα βελτίωσης απόδοσης και παραγωγής ισχύος των προτεινόμενων κυκλωμάτων.

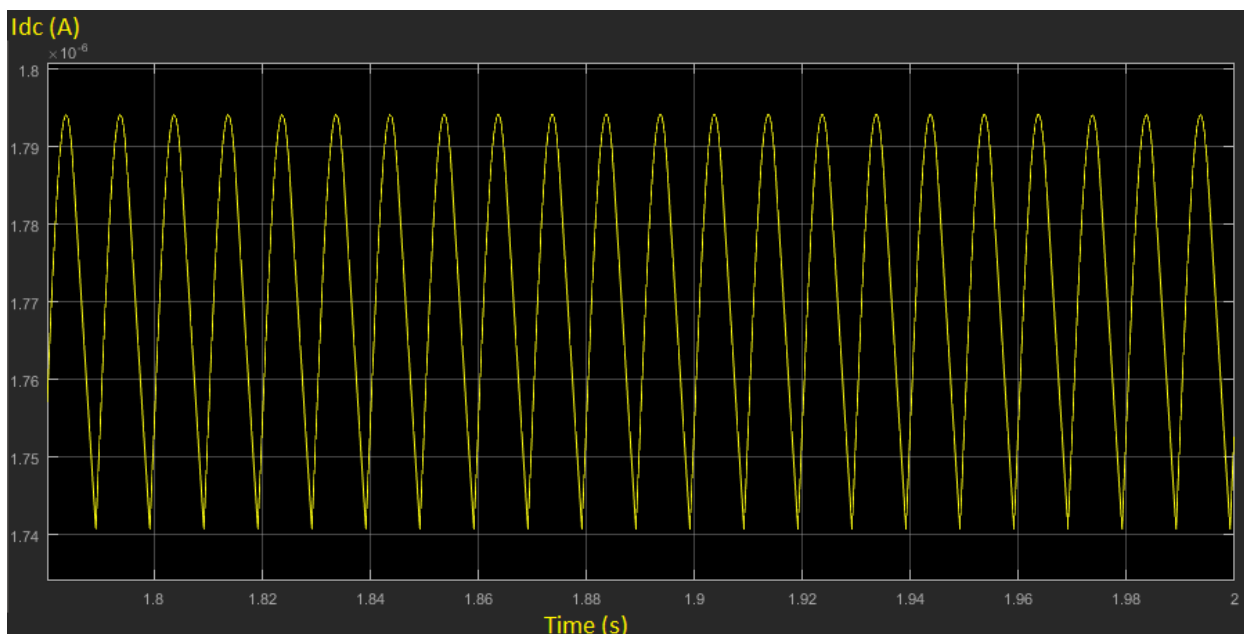


Σχήμα 4.6 - Μοντέλο προσομοίωσης κυκλώματος TENG-RECTIFIER-BATTERY.

Στη συνέχεια περιγράφονται όλα τα υποσυστήματα του Σχήματος 4.6 αναλυτικά ως προς το περιεχόμενο αλλά και τη λειτουργική τους σημασία. Στα Σχήματα 4.7 και 4.8 φαίνεται το ρεύμα που διαρρέει την μπαταρία σε συνάρτηση με το χρόνο, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και στη μόνιμη κατάσταση αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7- Γραφική παράσταση ρεύματος που διαρρέει τη μπαταρία σε συνάρτηση με το χρόνο.



**Σχήμα 4.8** - Γραφική παράσταση ρεύματος μπαταρίας-χρόνου στη μόνιμη κατάσταση.

Η μέτρηση των τιμών ισχύος σε γεννήτρια και μπαταρία, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τριών βασικών υποσυστημάτων. Αρχικά τα δύο έχουν ως κοινό σκοπό τον υπολογισμό ισχύος (σε γεννήτρια και μπαταρία αντίστοιχα), καθώς το τρίτο αφορά την αναπαράστασή της χαρακτηριστικής τάσης – φορτίου με τη χρήση με ενός ολοκληρωτή ρεύματος.

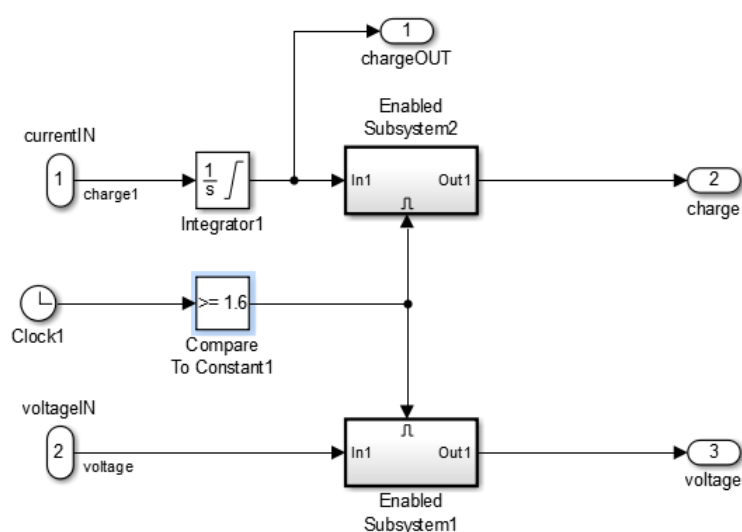
Ενώ ο υπολογισμός ισχύος του φορτίου είναι απλός λόγω της DC φύσης του, ο υπολογισμός για την ισχύ εξόδου της γεννήτριας βασίζεται στην εξίσωση 4.1 που αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου.

Έτσι για τον υπολογισμό ισχύος του TENG, αρχικά γίνεται πολλαπλασιασμός των σημάτων τάσης, ρεύματος και στη συνέχεια ολοκληρώνουμε αποτέλεσμα της πράξης.

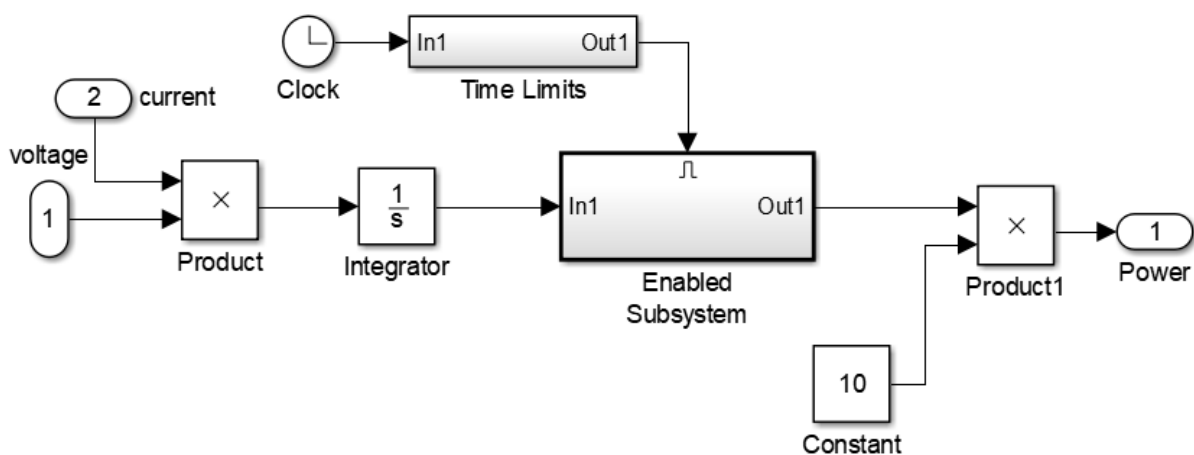
Για τον ορισμό των ορίων του ολοκληρώματος, η έξοδος του ολοκληρωτή εισέρχεται σε ένα “Enabled System”, το οποίο πρόκειται για ένα στοιχείο που δέχεται ως είσοδο ένα σήμα και ένα παλμό προσφέροντας ως έξοδο το ίδιο σήμα της εισόδου μόνο για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο παλμός είναι θετικός. Το χρονικό διάστημα που επιλέξαμε στην εφαρμογή μας είναι 1.9-2 sec το οποίο αποτελεί τη διάρκεια μιας περιόδου ενώ παράλληλα το σύστημα βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση. Τέλος, υπολογίζεται το γινόμενο του σήματος εξόδου που παραθέτει το παραπάνω σύστημα με τη συχνότητα που έχει οριστεί για τη λειτουργία της γεννήτριας. Η υλοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 4.10.

Για τον υπολογισμό της ισχύος στην μπαταρία αρκεί ο πολλαπλασιασμός των σημάτων τάσης και ρεύματος όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 4.11.

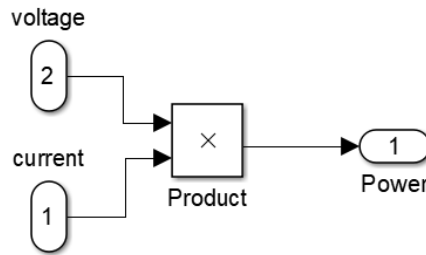
Τελευταίο υποσύστημα για τις μετρήσεις, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9, και σκοπός του είναι η ολοκλήρωση του ρεύματος της γεννήτριας  $i_{TENG}$  ώστε να προκύψει το σήμα του αντίστοιχου ηλεκτρικού φορτίου. Με τη χρήση ενός “Enabled System”, απομονώνεται η χρήσιμη πληροφορία του σήματος (όταν βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση), και πραγματοποιείται η γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών τάσης – φορτίου.



Σχήμα 4.9 - Υλοποίηση υποσυστήματος INTEGRATOR.



Σχήμα 4.10 - Υλοποίηση υποσυστήματος “Power Calculator” για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου TENG.



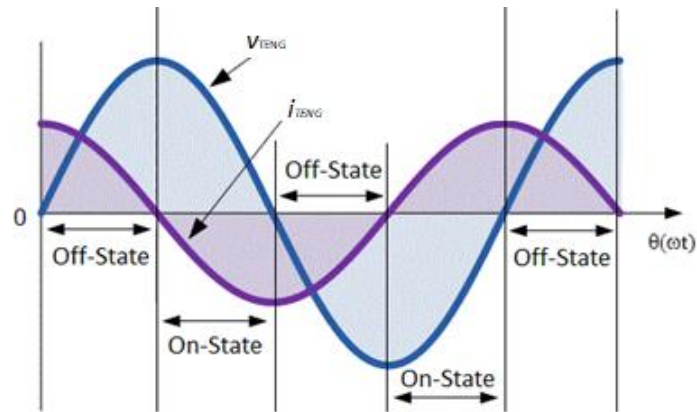
**Σχήμα 4.11** - Υλοποίηση υποσυστήματος “Power Calculator 1” για τον υπολογισμό ισχύος της μπαταρίας.

Σε επόμενο βήμα, υλοποιήθηκε ο έλεγχος του διακόπτη που βρίσκεται μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή. Ο διακόπτης στην αρχική του κατάσταση είναι ανοικτός. Όταν το ρεύμα  $i_{TENG}$  αποκτήσει μηδενική τιμή, συνεπώς το φορτίο γίνει μέγιστο, ο διακόπτης κλείνει, αναγκάζοντας με αυτό το τρόπο το φορτίο να φτάσει σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές και παραμένει κλειστός μέχρι η τιμή της τάσης της γεννήτριας  $v_{TENG}$  να μηδενιστεί λόγω βραχυκύκλωσης. Τότε, ο διακόπτης ανοίγει και παραμένει ανοικτός μέχρι τον επόμενο μηδενισμό του ρεύματος.

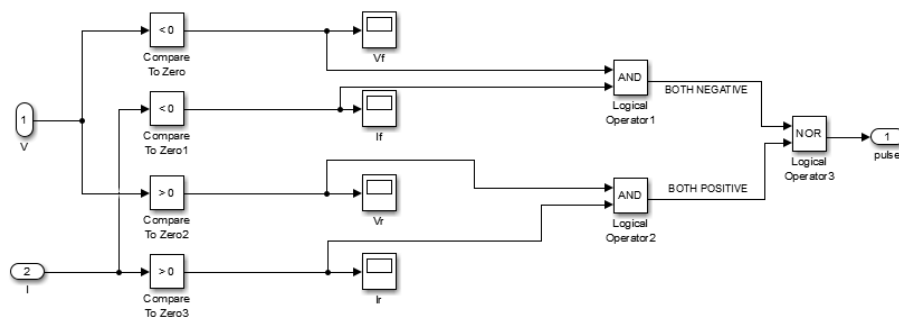
Αρχικό πρόβλημα με την υλοποίηση στο περιβάλλον του Simulink ήταν το γεγονός ότι όσο και να μειωθεί το χρονικό βήμα εκτέλεσης της προσομοίωσης, ποτέ δεν θα ήταν εφικτό να εντοπιστεί μια διακριτή τιμή όπως το μηδέν που είναι ο στόχος στη συγκεκριμένη περίπτωση. Επίσης, σε κάθε περίοδο οι τιμές που διαχειρίζεται ο έλεγχος του διακόπτη διαφέρουν, ενώ το κάθε σήμα στο Simulink είναι ένας πίνακας στοιχείων χωρίς σταθερό βήμα διαφοράς μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ο εντοπισμός του zero-crossing να μην βοηθά.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού έγινε χρήση της εξής τεχνικής: η λειτουργία του διακόπτη είναι να κλείνει όταν εντοπίζεται μηδενική τιμή ρεύματος στη γεννήτρια, και να ανοίγει ξανά μόλις η τιμή της τάσης  $v_{TENG}$  πέσει στο μηδέν. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα παλμό διάρκειας χρόνου ίσου με την εμφάνιση διαδοχικών μηδενικών πρώτα του ρεύματος και μετά της τάσης. Με βάση τα παραπάνω και το Σχήμα 4.12 ο παλμός κατά τον οποίο ο διακόπτης τίθεται εν ενεργεία βρίσκεται όταν το ρεύμα  $i_{TENG}$  και η τάση  $v_{TENG}$  είναι ετερόσημα.

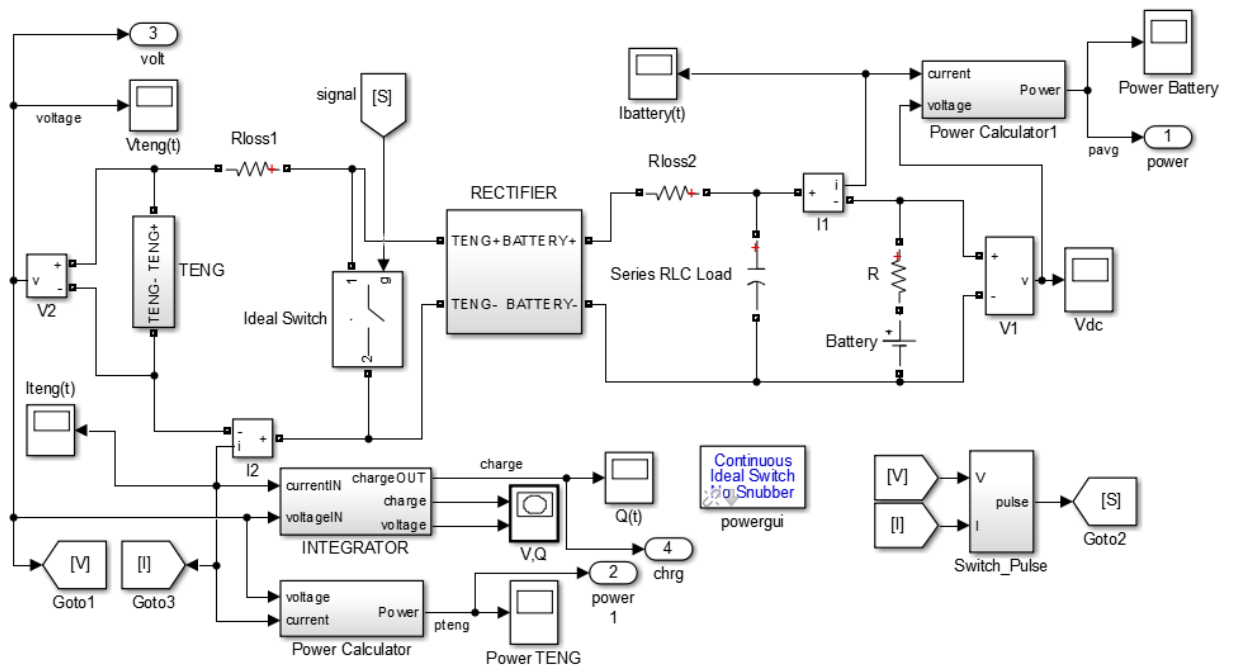
Η υλοποίηση του συστήματος του διακόπτη έχει όνομα “Switch\_Pulse” και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13. Τέλος, στο Σχήμα 4.14 βρίσκεται το τελικό μοντέλο έπειτα από τη χρήση του διακόπτη.



Σχήμα 4.12 - Γραφική αναπαράσταση σημάτων που διαχειρίζεται ο έλεγχος του διακόπτη.



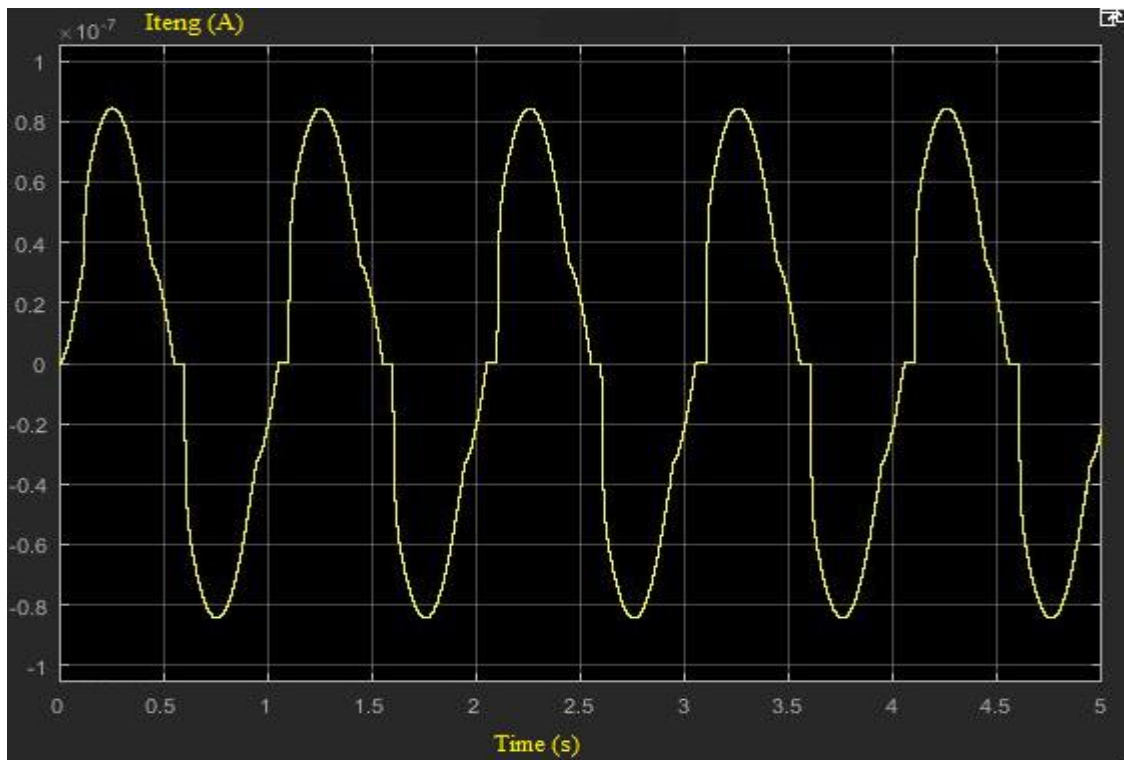
Σχήμα 4.13 - Υλοποίηση ελέγχου διακόπτη στο υποσύστημα “Switch\_Pulse”.



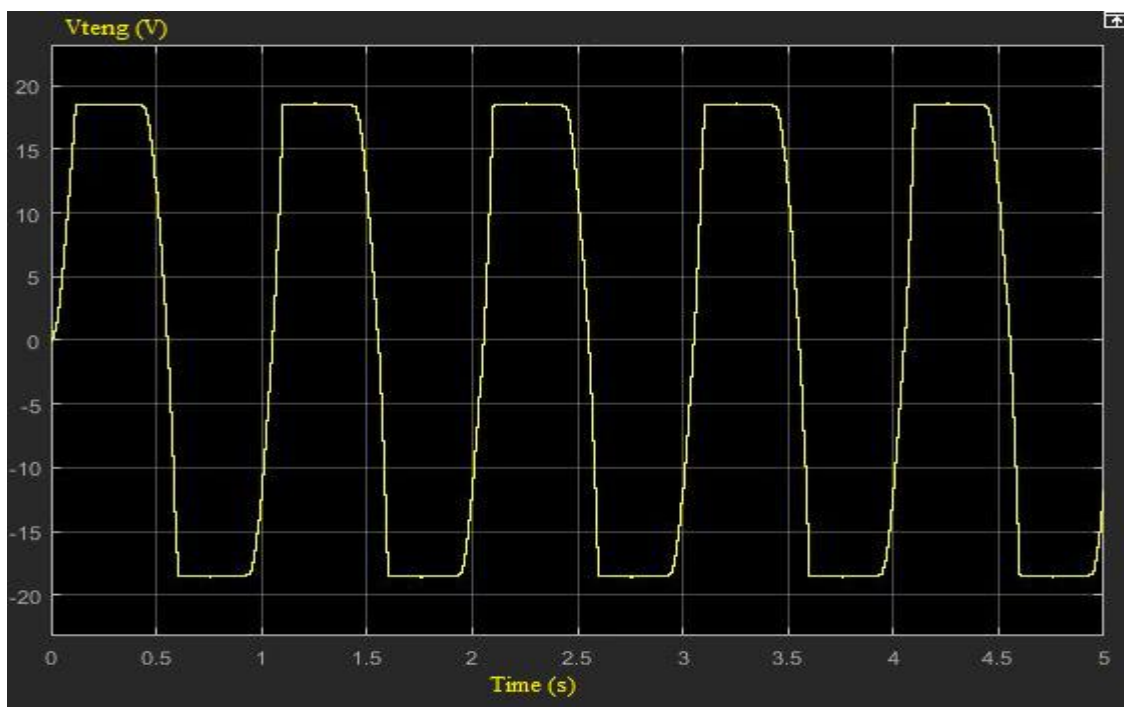
Σχήμα 4.14 - Μοντέλο προσομοίωσης δεύτερου κυκλώματος TENG-SWITCH-RECTIFIER-BATTERY.



Στα Σχήματα 4.15 και 4.16, εμφανίζονται τα σήματα για το ρεύμα και την τάση της γεννήτριας αντίστοιχα με τη χρήση του ελέγχου του διακόπτη.



Σχήμα 4.15 - Ρεύμα τριβοηλεκτρικής γεννήτριας για τάση μπαταρίας 18 Volt.

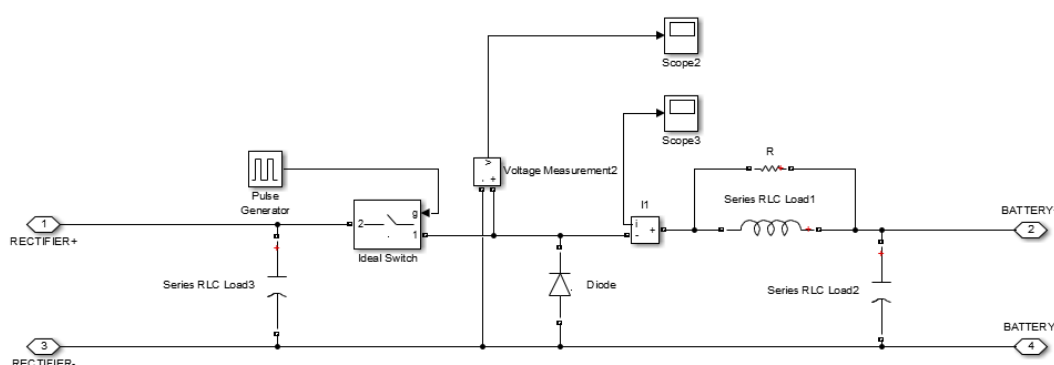


Σχήμα 4.16 – Τάση τριβοηλεκτρικής γεννήτριας για τάση μπαταρίας 18 Volt.

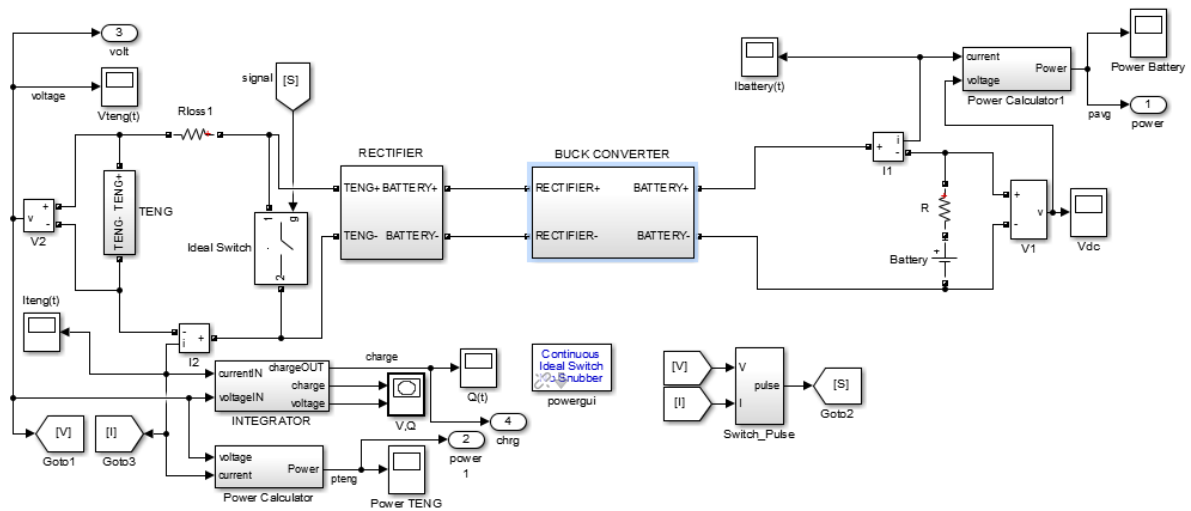
Για την προσομοίωση του μετατροπέα Buck, έγινε υλοποίηση ενός κλασσικού μετατροπέα τύπου Buck με DC πηγή τάσης ως είσοδο και μία αντίσταση στην έξοδο. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ρύθμιση στις τιμές πηνίου και πυκνωτή ώστε η κυμάτωση στην τάση και το ρεύμα εξόδου να είναι μικρή. Επίσης εξετάστηκε η ορθή λειτουργία του για διαφορετικές τιμές duty cycle. Έπειτα, αφαιρέθηκε το φορτίο από την έξοδο του μετατροπέα και έγινε σύνδεση μιας επιπλέον DC πηγή τάσης που θα έχει το ρόλο του φορτίου.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα υποσύστημα το οποίο ονομάστηκε “BUCK CONVERTER”, και εντός αυτού τοποθετήθηκε το κύκλωμα του μετατροπέα που αναλύθηκε προηγουμένως. Η υλοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Επιπλέον, προστέθηκε μια μεγάλη αντίσταση παράλληλα στο πηνίο της τάξης των GΩ καθώς είναι απαραίτητη όπως εδεικνυε ο solver του Simulink. Η γεννήτρια παλμών στον έλεγχο του διακόπτη είναι ρυθμισμένη σε συχνότητα 20kHz. Για την κατασκευή του αλγορίθμου MPPT υλοποιήθηκε κώδικας MATLAB ο οποίος διαχειρίζεται την αλλαγή του duty cycle και την διοχετεύει απευθείας στη γεννήτρια. Το τελικό κύκλωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18.

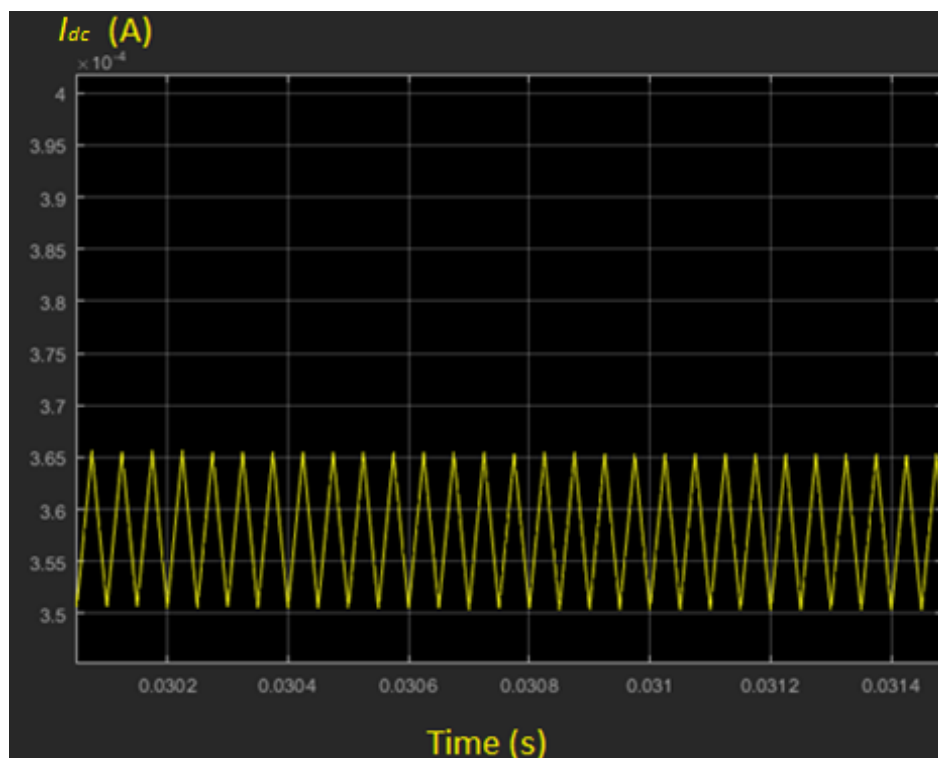
Στα Σχήματα 4.19, 4.20 και 4.21 εμφανίζονται γραφικές αναπαραστάσεις των σημάτων του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης που επιβεβαιώνουν την ορθή λειτουργία του, πρώτα για το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, στην συνέχεια για τη τάση στα άκρα της διόδου και τέλος της τάσης εισόδου του μετατροπέα.



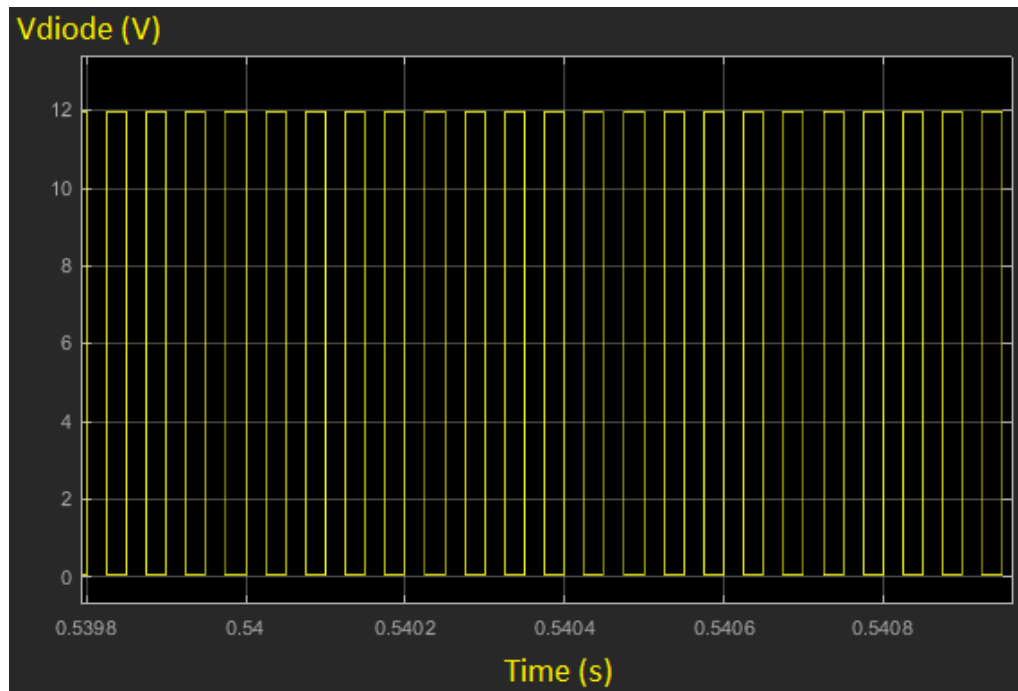
**Σχήμα 4.17** - Υλοποίηση Buck converter, υποσύστημα “BUCK CONVERTER”.



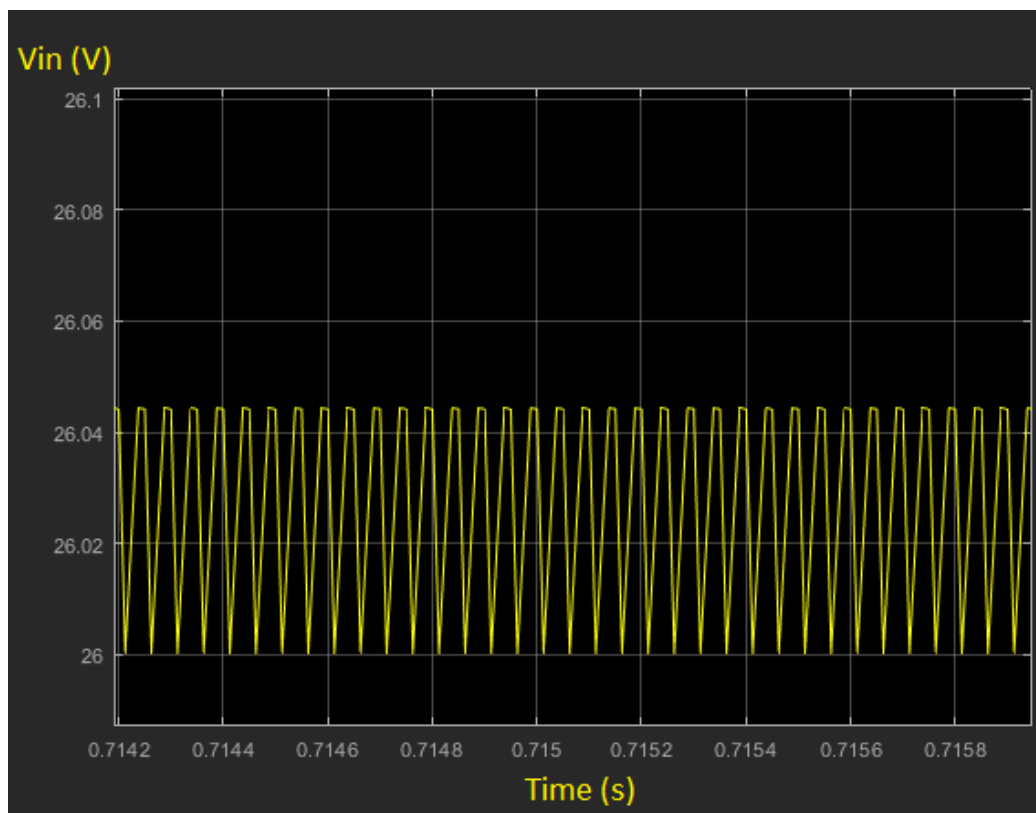
**Σχήμα 4.18** - Μοντέλο προσομοίωσης κυκλώματος TENG-SWITCH-RECTIFIER - BUCK CONVERTER-BATTERY.



**Σχήμα 4.19** - Ρεύμα μόνιμης κατάστασης στην έξοδο του Buck converter για duty cycle ίσο με 50 %.

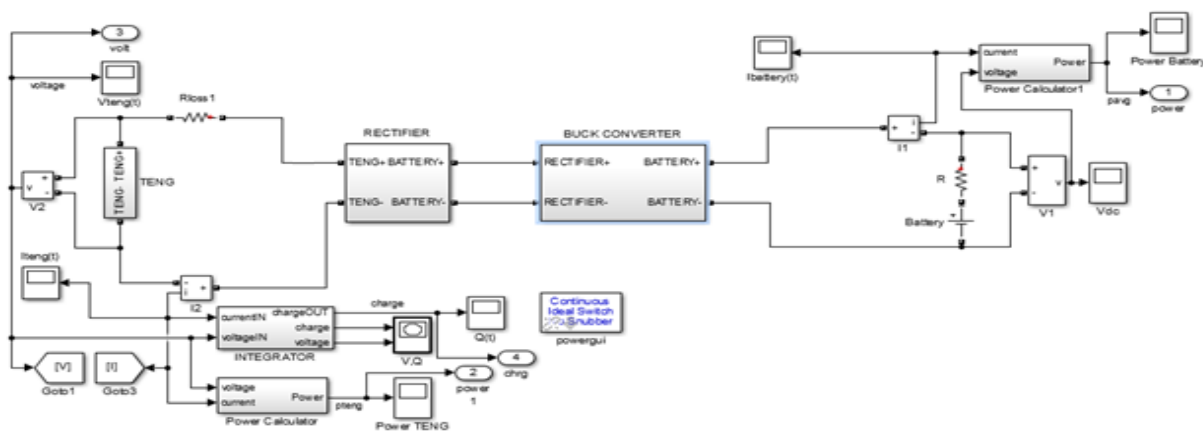


**Σχήμα 4.20** - Τάση στα άκρα της διόδου του Buck converter για τάση εισόδου 12V.



**Σχήμα 4.21** - Τάση στην έξοδο του ανορθωτή.

Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα ακόμα μοντέλο. Πρόκειται για το TENG-RECTIFIER-BUCK CONVERTER-BATTERY, όπου ουσιαστικά απουσιάζει η υλοποίηση του διακόπτη μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή. Το μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 4.22, και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι όμοια με εκείνα που περιγράψαμε στην υλοποίηση του προηγούμενου μοντέλου με διακόπτη.



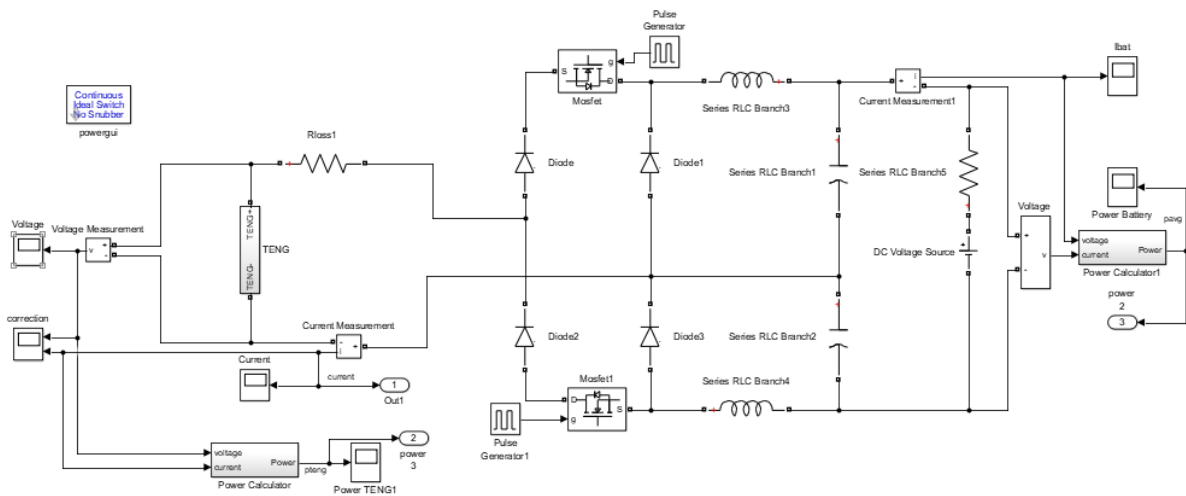
**Σχήμα 4.22** - Μοντέλο προσομοίωσης κυκλώματος TENG -RECTIFIER-BUCK CONVERTER-BATTERY.

Στόχος των επόμενων προσομοιώσεων είναι η υλοποίηση των κυκλωμάτων των μετατροπέων Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter και Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier με σκοπό τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Πρώτη τεχνική αποτέλεσε ο Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter, ο οποίος πρόκειται για μία διάταξη που πραγματοποιεί υποβιβασμό τάσης στο φορτίο καθώς ο έλεγχος για την ρύθμιση της τάσης της γεννήτριας βελτιώνει το συντελεστή ισχύος.

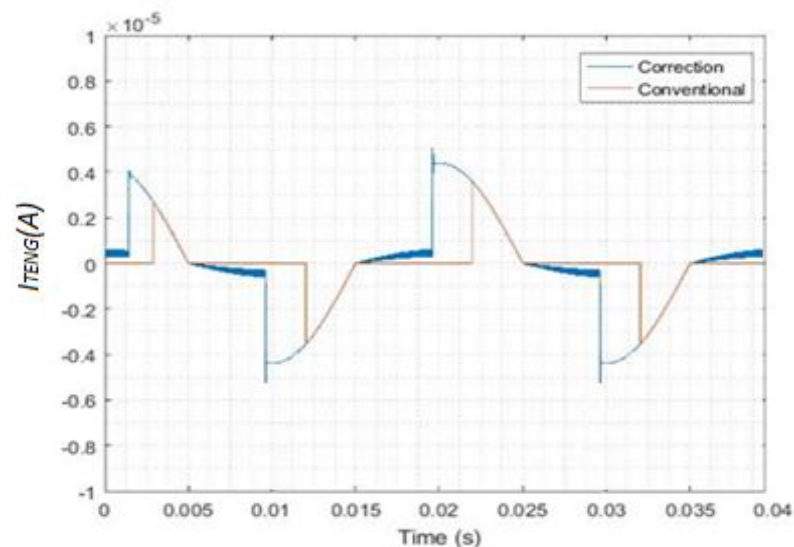
Η υλοποίηση είναι βασισμένη στην περιγραφή που έγινε στην παράγραφο 3.3 και η τοπολογία του κυκλώματος προσομοίωσης είναι εμπνευσμένη από το Σχήμα 3.7. Για την υλοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης του χρησιμοποιήθηκε το αρχικό μοντέλο που περιγράφεται Σχήμα 4.5. Έγινε αφαίρεση του υποσυστήματος του ανορθωτή RECTIFIER και στην συνέχεια προστέθηκαν τα στοιχεία όπως μας υποδεικνύει η βιβλιογραφία.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζεται το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο Simulink. Καθώς πρόκειται για τη λειτουργία δύο μετατροπείς Buck, ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε στο σύστημα ήταν όμοιος με εκείνο που εκπονήθηκε για τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

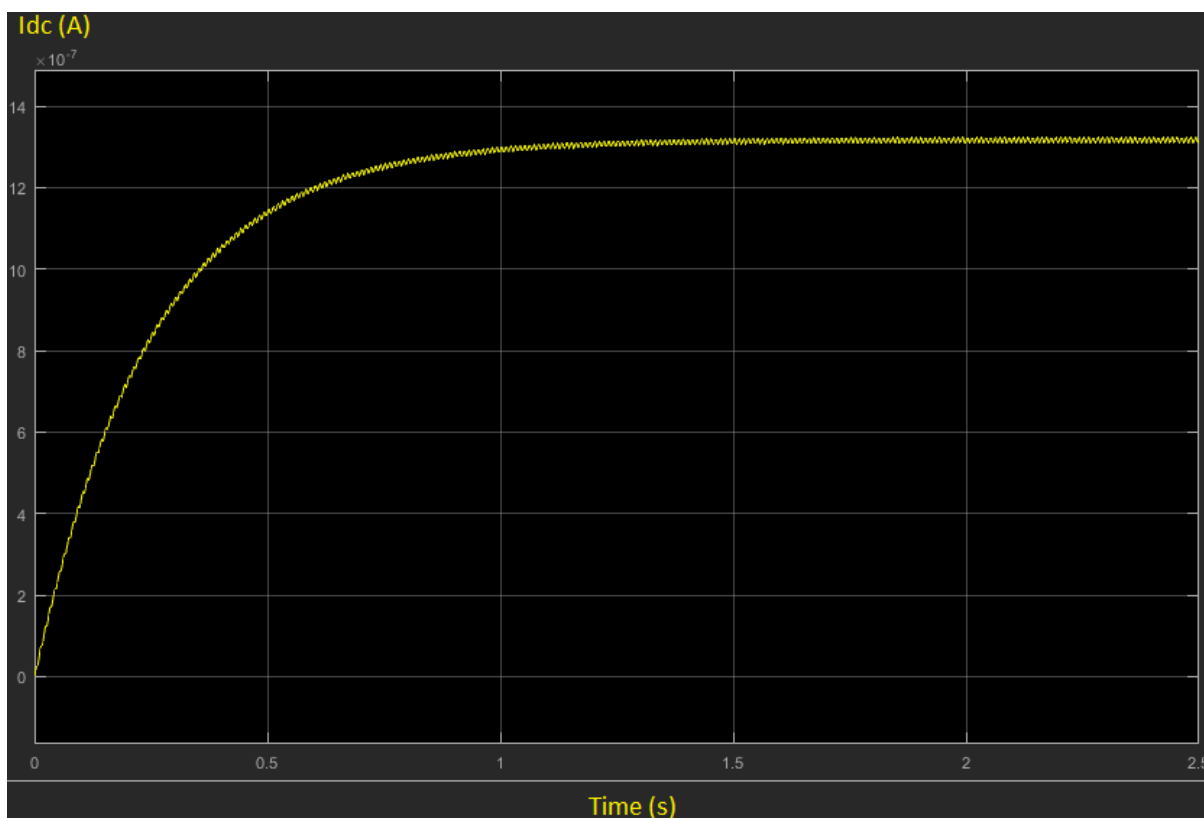
Η ρύθμιση στις τιμές των στοιχείων (πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις) πραγματοποιήθηκε με σκοπό το ρεύμα της γεννήτριας  $i_{TENG}$  να σχηματίζει όσο το δυνατόν μικρότερη γωνία με το σήμα της τάσης  $v_{TENG}$  και πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ αυτού και του αντίστοιχου ρεύματος της γεννήτριας υπό λειτουργία του συμβατικού μοντέλου (βλ. Σχήμα 4.5) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24. Τέλος, στο Σχήμα 4.25 φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος εξόδου του ανορθωτή μέχρι τη μόνιμη κατάσταση.



**Σχήμα 4.23** - Μοντέλο προσομοίωσης της πρώτης τεχνικής βελτίωσης συντελεστή ισχύος – Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.



**Σχήμα 4.24** – Βελτίωση συντελεστή ισχύος για φορτίο μπαταρίας 18 Volt, με πηγή σε λειτουργία συχνότητας 50 Hz.



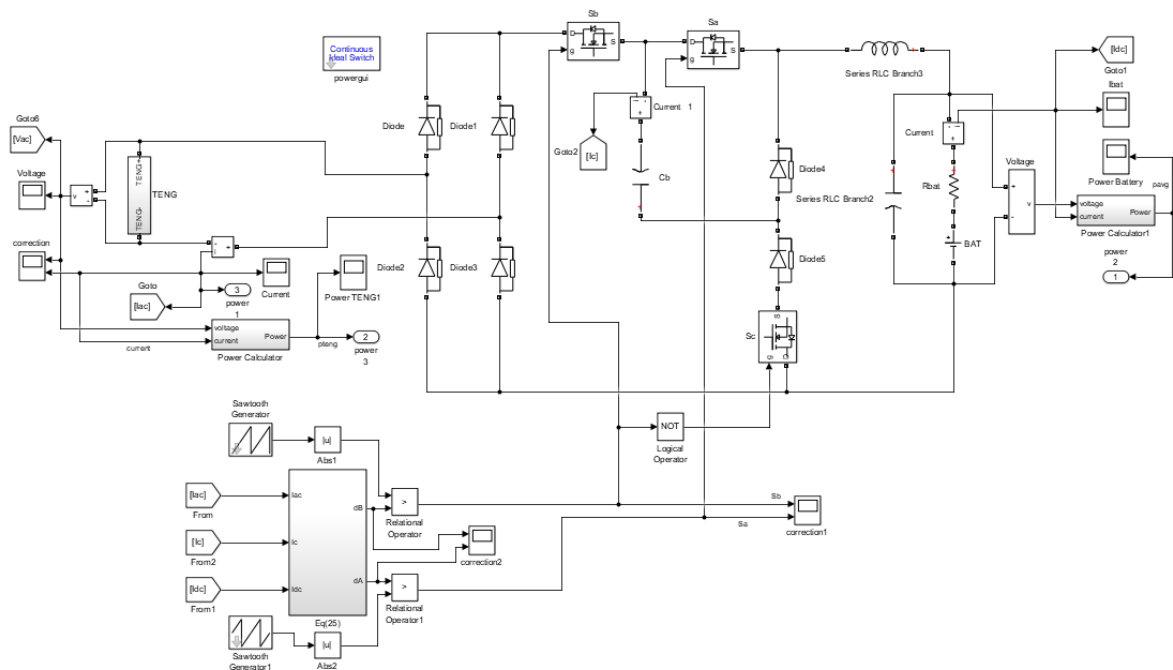
**Σχήμα 4.25** - Ρεύμα εξόδου Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter, για τάση μπαταρίας 18 Volt.

Όπως συνέβη και με την προηγούμενη υλοποίηση, έτσι και η δεύτερη τεχνική κατασκευάστηκε σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που διαθέταμε και αναφέραμε στην παράγραφο 3.4. Απομακρύνθηκε ο ανορθωτής από την διάταξη του συμβατικού μοντέλου και προστέθηκε η υλοποίηση του Flying – Capacitor Buck Power-Factor-Correction Rectifier με βάση το Σχήμα 3.13. Το πρώτο στοιχείο για το οποίο έγινε μελέτη της τιμής του ήταν ο πυκνωτής  $C_b$ . Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός για τις τιμές σε πηνίο  $L$  και πυκνωτή  $C_{dc}$  που υπήρχαν στην έξοδο του συστήματος, προσφέροντας στην έξοδο ρεύμα  $i_{dc}$  χωρίς μεγάλη κυμάτωση και γρήγορη μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση (Σχήμα 4.27).

Για την υλοποίηση του συστήματος ελέγχου, απαραίτητες ήταν οι τιμές των τάσεων και ρευμάτων από διάφορα σημεία του κυκλώματος. Επιπλέον κατασκευάστηκε ένα υποσύστημα με το όνομα “Eq(15.16)” εντός του οποίου γινόταν υλοποίηση των αντίστοιχων εξισώσεων 3.15 και 3.16 και εμφανίζεται στο Σχήμα 4.27.

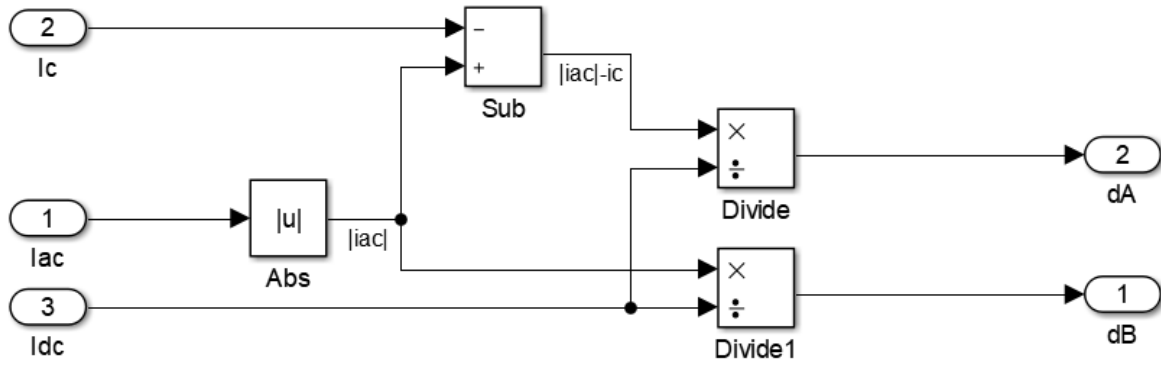
Το υποσύστημα έχει ως εισόδους τα ρεύματα  $i_{dc}$ ,  $i_{ac}$  και  $i_c$ . Η υλοποίηση των εξισώσεων 3.15 και 3.16 είναι αρκετή για την παραγωγή των σημάτων  $d_A$  και  $d_B$ . Αυτό συμβαίνει διότι όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, οι περαιτέρω υλοποιήσεις αφορούν τους λειτουργικούς περιορισμούς (π.χ. το duty cycle να μην ξεπερνά το 100 %) αλλά και τις ανοχές των υλικών, γεγονός που αντιμετωπίζεται πιο εύκολα σε συνθήκες προσομοίωσης και επιπλέον θα αύξανε δραματικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα προσομοίωσης του κυκλώματος.

Η τελική υλοποίηση του Flying – Capacitor Buck Power-Factor-Correction Rectifier φαίνεται στο Σχήμα 4.26. Τα υποσυστήματα για τον υπολογισμό των τιμών ισχύος είναι τα ίδια που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενες υλοποιήσεις. Γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων της μπαταρίας και της γεννήτριας παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4.28 και 4.29.

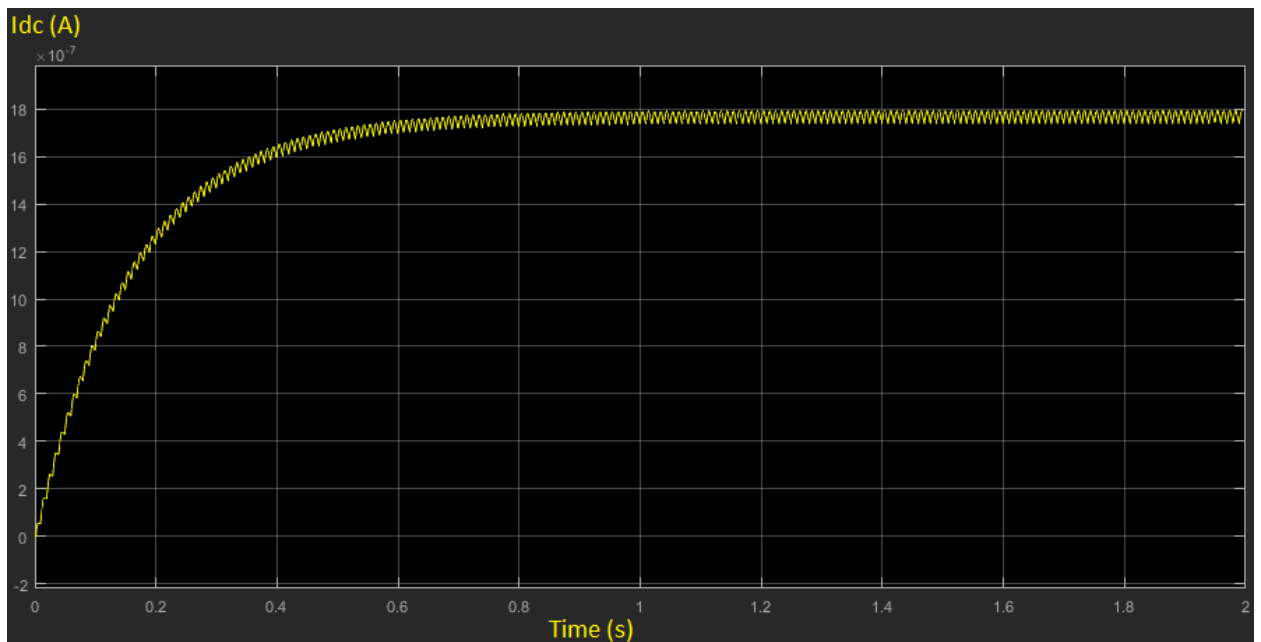


**Σχήμα 4.26** - Μοντέλο προσομοίωσης δεύτερης τεχνικής βελτίωσης συντελεστή ισχύος - Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier.

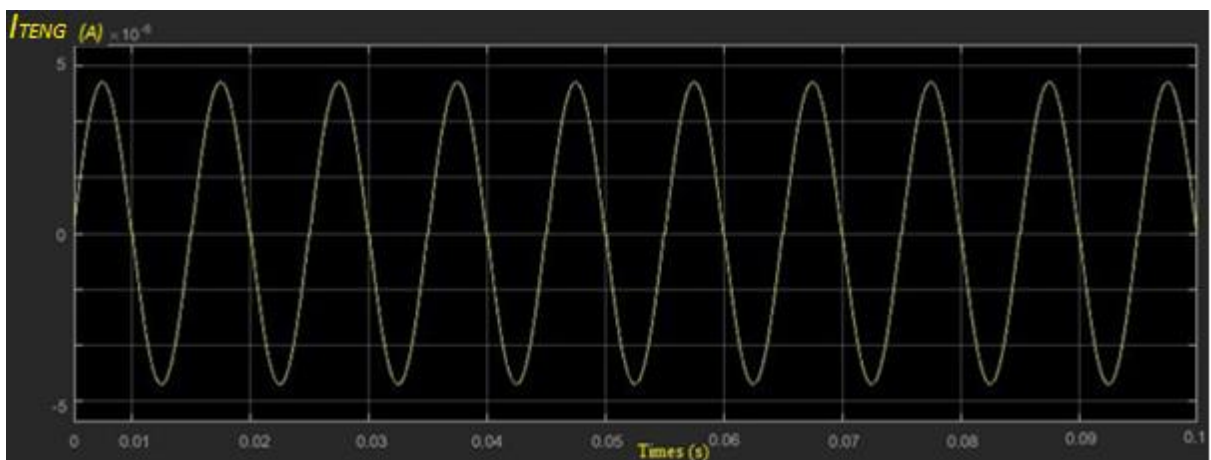




Σχήμα 4.27 – Υποσύστημα υλοποίησης των εξισώσεων 3.15 και 3.16 με όνομα “Eq(15.16)”.



Σχήμα 4.28 - Ρεύμα μπαταρίας στη διάταξη του Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier,  $I_{DC}$ , για τάση μπαταρίας 18 Volt.



Σχήμα 4.29 – Ρεύμα τριβοηλεκτρικής γεννήτριας στη διάταξη του Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier,  $I_{AC}$ , για τάση μπαταρίας 18 Volt.

## 5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά τις προσομοιώσεις, αλλά και οι συγκρίσεις των τιμών ισχύος μεταξύ αυτών. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε γραφικές παραστάσεις τύπου “stem” (ραβδοδιάγραμμα) από το περιβάλλον της MATLAB για την πορεία της ισχύος, με τη χρήση διαφόρων τιμών στις μεταβλητές του κυκλώματος, όπως τάση μπαταρίας και duty cycle, καθώς και 3D διαγράμματα σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονταν και τα δύο. Επιπλέον στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται γραφικές παραστάσεις των χαρακτηριστικών τάσης - φορτίου που προκύπτουν με βάση τη λειτουργία των κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα αφορούν και πίνακες, οι οποίοι αναγράφουν πληροφορίες για τον βαθμό απόδοσης ισχύος μετά την υλοποίηση κάθε κυκλώματος, αλλά και ποσοστά βελτίωσης της παραγωγής ισχύος που προσέφερε η κάθε υλοποίηση έναντι του αρχικού κυκλώματος, τόσο από πλευρά γεννήτριας, όσο και από πλευρά μπαταρίας.

Τα αποτελέσματα συνοδεύονται από αναλυτική περιγραφή και εξήγηση για το κατά πόσο είναι ορθά και συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα θεωρητικά που μελετήθηκαν, καθώς χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος που είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία.

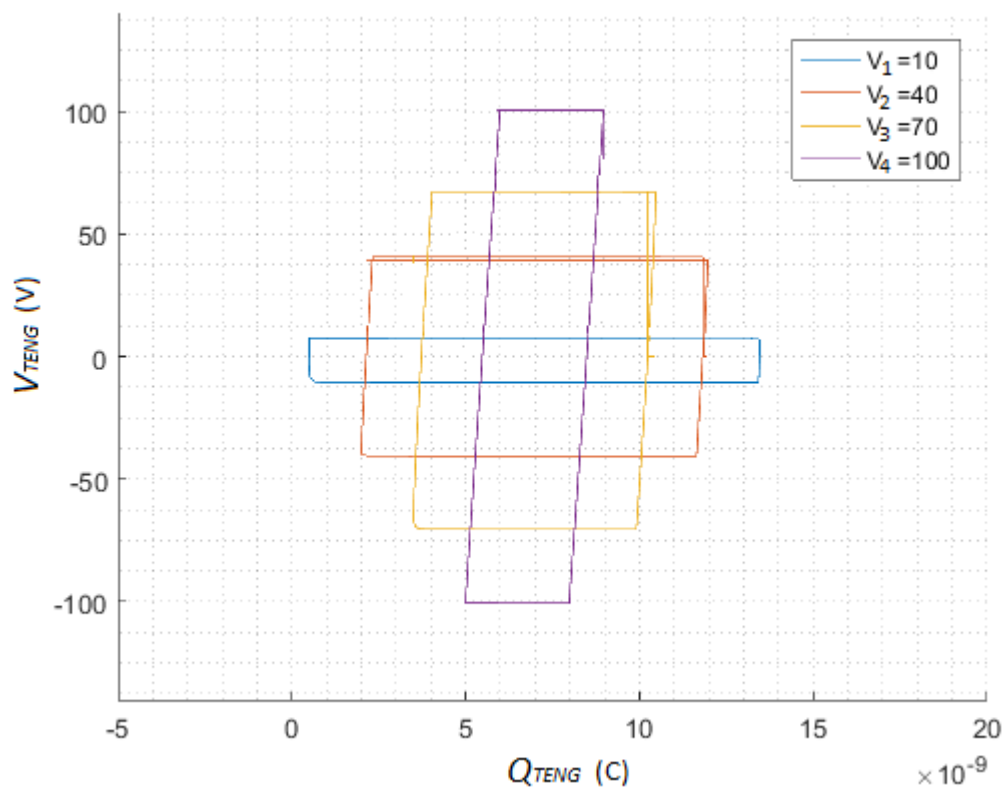
Οι συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν οι εξής :

- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-SWITCH-RECTIFIER-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG -RECTIFIER-BUCK-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-SWITCH-RECTIFIER-BUCK-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-BRIDGELESS PFC-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-FLYING CAPACITOR PFC-BATTERY.

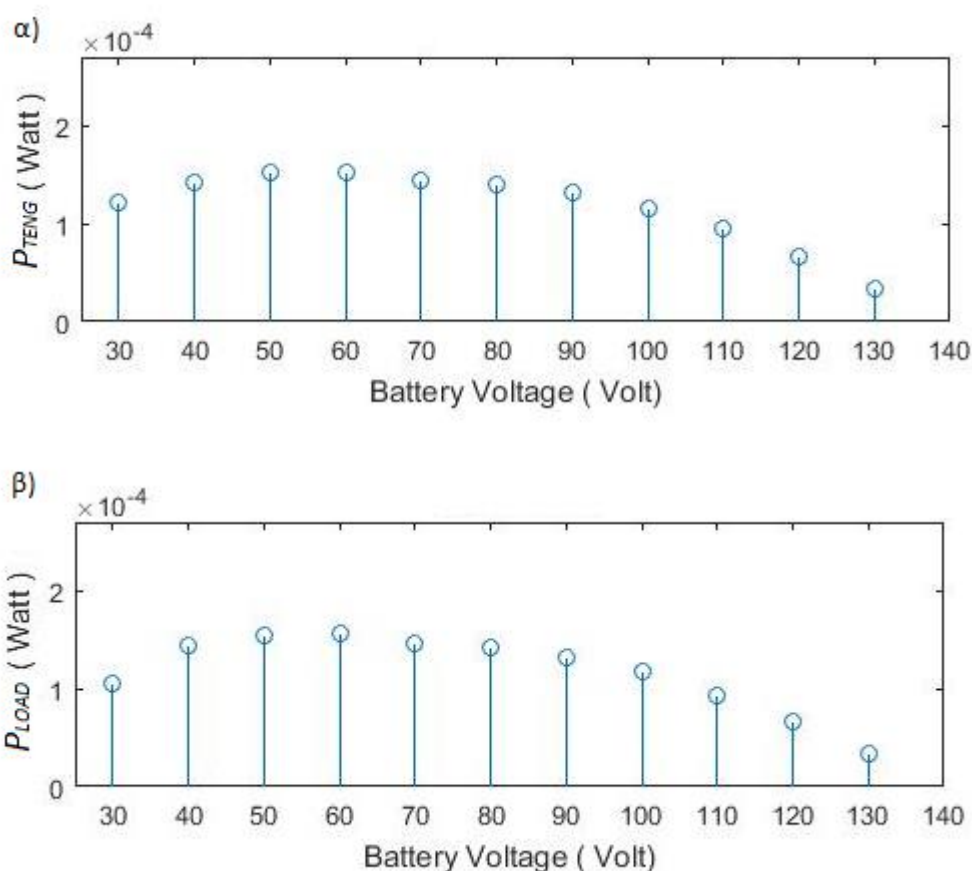
Επιπλέον, όλα τα παραπάνω προσομοιώθηκαν και για τις δύο περιπτώσεις τριβοηλεκτρικών γεννητριών που υλοποιήθηκαν και αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2, με πλάτη τάσης 140 και 280 Volt, αντίστοιχα.

Πρώτα έγινε ανάπτυξη του μοντέλου TENG στο οποίο η τάση είναι ημίτονο με πλάτος 140 Volt χωρίς συνιστώσα DC.

Αρχικός σκοπός ήταν να αποδειχθεί πως όντως καθώς αυξάνεται το εμβαδόν των χαρακτηριστικών τάσης - φορτίου, η ισχύς στην γεννήτρια αυξάνεται. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές παραστάσεις τάσης - φορτίου για διάφορες τιμές τάσης της μπαταρίας κατά τη λειτουργία του συμβατικού κυκλώματος. Στη συνέχεια, το Σχήμα 5.2 περιγράφει την μεταβολή της ισχύος σε γεννήτρια και φορτίο για τις διάφορες αυτές τιμές. Εμφανές ομοιότητα με τα θεωρητικά αποτελέσματα του Σχήματος 2.14.

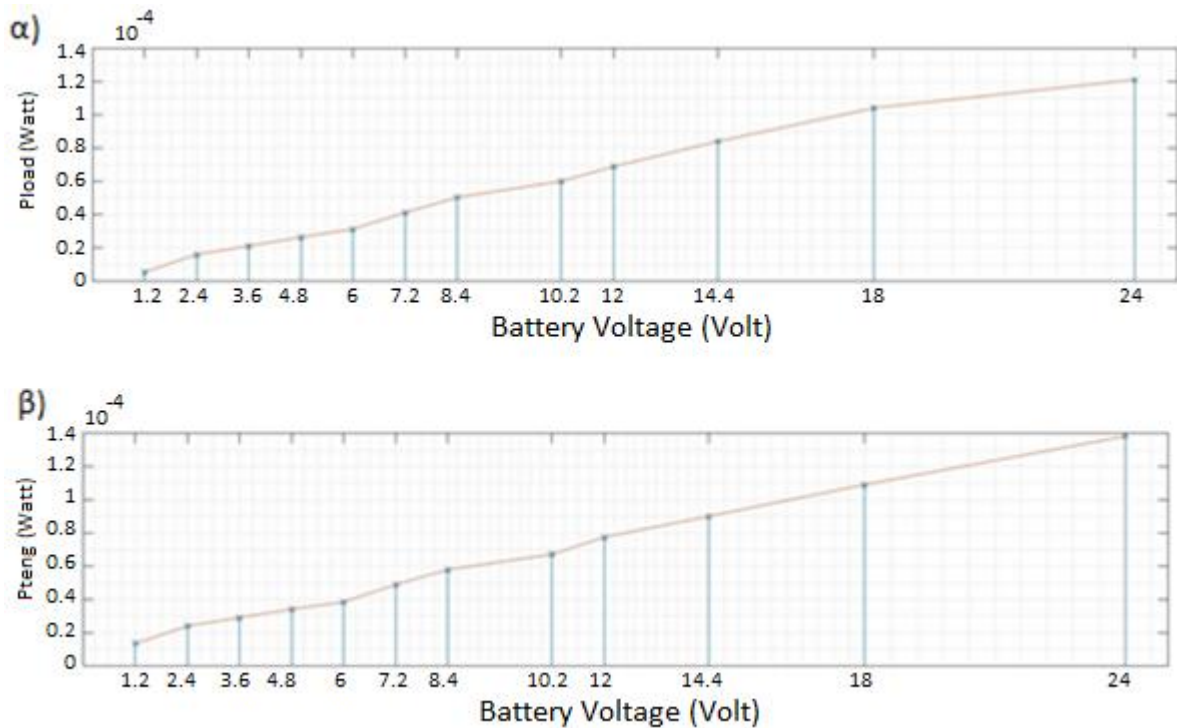


**Σχήμα 5.1** – Χαρακτηριστικές τάσης - φορτίου για διαφορετικές τιμές τάσης μπαταρίας ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ ) κατά τη λειτουργία του συμβατικού κυκλώματος.



**Σχήμα 5.2** – α) Μεταβολή ισχύος για διαφορετικές τιμές στην τάση μπαταρίας, σε γεννήτρια και β) φορτίο, κατά τη λειτουργία του συμβατικού κυκλώματος.

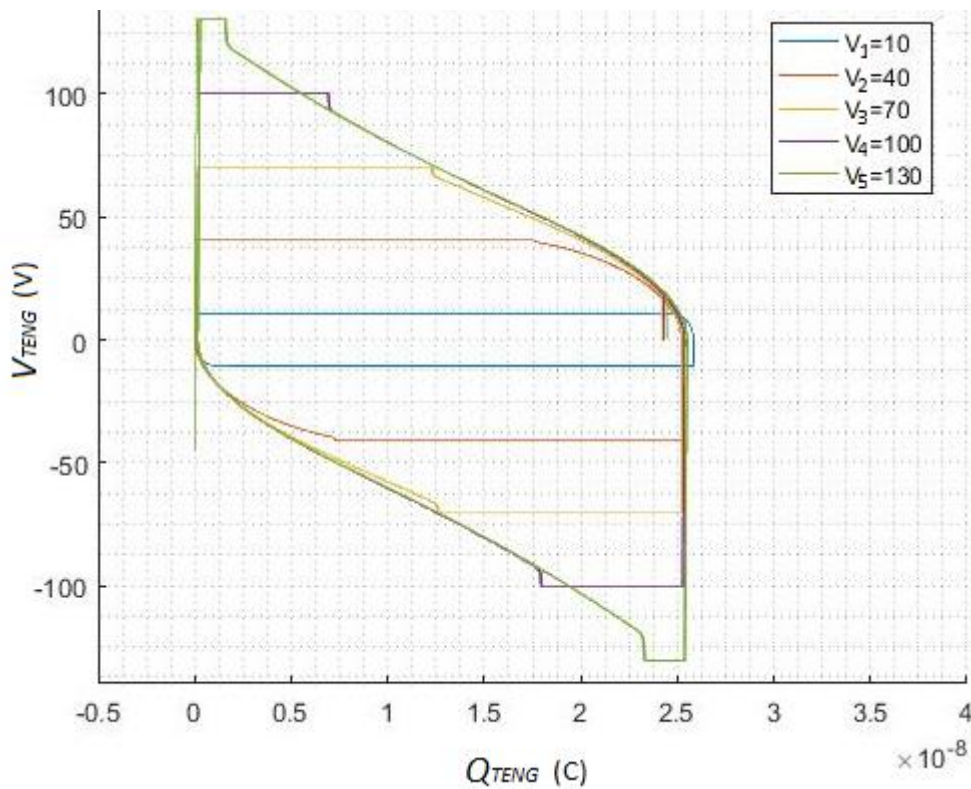
Η απόκλιση τιμών ισχύος είναι μικρή μεταξύ γεννήτριας και μπαταρίας, γεγονός που υποδεικνύει υψηλές τιμές στον βαθμό απόδοσης του κυκλώματος. Επιπροσθέτως, παρατηρείται πως το ολικό μέγιστο των δύο καμπυλών βρίσκεται μεταξύ των τιμών 50 Volt και 70 Volt για τις τάσεις της μπαταρίας. Ωστόσο η χρήση τόσο μεγάλων τιμών τάσεως σε μπαταρίες δεν είναι ρεαλιστική, καθώς οι πρακτικές εφαρμογές των TENGs προσανατολίζονται σε φόρτιση μπαταριών με τιμές τάσης από 1 έως 24 Volt. Κατά τη χρήση μπαταριών μικρής τάσης θα παρατηρείται μια γενική αύξηση ισχύος, αφού το μέγιστο δεν αποκτάται ποτέ. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η πορεία ισχύος για διάφορες τιμές τάσης μπαταρίας.



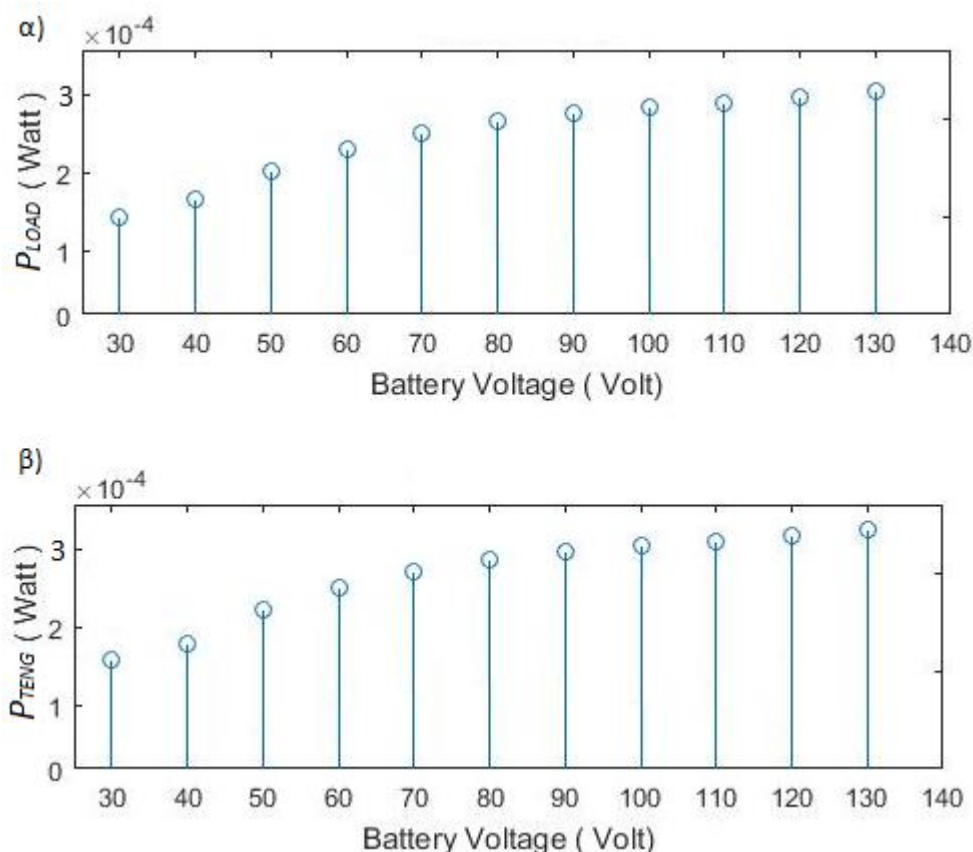
**Σχήμα 5.3** – Μεταβολή ισχύος α) σε φορτίο και β) στη γεννήτρια, για μικρότερες τιμές στην τάση μπαταρίας κατά τη λειτουργία του συμβατικού κυκλώματος.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του Σχήματος 5.3 είναι τιμές τάσης μπαταριών που διατίθενται στο εμπόριο και βρίσκονται πιο κοντά στις εφαρμογές τις οποίες έχουν σκοπό να ικανοποιήσουν οι τριβοηλεκτρικές γεννήτριες, όπως μπαταρίες κινητών τηλεφώνων και άλλων φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Η πορεία της ισχύος φαίνεται να ανεβαίνει όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, αφού οι τιμές της τάσης εξόδου δεν υπερβαίνουν τα 50 Volt.. Η απόκλιση που παρουσιάζει η τιμή ισχύος που εμφανίζουν οι διάφορες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στο Σχήμα 5.3 με τη μέγιστη τιμή ισχύος που εμφανίζεται κοντά στα 60 Volt είναι περίπου στο 66% για την γεννήτρια και περίπου στα 69% για την μπαταρία.

Μετά τη διερεύνηση της λειτουργίας του συμβατικού κυκλώματος, επόμενο βήμα είναι η μελέτη λειτουργίας του διακόπτη στο κύκλωμα (βλ. Σχήμα 4.2). Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών τάσης – φορτίου που κατασκευάστηκε για τον υπολογισμό της αύξησης ισχύος για τη διερεύνηση του κατά πόσο τα στοιχεία που εξάγουμε συμπίπτουν με τα θεωρητικά. Οι χαρακτηριστικές αυτές φαίνεται να αυξάνουν δραματικά τα επίπεδα ισχύος της γεννήτριας καθώς το εμβαδόν είναι αισθητά μεγαλύτερο. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η πορεία ισχύος για διάφορες τιμές τάσης της μπαταρίας και κατά πόσο βελτιώθηκε μετά από την πρώτη προσθήκη, αφού οι τιμές μοιάζουν σημαντικά υψηλότερες από εκείνες του Σχήματος 5.2.



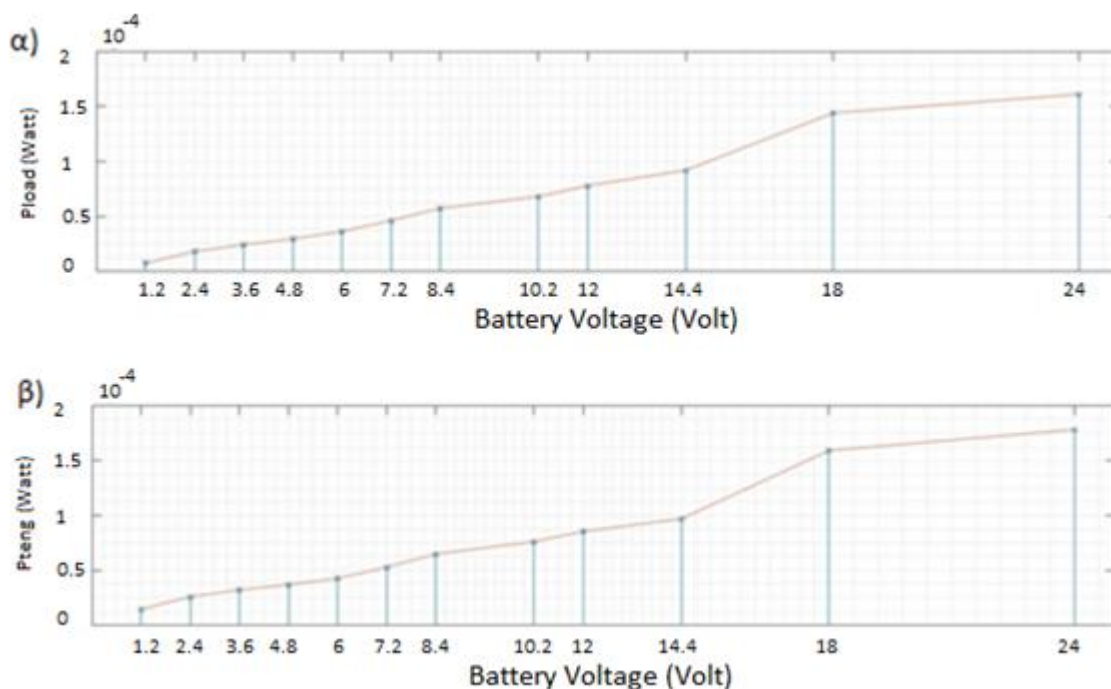
**Σχήμα 5.4** - Χαρακτηριστικές τάσης - φορτίου για διαφορετικές τιμές τάσης μπαταρίας ( $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$ ) με τη χρήση διακόπτη.



**Σχήμα 5.5** - α) Μεταβολή ισχύος σε φορτίο και β) γεννήτρια, για διαφορετικές τιμές στην τάση μπαταρίας και με τη χρήση διακόπτη.

Ομοίως, οι χαρακτηριστικές στο Σχήμα 5.4 ταυτίζονται με εκείνες που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 (βλ. Σχήμα 4.2). Το εμβαδόν αυξάνεται συνεχώς για μεγαλύτερες τιμές τάσης μπαταρίας. Οι τιμές ισχύος που παρουσιάζονται με την συγκεκριμένη υλοποίηση εμφανίζουν σημαντική αύξηση σε σύγκριση με εκείνη του συμβατικού κυκλώματος και είναι ανάλογες της τάσης της μπαταρίας στο φορτίο. Φυσικά η ισχύς δεν αυξάνεται συνεχώς, αλλά σταματά στο σημείο όπου η τάση μπαταρίας ισούται με το πλάτης της τάσης ανοικτοκύκλωσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση 140 Volt. Ο έλεγχος του διακόπτη αποσκοπεί στην παραγωγή του  $Q_{sc_{max}}$ , κάτι το οποίο προηγουμένως δεν ήταν εφικτό. Τέλος, στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ξανά η εκδοχή για τη χρήση μπαταριών με τιμές τάσης πιο κοντά σε εκείνες πραγματικών εφαρμογών.





**Σχήμα 5.6** –Μεταβολή ισχύος για διάφορες τιμές στην τάση μπαταρίας: α) σε φορτίο και β) γεννήτρια, με τη χρήση διακόπτη.

Όπως συνέβη προηγουμένως, η μεταβολή της ισχύος είναι αύξουσα, και λόγω της ιδιαίτερης χρήσης του διακόπτη αυτή η πορεία θα συνεχιστεί. Ωστόσο, καθώς η μέγιστη ισχύς βρίσκεται σε μπαταρίες με τιμή τάσης κοντά στα 140 Volt, η διαφορά με τις τιμές ισχύος που προσφέρουν οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στο Σχήμα 5.6 είναι αισθητά μεγαλύτερη.

Πιο συγκεκριμένα, από το Σχήμα 5.6 η μέση τιμή ισχύος για μια μπαταρία των 18 Volt είναι περίπου  $1.5 \times 10^{-4}$  Watt σε γεννήτρια και  $1.4 \times 10^{-4}$  Watt σε φορτίο, ενώ το Σχήμα 5.5 εμφανίζει μέγιστη τιμή ισχύος στα 140 Volt με τιμή  $3 \times 10^{-4}$  Watt σε γεννήτρια και  $2.8 \times 10^{-4}$  Watt σε φορτίο. Τα ποσοστά αυτά ανέρχονται σε 55% απόκλιση από τη μέγιστη δυνατή ισχύ για τη γεννήτρια και 65% για το φορτίο, και αυτό είναι το πρόβλημα που θα επιχειρήσει να λύσει η προσθήκη του μετατροπέα Buck στη συνέχεια της μελέτης.

Ως βαθμό απόδοσης (efficiency) ορίζουμε το πηλίκο της ισχύος που απορροφά η μπαταρία προς την ισχύ που παράγει η γεννήτρια. Με τον όρο «βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος», αναφερόμαστε στο πηλίκο της μεταβολής της μέσης τιμής της ισχύος που έχουμε μετά την προσθήκη του συστήματος προς την μέση τιμή ισχύος που διέθετε η πηγή ή το φορτίο, αντίστοιχα, κατά τη λειτουργία του συμβατικού μοντέλου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.



Αρχικά παραθέτουμε τον Πίνακα 5.1, στον οποίο αναγράφονται τιμές για τον βαθμό απόδοσης του κυκλώματος με και χωρίς τη χρήση διακόπτη για διάφορες τιμές τάσης της μπαταρίας. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται ο βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος με τη χρήση διακόπτη στα άκρα της γεννήτριας και του φορτίου.

**Πίνακας 5.1** – Βαθμός απόδοσης για την υλοποίηση κυκλώματος με και χωρίς διακόπτη.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης συμβατικού κυκλώματος	Βαθμός απόδοσης με χρήση διακόπτη
1.2	0.9299	0.8789
2.4	0.9445	0.8835
3.6	0.9384	0.9165
4.8	0.9454	0.8977
6	0.9554	0.9122
7.2	0.9341	0.9212
8.4	0.9389	0.8952
10.8	0.9488	0.8712
12	0.9117	0.8169
14.4	0.9257	0.8455
18	0.9367	0.8323
30	0.9369	0.8915
40	0.9169	0.8072
50	0.9401	0.8257
60	0.9313	0.8699
70	0.9450	0.7013
80	0.9465	0.8481
90	0.9509	0.8056
100	0.9521	0.9079
110	0.8999	0.9083
120	0.8932	0.9047
130	0.8908	0.8511

**Πίνακας 5.2** – Ποσοστά βελτίωσης ισχύος σε γεννήτρια και φορτίο με τη χρήση διακόπτη.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	95.6	89.1
2.4	91.3	85.7
3.6	86.3	83.4
4.8	82.4	79.2
6	75.4	75.1
7.2	69.3	71.8
8.4	62.5	64.2
10.8	58.7	61.2
12	53.4	56.7
14.4	47.4	49.9
18	43.1	45.5
30	41.1	44.5
40	40.0	42.8
50	41.9	43.2
60	39.9	41.2
70	41.3	42.4
80	49.7	51.3
90	57.6	58.3
100	63.1	61.1
110	71.4	73.0
120	92.0	86.6
130	131.5	105.1

Οι απώλειες ισχύος φαίνονται στην εξίσωση 5.1

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22} (1-\eta(i))}{22} = 13.6\% \quad (5.1)$$

όπου :

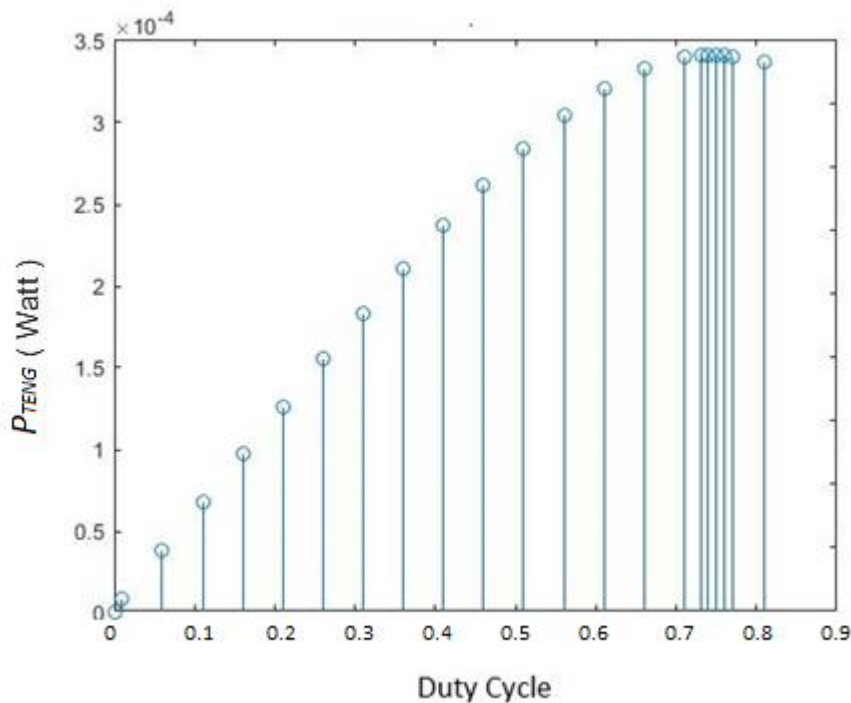
$\eta(i)$  ο βαθμός απόδοσης για μια τιμή  $(i)$  τάσης μπαταρίας.

Ενδεικτικά οι τιμές της ποσοστιαίας βελτίωσης παραγωγής ισχύος φαίνονται στις εξισώσεις 5.2 και 5.3 :

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22} (\eta(i))}{22} = 65.2\% \quad (5.2)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22} (\eta(i))}{22} = 60.1\% \quad (5.3)$$

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η μεταβολή του duty cycle με τη χρήση του αλγορίθμου που περιγράφεται στη Παράγραφο 4.1, μέχρι να βρεθεί η τιμή κατά την οποία η ισχύς στη γεννήτρια μεγιστοποιείται. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.8 γίνεται περιγραφή της μεταβολής της ισχύος για διαφορετικές τιμές τόσο στην τάση της μπαταρίας όσο και στο duty cycle.



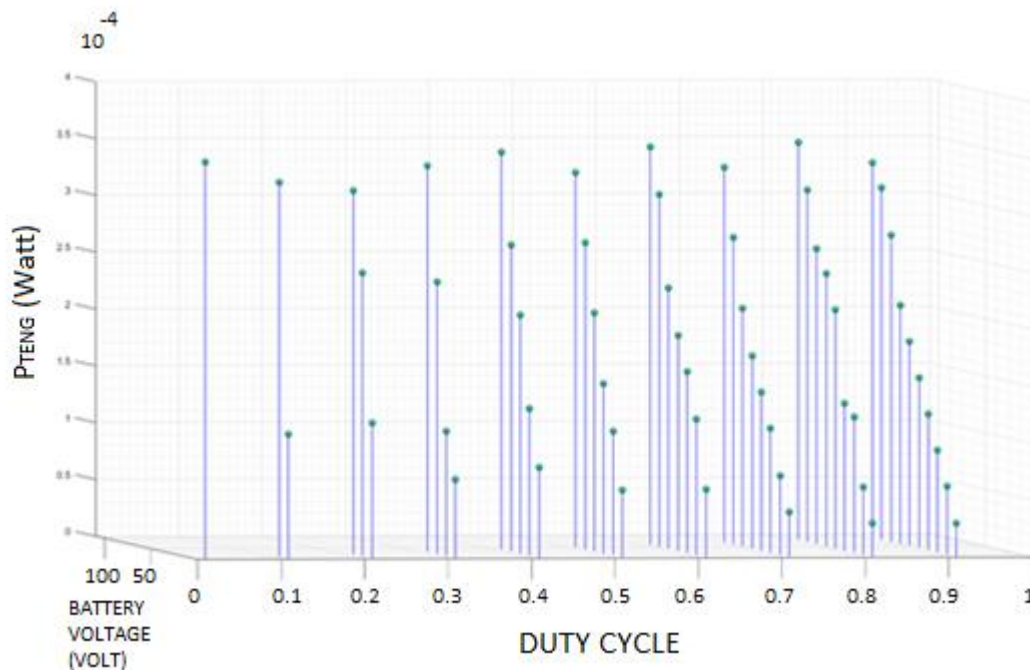
**Σχήμα 5.7** – Μεταβολή του duty cycle για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος της γεννήτριας, υπό μπαταρία τάσης 100 Volt.

Από το Σχήμα 5.7 φαίνεται πως το σημείο μέγιστης ισχύος είναι κοντά στη τιμή 0.75, οπότε αν από την Εξίσωση 3.2 αντικατασταθούν οι τιμές ισχύει ότι:

$$V_{in} = V_{out} / D = 100 / 0.75 = 133.33 \text{ Volt}, \quad (5.4)$$

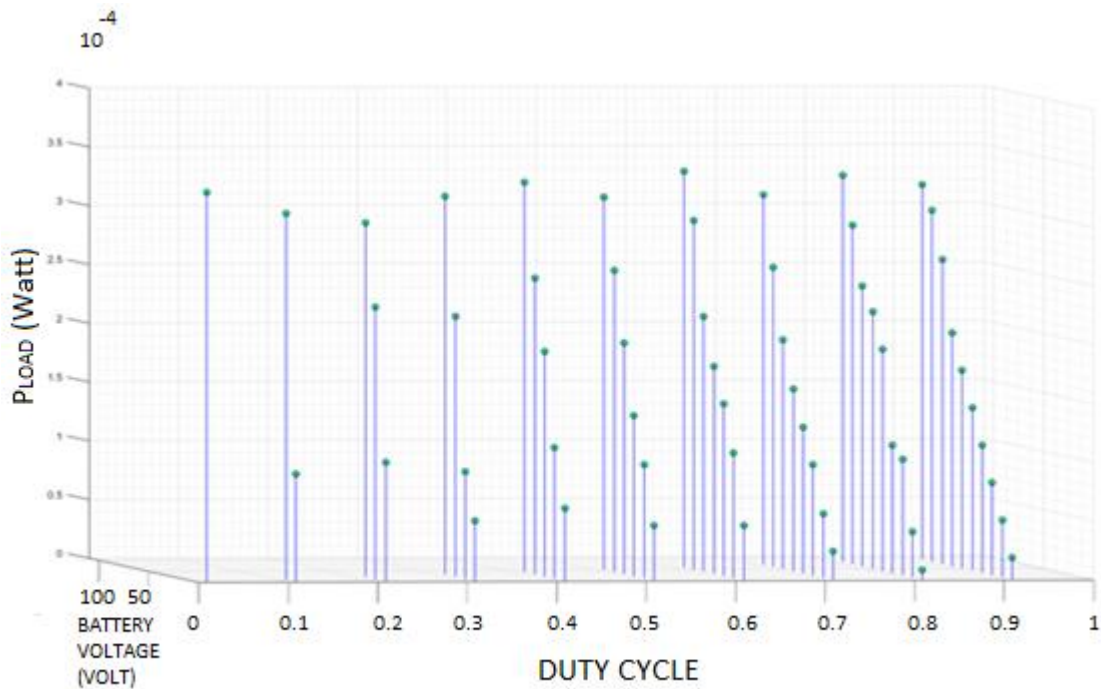
που είναι αναμενόμενη τιμή καθώς συμβαδίζει με τα θεωρητικά αποτελέσματα που θέλουν τη μέγιστη τιμή ισχύος να εμφανίζεται κοντά στα 140 Volt στη τάση εξόδου του ανορθωτή.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η μεταβολή ισχύος για διάφορες τιμές duty cycle και τάσεων μπαταρίας στο TENG, ενώ το Σχήμα 5.9 παρουσιάζει την αντίστοιχη μεταβολή της ισχύος στο φορτίο.



**Σχήμα 5.8** - Γραφική αναπαράσταση της ισχύος στη γεννήτρια συναρτήσει της τιμής τάσης της μπαταρίας και του duty cycle για το κύκλωμα με την προσθήκη μετατροπέα Buck και διακόπτη

Οι τιμές ισχύος συμβαδίζουν με εκείνες που είδαμε στα προηγούμενα αποτελέσματα, καθώς επίσης παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η τιμή τάσης της μπαταρίας, αυξάνεται και η ισχύς για ένα σταθερό duty cycle.



**Σχήμα 5.9** - Γραφική αναπαράσταση της ισχύος στο φορτίο συναρτήσει της τιμής τάσης της μπαταρίας και του duty cycle για το κύκλωμα με την προσθήκη μετατροπέα Buck και διακόπτη

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι Πίνακες 5.3 και 5.4 με τις μετρήσεις βαθμού απόδοσης του συνολικού κυκλώματος αλλά και τα ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος ως προς το αρχικό συμβατικό μοντέλο.

**Πίνακας 5.3** – Βαθμός απόδοσης για την υλοποίηση κυκλώματος με διακόπτη και μετατροπέα Buck.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με χρήση διακόπτη και μετατροπέα
1.2	0.8330
2.4	0.8234
3.6	0.8445
4.8	0.8249
6	0.8111
7.2	0.8534
8.4	0.7932
10.8	0.8512
12	0.7569
14.4	0.8375
18	0.7222
30	0.7091
40	0.7745
50	0.8013
60	0.7938
70	0.7016
80	0.8121
90	0.7937
100	0.8495
110	0.8347
120	0.8801
130	0.7439

**Πίνακας 5.4** – Ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος σε γεννήτρια και μπαταρία για την υλοποίηση κυκλώματος με διακόπτη και μετατροπέα Buck.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	233.1	234.1
2.4	219.1	221.3
3.6	216.7	216.3
4.8	213.9	211.1
6	209.8	207.3
7.2	201.9	202.8
8.4	193.1	191.8
10.8	185.3	189.9
12	181.1	179.4
14.4	171.5	175.1
18	166.3	163.9
30	160.2	154.9
40	120.3	111.2
50	90.1	92.2
60	87.3	91.6
70	84.0	87.2
80	101.1	101.1
90	105.7	106.3
100	134.7	128.9
110	141.9	139.7
120	170.3	168.9
130	218.7	171.3

Η τιμή για την μέση απώλεια του κυκλώματος υπολογίζεται για από τον Πίνακα 5.3 ως:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22} (1-\eta(i))}{22} = 19.7\% \quad (5.5)$$

Η ισχύς στην συμβατική υλοποίηση μεγιστοποιείται ανάμεσα στις τιμές τάσης μπαταρίας των 50-70 Volt, και στη συνέχεια ξεκινά η φθίνουσα πορεία της. Η σύγκριση για το βαθμό βελτίωσης παραγωγής ισχύος γίνεται μεταξύ της τιμής ισχύος που εμφανίζει το συμβατικό μοντέλο (Σχήμα 2.8) για μια συγκεκριμένη τάση μπαταρίας και της τιμής ισχύος που αποδίδει το κύκλωμα του Σχήματος 4.3 για την ίδια μπαταρία, με την επίδραση του αλγορίθμου για Maximum Power Point Tracking.

Τα αποτελέσματα ήδη από τη χρήση του διακόπτη ήταν αρκετά ικανοποιητικά, καθώς είχε παρατηρηθεί μια μεγάλη αύξηση που κυμαίνεται από 40 έως 130%. Με το τελευταίο βήμα για την βελτιστοποίηση αυτού του κυκλώματος αναμένονται ακόμα μεγαλύτερες τιμές στην ισχύ από το προηγούμενο βήμα και αυτό επιβεβαιώνεται στον Πίνακα 5.6.

Οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται αναμενόμενα στα σημεία μεταξύ 50-70 Volt. Σε πολλές υλοποιήσεις ξεπερνά το διπλάσιο της απόδοσης του διακόπτη και σαν γενικό σύνολο η βελτίωση παραγωγής ισχύος σε γεννήτρια και μπαταρία είναι της τάξης του:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22} (\eta(i))}{22} = 163.9\% \quad (5.6)$$

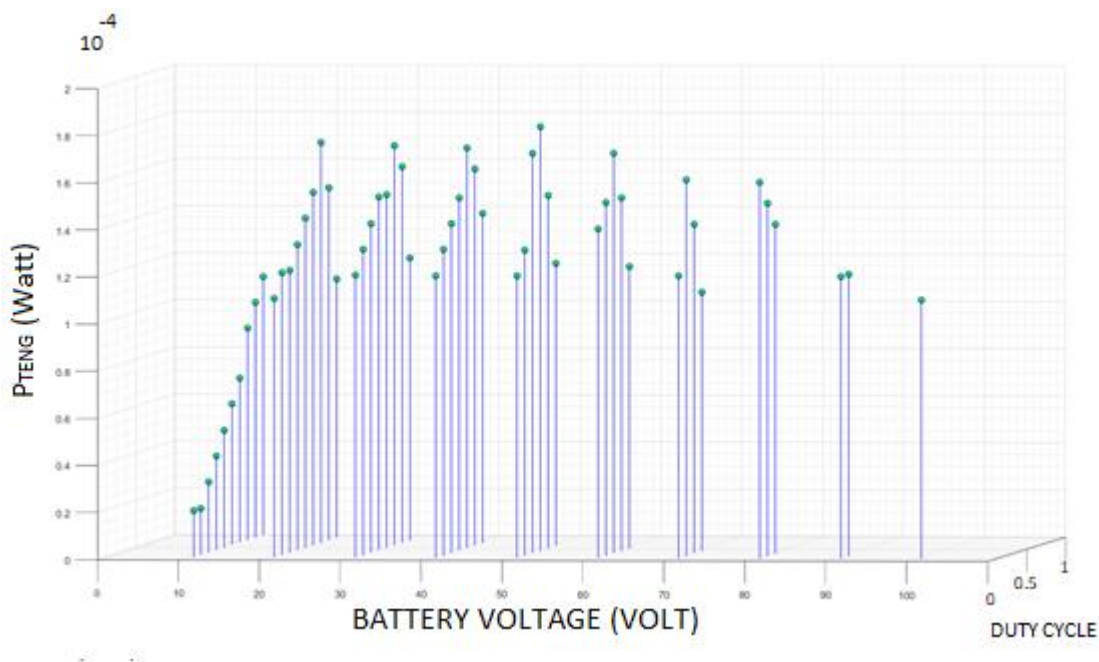
$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22} (\eta(i))}{22} = 150.4\% \quad (5.7)$$

Με τη χρήση του μετατροπέα Buck, η τάση κάθε μπαταρίας μετατρέπεται κατάλληλα στα άκρα του ανορθωτή με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση παραγωγής ισχύος. Με αυτό το τρόπο τα ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος είναι σημαντικά υψηλά.

Μετά από την υλοποίηση του τελικού κυκλώματος του Σχήματος 4.18 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για μια επιπλέον υλοποίηση, εκείνη του Σχήματος 4.22. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις αναμένεται πως η βελτίωση ισχύος θα είναι σαφώς μικρότερη από το μοντέλο του Σχήματος 4.18, αλλά και πως η διαδικασία του Maximum Power Point Tracking δεν θα είναι αποδοτική πλέον για τιμές κοντά στην τιμή του πλάτους τάσης ανοικτοκύκλωσης (140 Volt για την συγκεκριμένη εφαρμογή), αλλά στην τάση που είδαμε να εμφανίζεται το μέγιστο σημείο ισχύος στο συμβατικό μοντέλο του Σχήματος 4.6, δηλαδή μεταξύ 50 και 70 Volt.



Όπως και στην προηγούμενη μελέτη για τον μετατροπέα Buck, έτσι και εδώ έχουμε μια τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση για τις διάφορες τιμές του duty cycle αλλά και τις τιμές τάσεων μπαταρίας που φαίνεται στο Σχήμα 5.10 για την γεννήτρια και στο Σχήμα 5.11 για το φορτίο. Επιπλέον, οι Πίνακες 5.5 και 5.6 προσφέρουν πληροφορίες για το βαθμό απόδοσης και ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος που αφορούν την υλοποίηση αυτή.

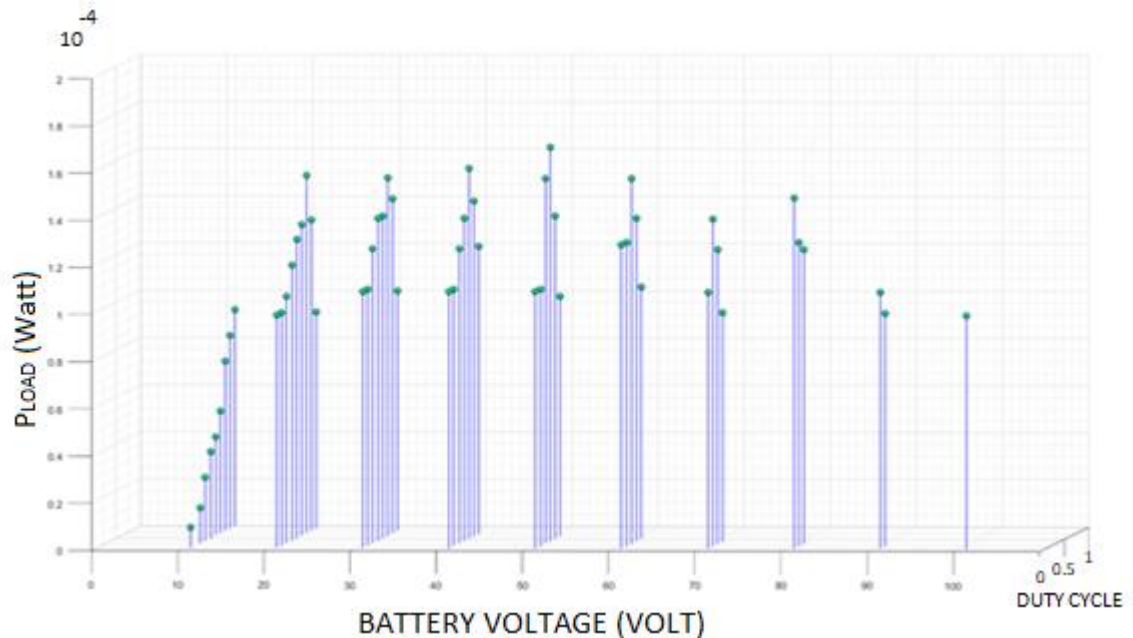


**Σχήμα 5.10** - Γραφική αναπαράσταση ισχύος στη γεννήτρια συναρτήσει της τιμής τάσης της μπαταρίας και του duty cycle για το κύκλωμα με την προσθήκη μετατροπέα Buck

Για κάθε τιμή τάσης της μπαταρίας παρατηρείται πως η ισχύς ακολουθεί μια καμπύλη η οποία μοιάζει με εκείνη που περιγράφεται πριν τη χρήση του διακόπτη στο Σχήμα 5.2. Αυτό συμβαίνει διότι το μέγιστο ισχύος χωρίς τη χρήση διακόπτη εμφανίζεται για τάση μπαταρίας κοντά στα 60 Volt. Επίσης, παρατηρείται πως η τιμή της τάσης εισόδου του μετατροπέα Buck είναι πολύ κοντά στη τιμή των 60 Volt αν εφαρμοστούν οι τιμές των μεταβλητών duty cycle και η τάση της μπαταρίας στον τύπο που αναφέραμε πως ισχύει για τη ρύθμιση τάσης στην έξοδο του ανορθωτή:

$$V_{in} = V_{out}/D \quad (5.8)$$

Ωστόσο οι τιμές ισχύος για την συγκεκριμένη υλοποίηση είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με εκείνες για την χρήση του διακόπτη. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η συγκεκριμένη τεχνική δεν διαχειρίζεται το μέγιστο φορτίο που παρέχει η τεχνική με τον διακόπτη.



**Σχήμα 5.11** - Γραφική αναπαράσταση ισχύος στο φορτίο συναρτήσει της τιμής τάσης της μπαταρίας και του duty cycle για το κύκλωμα με την προσθήκη μετατροπέα Buck

Οι τιμές ισχύος του Σχήματος 5.11 βρίσκονται ελάχιστα πιο χαμηλά από εκείνες του Σχήματος 5.10, και οι καμπύλες διατηρούν την ίδια πορεία.

**Πίνακας 5.5** – Βαθμός απόδοσης για την υλοποίηση κυκλώματος με μετατροπέα Buck.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με χρήση μετατροπέα
1.2	0.8903
2.4	0.9143
3.6	0.9054
4.8	0.9094
6	0.9011
7.2	0.9243
8.4	0.8423
10.8	0.9221
12	0.8396
14.4	0.8857
18	0.8266
30	0.8045
40	0.8777
50	0.9022
60	0.8901
70	0.8119
80	0.8801
90	0.9112
100	0.9073
110	0.9090
120	0.9103
130	0.9002

**Πίνακας 5.6** –Ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος με χρήση μετατροπέα Buck σε γεννήτρια και φορτίο.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	160.1	156.5
2.4	143.1	144.3
3.6	132.1	136.3
4.8	122.9	124.1
6	109.2	111.1
7.2	103.9	104.1
8.4	95.5	96.7
10.8	85.4	89.8
12	81.1	79.2
14.4	57.5	55.1
18	41.1	44.1
30	33.9	38.5
40	30.5	28.6
50	16.7	12.5
60	6.8	5.9
70	7.1	8.4
80	21.0	26.3
90	33.9	28.4
100	41.1	37.4
110	78.3	80.2
120	121.1	125.9
130	149.9	148.7

Οι τιμές για τον βαθμό απόδοσης με μετατροπέα Buck είναι καλύτερες από εκείνες με την επιπλέον υλοποίηση του διακόπτη. Υπολογίζοντας τις απώλειες ξανά με όμοιο τρόπο,

$$P_{loss}\% = \frac{\sum_{i=1}^{22}(1-\eta(i))}{22} = 11.5\% \quad (5.9)$$

διαπιστώνεται ότι οι απώλειες βρίσκονται κατά 10.2% χαμηλότερα από την προηγούμενη υλοποίηση.

Η βελτίωση κοντά στις τιμές 50 με 70 Volt είναι σχεδόν μηδαμινή. Ωστόσο οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα είναι θετικές αλλά όχι βέλτιστες. Ως μέσο όρο του βαθμού βελτίωσης παραγωγής ισχύος έχουμε,

$$\eta_{teng}\% = \frac{\sum_{i=1}^{22}(\eta(i))}{22} = 73.2\% \quad (5.10)$$

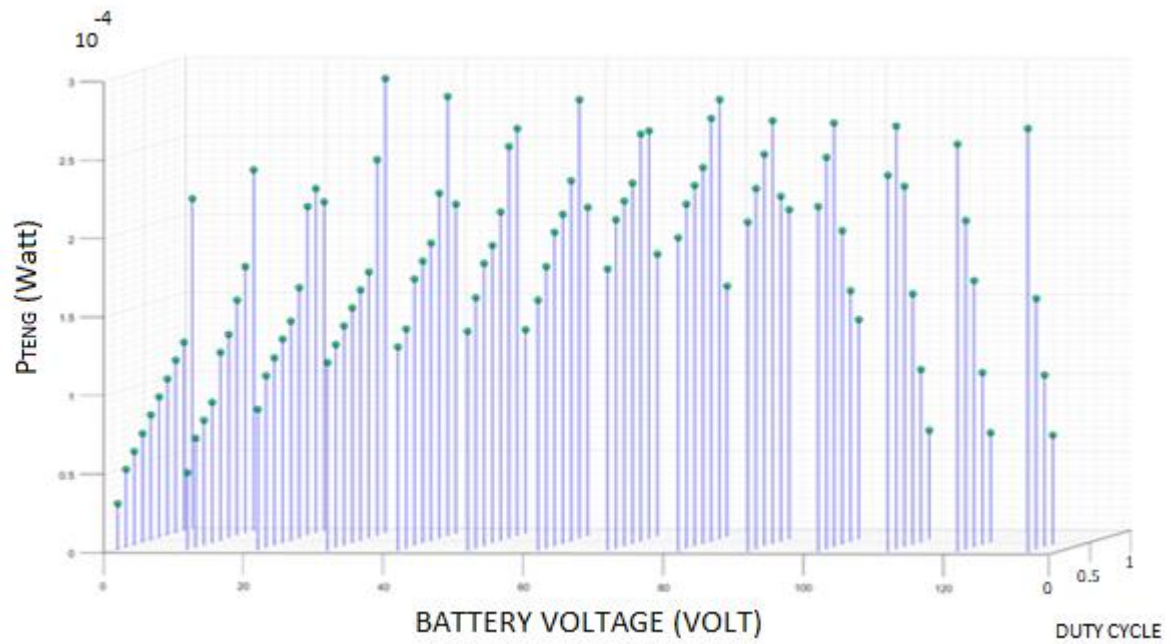
$$\eta_{bat}\% = \frac{\sum_{i=1}^{22}(\eta(i))}{22} = 69.8\% \quad (5.11)$$

Με βάση αυτές τις πληροφορίες διαπιστώνεται πως και οι δύο τεχνικές, τόσο η χρήση του διακόπτη, όσο και η εφαρμογή του μετατροπέα Buck βοηθούν εξίσου στην επίτευξη του στόχου της εργασίας, δηλαδή την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος.

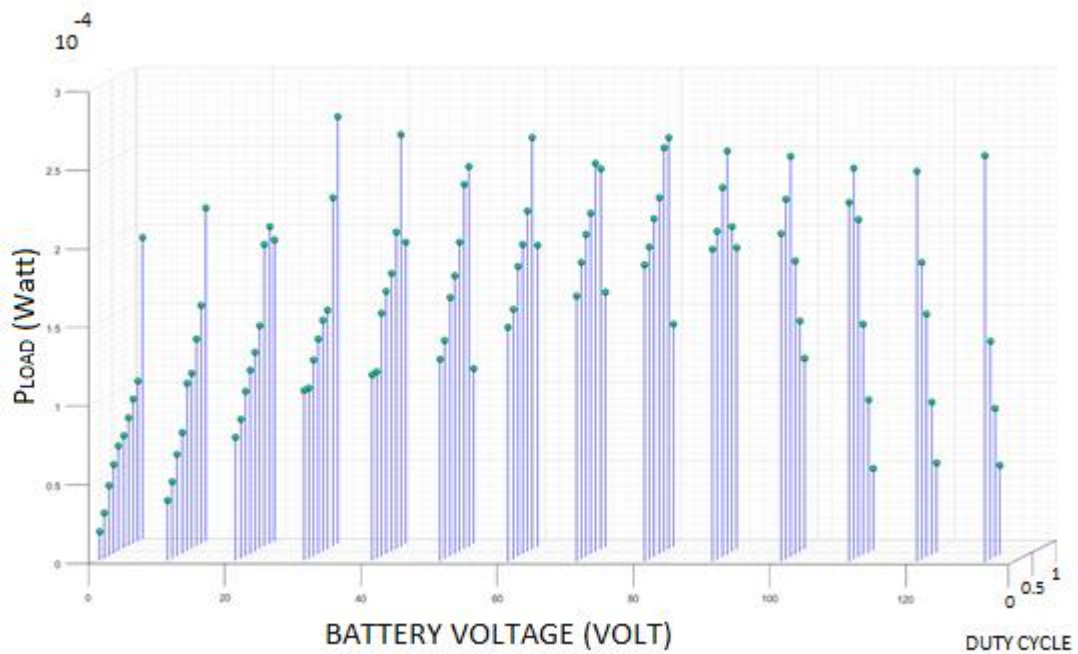
Από όλες τις συγκρίσεις και αποτελέσματα, τα συμπεράσματα για τη συγκεκριμένη υλοποίηση θέλουν μια βελτίωση ισχύος της τάξης του 120% με τη χρήση μπαταριών μέχρι 140 Volt και μέχρι 200% με τη χρήση μπαταριών έως 24 Volt, παρουσιάζοντας απώλειες περίπου στο 20%.

Ως πρώτη τεχνική βελτιστοποίησης του συντελεστή ισχύος μελετήθηκε η χρήση του Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter (βλ. Σχήμα 4.23). Όπως συνέβη και στις προηγούμενες υλοποιήσεις, έτσι και εδώ παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της ισχύς, με μεταβλητές το duty cycle του επιμέρους μετατροπέα καθώς και την τάση της μπαταρίας που τοποθετείται στο φορτίο σε κάθε περίπτωση.

Στα Σχήματα 5.12 και 5.13 περιγράφεται η μεταβολή της ισχύος σε γεννήτρια και φορτίο. Επιπλέον οι Πίνακες 5.7 και 5.8 αναλύουν το βαθμό απόδοσης που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνική καθώς και τα ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος ως προς την αρχική συμβατική υλοποίηση του Σχήματος 4.6.



**Σχήμα 5.12** - Γραφική αναπαράσταση ισχύος στη γεννήτρια συναρτήσει της τιμής τάσης της μπαταρίας και του duty cycle με τη χρήση Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.

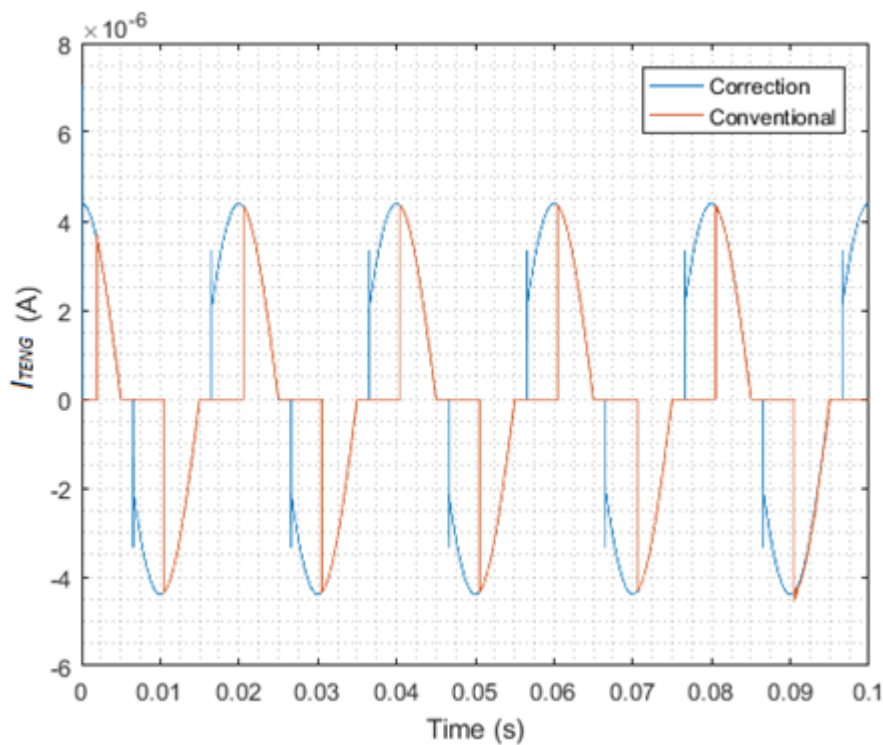


**Σχήμα 5.13** - Γραφική αναπαράσταση ισχύος στη μπαταρία συναρτήσει της τιμής τάσης της μπαταρίας και του duty cycle με τη χρήση Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.

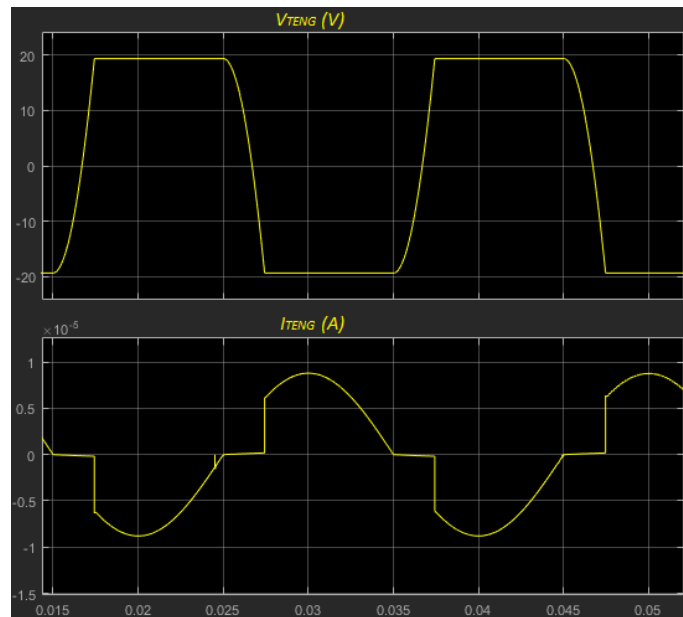
Στα Σχήματα 5.12 και 5.13 φαίνεται ότι η ισχύς σε γεννήτρια και φορτίο πλησιάζει υψηλότερα επίπεδα από το συμβατικό μοντέλο, καθώς εμφανίζονται περισσότερες καταστάσεις στις γραφικές. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση εξόδου του ανορθωτή, περιγράφεται από τον τύπο για τον Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter, ως εξής:

$$V_{out} = 2 D * V_{in} \quad \Leftrightarrow \quad V_{in} = \frac{V_{out}}{2D} \quad (5.12)$$

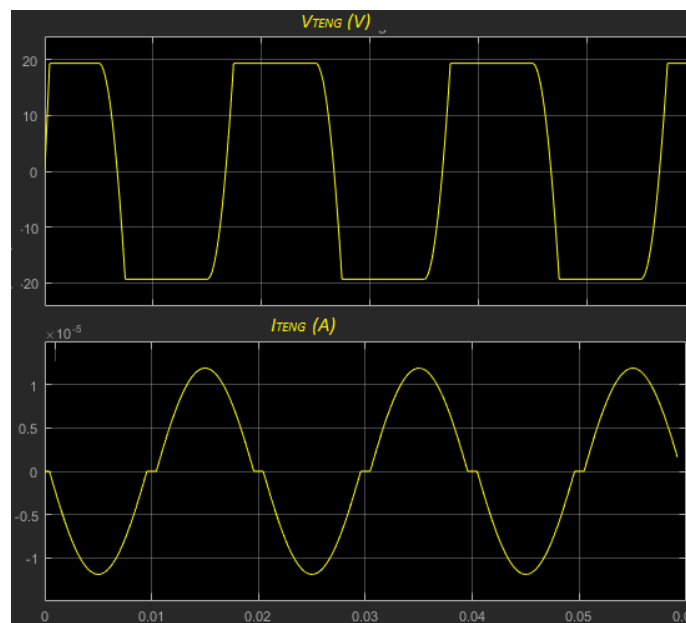
Με την αντικατάσταση των τιμών που εφαρμόζονται τα μέγιστα στα Σχήματα 5.12 και 5.13, η τάση εισόδου του μετατροπέα πλησιάζει κοντά στα 60 Volt που παρατηρείται και το μέγιστο του συμβατού κυκλώματος. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται γραφικά το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης σε σύγκριση με τον συμβατικό τρόπο διαχείρισης ενέργειας στο ρεύμα που διαρρέει την γεννήτρια. Στα Σχήματα 5.15 και 5.16 εμφανίζεται η τάση και το ρεύμα της γεννήτριας για την πιο εύκολη εκτίμηση του συντελεστή ισχύος



**Σχήμα 5.14** - Σήμα ρεύματος με τη χρήση ανορθωτή και με Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter με τάση μπαταρίας 18 Volt.



**Σχήμα 5.15** - Σήμα ρεύματος και τάσης της γεννήτριας για υλοποιήσεις χωρίς διόρθωση συντελεστή ισχύος με τάση μπαταρίας 18 Volt.



**Σχήμα 5.16** - Σήμα ρεύματος και τάσης της γεννήτριας με Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter με τάση μπαταρίας 18 Volt.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.16, η βελτίωση στη γραφική παράσταση του ρεύματος είναι αισθητά σημαντική, ωστόσο δεν είναι βέλτιστη. Ενώ το ρεύμα φαίνεται να πλησιάζει μια ημιτονοειδή μορφή, υπάρχει ακόμα μια μικρή απόκλιση. Με τη χρήση της επόμενης τεχνικής για την βελτιστοποίηση ισχύος αναμένεται να αντιμετωπιστεί και αυτό το πρόβλημα.



**Πίνακας 5.7** – Βαθμός απόδοσης για την υλοποίηση κυκλώματος με Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με χρήση Bridgeless High- Power-Factor Buck Converter
1.2	0.9440
2.4	0.8959
3.6	0.9003
4.8	0.8989
6	0.8852
7.2	0.8941
8.4	0.9732
10.8	0.9412
12	0.9569
14.4	0.8975
18	0.9222
30	0.9235
40	0.8917
50	0.9349
60	0.8933
70	0.8529
80	0.9122
90	0.9789
100	0.9367
110	0.9009
120	0.9511
130	0.9157

**Πίνακας 5.8** – Ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος για το κύκλωμα με Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter σε γεννήτρια και φορτίο.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	176.6	170.0
2.4	161.1	164.4
3.6	149.9	149.0
4.8	139.1	140.9
6	122.2	126.8
7.2	111.3	115.0
8.4	101.0	99.4
10.8	89.8	85.9
12	79.4	81.1
14.4	69.3	70.1
18	60.8	61.2
30	55.9	61.4
40	54.5	57.1
50	47.8	45.5
60	33.1	31.9
70	33.1	30.1
80	41.2	33.6
90	44.1	43.4
100	53.1	54.3
110	83.9	88.2
120	130.0	124.5
130	171.7	171.3

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι τιμές του βαθμού απόδοσης για την υλοποίηση κυκλώματος με Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter. Οι τιμές φαίνονται ιδιαίτερα θετικές, καθώς μονάχα λίγες από αυτές πέφτουν κάτω από το 90%. Η υλοποίηση αυτή είναι πιο αποδοτική από εκείνες που έχουμε μελετήσει έως τώρα, με μία μέση τιμή απωλειών ισχύος που υπολογίζεται ως εξής:

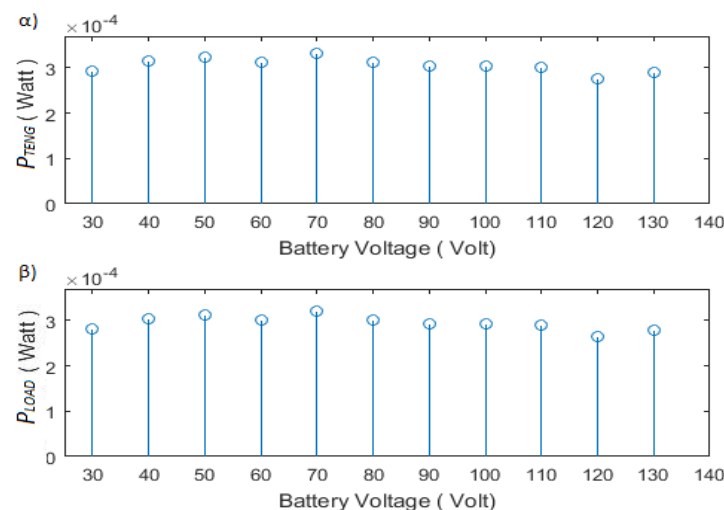
$$P_{loss}\% = \frac{\sum_i^{22}(1-\eta(i))}{22} = 8,1\% \quad (5.13)$$

Παρατηρείται ότι οι χαμηλότερες τιμές τάσης εμφανίζουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Ο γενικός βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

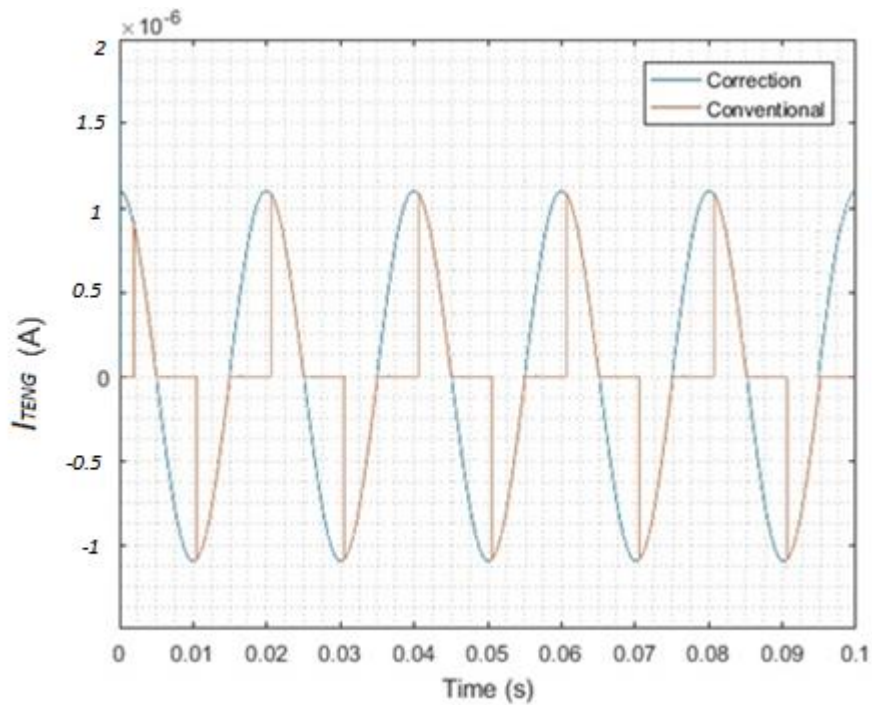
$$\eta_{teng}\% = \frac{\sum_i^{22}(\eta(i))}{22} = 91.3\% \quad (5.14)$$

$$\eta_{bat}\% = \frac{\sum_i^{22}(\eta(i))}{22} = 85.0\% \quad (5.15)$$

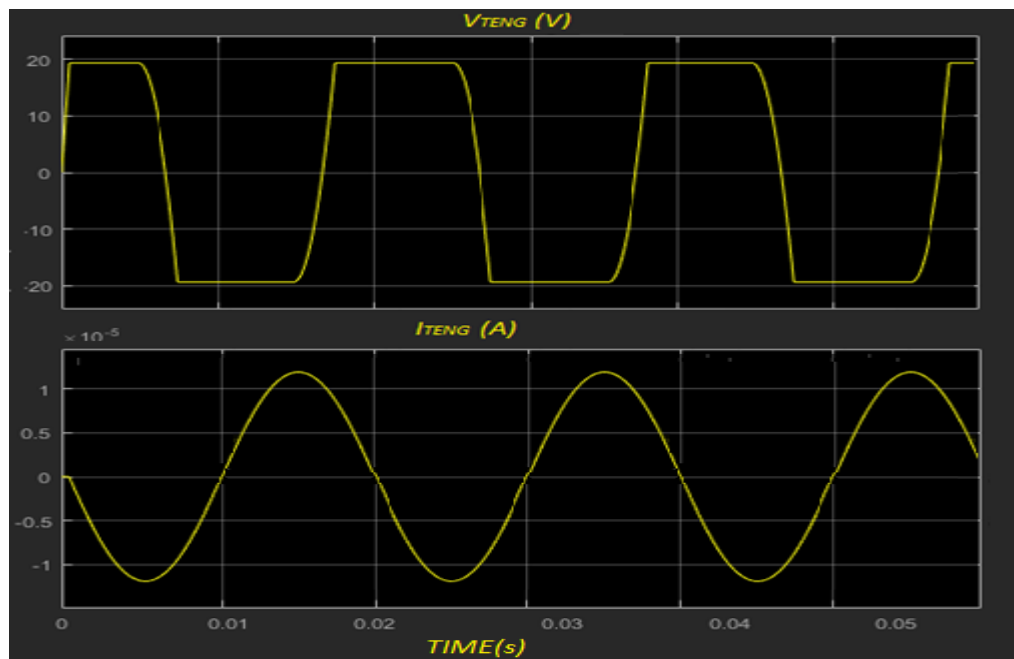
Τελευταία υλοποίηση αποτέλεσε η δεύτερη τεχνική για βελτίωση συντελεστή ισχύος με όνομα “Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier”. Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος για διαφορετικές τιμές τάσης την μπαταρίας σε γεννήτρια και φορτίο, καθώς και στο Σχήμα 5.18 φαίνεται η πλέον βέλτιστη εκδοχή για τη καμπύλη του ρεύματος της γεννήτριας  $i_{TENG}$ . Στη συνέχεια, με τους Πίνακες 5.9 και 5.10 θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων όσον αφορά το βαθμό απόδοσης και τα ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος για την υλοποίηση που μελετήθηκε.



**Σχήμα 5.17** – Τιμές ισχύος για διαφορετικές τιμές α) στην τάση μπαταρίας και β) στο φορτίο, με χρήση Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier.



**Σχήμα 5.18** – Η κυματομορφή του ρεύματος της γεννήτριας με ανορθωτή και Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier υπό τάση μπαταρίας 18 Volt.



**Σχήμα 5.19** – Η κυματομορφή του ρεύματος και τάσης της γεννήτριας με Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier υπό τάση μπαταρίας 18 Volt.

Η κυματομορφή του ρεύματος φαίνεται να είναι πλέον καθαρό ημίτονο, καθώς είναι εμφανές πως η τεχνική όντως προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα από εκείνα του Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.

**Πίνακας 5.9** – Βαθμός απόδοσης για την υλοποίηση κυκλώματος με Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με χρήση Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier
1.2	0.8830
2.4	0.8849
3.6	0.8733
4.8	0.8794
6	0.8914
7.2	0.9065
8.4	0.9188
10.8	0.8774
12	0.8149
14.4	0.8894
18	0.8789
30	0.9168
40	0.9156
50	0.8984
60	0.9648
70	0.8496
80	0.8999
90	0.8984
100	0.9158
110	0.9055
120	0.8705
130	0.8900

**Πίνακας 5.10** – Ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος για το κύκλωμα με Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier σε γεννήτρια και φορτίο.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	143.2	144.2
2.4	132.1	122.6
3.6	119.4	115.1
4.8	105.9	104.2
6	94.8	93.1
7.2	89.8	71.2
8.4	69.9	67.8
10.8	61.9	59.6
12	55.2	51.5
14.4	45.1	46.3
18	43.3	40.1
30	33.2	34.0
40	39.1	41.4
50	49.1	55.3
60	56.0	59.1
70	54.1	63.1
80	79.2	81.8
90	107.1	111.8
100	151.3	142.9
110	181.1	179.4
120	211.4	219.2
130	251.3	250.0

Σαν γενική εικόνα οι τιμές απόδοσης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές. Η μέση τιμή των απωλειών ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_{i=1}^{11}(1-\eta(i))}{11} = 10.8\% \quad (5.16)$$

Παρατηρείται μια γενική βελτίωση, με ιδιαίτερη αύξηση στα σημεία που το ρεύμα της γεννήτριας  $i_{TENG}$  εμφάνιζε μεγάλη νεκρή γωνία με τη τάση εξόδου  $v_{TENG}$  όπως τις πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τάσεις μπαταρίας. Ενώ μπορεί το σημείο μέγιστης ισχύος να εξακολουθεί να εμφανίζεται κοντά στα 70 Volt, η ισχύς αυξάνεται για κάθε τιμή τάσης μπαταρίας σε μια τιμή πολύ κοντά σε αυτό. Η μέση βελτίωση σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22}(\eta(i))}{22} = 98.3\% \quad (5.17)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_{i=1}^{22}(\eta(i))}{22} = 92.7\% \quad (5.18)$$

Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά και μπορεί να διαπιστωθεί πως τα νούμερα είναι σε όμοια επίπεδα με εκείνα της υλοποίησης TENG-SWITCH-RECTIFIER-BUCK CONVERT-BATTERY. Κατά την πρώτη υλοποίηση, το μοντέλο του TENG αποτέλεσε μια ιδανική πηγή τάσης σε σειρά με ένα μεταβλητό πυκνωτή, όπου το πλάτος της τάσης οριζόταν από τη βιβλιογραφία στα 140 Volt. Στην υλοποίηση που θα αναλυθεί στη συνέχεια, η κυματομορφή της τάσης είχε τη μορφή ημιτόνου, με την προσθήκη μίας DC συνιστώσας καθώς η τάση δεν αποκτούσε ποτέ αρνητικές τιμές. Η βιβλιογραφία για αυτό το είδος πηγών περιείχε πολλές διαφορετικές τιμές πλάτους της τάσης. Ωστόσο τα αποτελέσματα της έρευνας υλοποιήθηκαν με τη χρήση της πιο κοινής τιμής, δηλαδή στα 280 Volt peak to peak. Όπως και πριν, όλα τα αποτελέσματα αποτελούν μέρος των διατάξεων που υλοποιήθηκαν και περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Οι συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν οι εξής :

- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-SWITCH-RECTIFIER-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG -RECTIFIER-BUCK-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-SWITCH-RECTIFIER-BUCK-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-BRIDGELESS PFC-BATTERY.
- TENG-RECTIFIER-BATTERY με TENG-FLYING CAPACITOR PFC-BATTERY

Για την πρώτη υλοποίηση του διακόπτη, στους Πίνακες 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για βαθμό απόδοσης και ποσοστά βελτίωσης παραγωγής ισχύος στο νέο μοντέλο TENG.

**Πίνακας 5.11** – Βαθμός απόδοσης υλοποίησης με και χωρίς τη χρήση διακόπτη στο κύκλωμα με τη προσθήκη του διακόπτη

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης συμβατικού κυκλώματος	Βαθμός απόδοσης με τη χρήση διακόπτη
1.2	0.9748	0.9231
2.4	0.9723	0.8481
3.6	0.9054	0.9119
4.8	0.9359	0.8995
6	0.9474	0.8863
7.2	0.9375	0.9167
8.4	0.9591	0.9267
10.8	0.9565	0.9054
12	0.9263	0.8854
14.4	0.9388	0.8960
18	0.9014	0.8892
24	0.9886	0.8969
40	0.9150	0.9064
60	0.9096	0.9116
80	0.9335	0.9074
100	0.9178	0.9325
120	0.9441	0.9111
140	0.9306	0.8766
160	0.9856	0.9183
180	0.9828	0.8875
200	0.9047	0.8944
240	0.9664	0.9206
270	0.9242	0.8973



**Πίνακας 5.12** – Βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος σε μπαταρία και γεννήτρια με τη χρήση διακόπτη.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	93.1	89.4
2.4	84.9	87.5
3.6	83.5	81.1
4.8	73.7	76.6
6	77.7	71.8
7.2	71.8	69.1
8.4	66.1	63.7
10.8	61.5	58.9
12	57.6	53.3
14.4	51.9	48.1
18	44.8	44.7
24	42.9	41.2
40	39.6	37.6
60	33.6	33.9
80	31.9	28.2
100	31.1	24.8
120	25.9	20.4
140	23.4	21.4
160	43.1	48.1
180	71.7	69.8
200	101.1	81.7
240	114.1	101.7
270	139.6	131.8

Το εύρος των απωλειών κυμαίνεται μεταξύ 1-10%, τα οποία είναι παρόμοια αποτελέσματα με εκείνα που εμφανίζονται κατά την πρώτη υλοποίηση. Συγκεκριμένα το μέσο ποσοστό απωλειών υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_i^{23} (1-\eta(i))}{23} = 9.7\% \quad (5.19)$$

Η χρήση του διακόπτη βοηθά εξίσου την αύξηση ισχύος και για τη συγκεκριμένη υλοποίηση γεννήτριας. Οι μέσες τιμές των ποσοστών βαθμού απόδοσης και βελτίωσης παραγωγής ισχύος υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_i^{11} (\eta(i))}{11} = 63.7\% \quad (5.20)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_i^{11} (\eta(i))}{11} = 60.6\% \quad (5.21)$$

Μετά τον διακόπτη έγινε η προσθήκη του μετατροπέα Buck. Στους Πίνακες 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους βαθμούς απόδοσης και βελτίωσης παραγωγής ισχύος για τη διάταξη που προέκυψε.

**Πίνακας 5.13** – Βαθμός απόδοσης υλοποίησης με τη χρήση διακόπτη και μετατροπέα buck.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με τη χρήση διακόπτη και μετατροπέα Buck
1.2	0.8361
2.4	0.8237
3.6	0.9327
4.8	0.8562
6	0.8555
7.2	0.600
8.4	0.8760
10.8	0.8978
12	0.8230
14.4	0.9211
18	0.8871
24	0.9225
40	0.8617
60	0.8735
80	0.8265
100	0.8413
120	0.8995
140	0.8597
160	0.9278
180	0.9342
200	0.9386
240	0.8848
270	0.9048

**Πίνακας 5.22** – Βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος σε μπαταρία και γεννήτρια με τη χρήση διακόπτη και μετατροπέα Buck.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	167.0	165.8
2.4	162.2	160.4
3.6	157.3	156.6
4.8	156.1	152.3
6	154.5	146.9
7.2	147.8	142.8
8.4	144.5	140.1
10.8	125.8	126.8
12	124.9	123.3
14.4	115.5	114.8
18	110.4	114.6
24	109.8	103.9
40	102.8	98.1
60	100.1	96.4
80	99.4	93.5
100	98.1	98.8
120	97.4	94.8
140	87.4	84.4
160	115.8	111.0
180	139.3	128.8
200	182.9	170.9
240	183.1	187.1
270	226.4	203.1

Τα αποτελέσματα της υλοποίησης για τη συγκεκριμένη υλοποίηση με τη χρήση διακόπτη και μετατροπέα Buck είναι αισθητά καλύτερα από εκείνα που μετρήθηκαν για την προηγούμενη υλοποίηση της γεννήτριας. Η μέση τιμή των απωλειών υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_{i=1}^{23}(1-\eta(i))}{23} = 13.1\% \quad (5.22)$$

Με τη χρήση του μετατροπέα Buck και την εφαρμογή του MPPT αλγορίθμου, η εφαρμογή πλησιάζει πολύ υψηλά επίπεδα ισχύος. Στις εξισώσεις 5.23 και 5.24 αναφέρεται η βελτίωση ποσοτικά με βάση τις μετρήσεις που λάβαμε από τον Πίνακα 5.22:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_{i=1}^{11}(\eta(i))}{11} = 135.2\% \quad (5.23)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_{i=1}^{11}(\eta(i))}{11} = 131.9\% \quad (5.24)$$

Επιπλέον, πριν την ανάπτυξη των κυκλωμάτων για Power Factor Correction έγινε μέτρηση για την υλοποίηση του κυκλώματος μόνο με τη χρήση του μετατροπέα Buck. Στον Πίνακα 5.15, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του βαθμού απόδοσης που παρουσιάζει το σύστημα σε αυτή την περίπτωση, και στον Πίνακα 5.16 εμφανίζονται αποτελέσματα για τον βαθμό βελτίωσης παραγωγής ισχύος που προέκυψε.

**Πίνακας 5.15** – Βαθμός απόδοσης υλοποίησης με τη χρήση Buck Converter.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με τη χρήση μετατροπέα
1.2	0.8806
2.4	0.8778
3.6	0.8836
4.8	0.8737
6	0.9004
7.2	0.8691
8.4	0.8865
10.8	0.8814
12	0.8878
14.4	0.8682
18	0.8965
24	0.8694
40	0.8701
60	0.9306
80	0.8862
100	0.9143
120	0.9068
140	0.8989
160	0.9225
180	0.9282
200	0.8922
240	0.9190
270	0.8699

**Πίνακας 5.16** – Βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος σε μπαταρία και γεννήτρια με τη χρήση Buck Converter.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	94.2	96.1
2.4	91.6	84.2
3.6	84.5	86.7
4.8	80.7	79.4
6	78.1	68.7
7.2	68.6	68.4
8.4	65.8	67.4
10.8	57.4	60.1
12	89.3	62.2
14.4	49.9	53.1
18	43.9	46.6
24	43.5	48.6
40	36.3	40.8
60	35.4	36.4
80	27.3	23.9
100	20.5	25.0
120	12.7	18.8
140	5.1	4.3
160	24.4	26.1
180	46.3	50.8
200	69.4	78.3
240	109.5	102.8
270	137.4	130.6

Τα επίπεδα του βαθμού απόδοσης είναι καλύτερα από εκείνα της προηγούμενης υλοποίησης καθώς απουσιάζει η χρήση του διακόπτη. Η μέση τιμή των απωλειών ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_{i=23}^{23} (1-\eta(i))}{23} = 10.8\% \quad (5.25)$$

Όπως είδαμε παραπάνω, υπάρχει μια σχετική αύξηση στον βαθμό απόδοσης, ωστόσο τα αποτελέσματα για το βαθμό βελτίωσης παραγωγής ισχύος είναι αρκετά χαμηλότερα. Οι αντίστοιχες μέσες τιμές τους υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_{i=11}^{11} (\eta(i))}{11} = 59.6\% \quad (5.26)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_{i=11}^{11} (\eta(i))}{11} = 59.1\% \quad (5.27)$$

Στους Πίνακες 5.17 και 5.18 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για την χρήση Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter σε σύγκριση με το συμβατικό κύκλωμα.



**Πίνακας 5.17** – Βαθμός απόδοσης υλοποίησης με τη χρήση Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με τη χρήση Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter
1.2	0.9523
2.4	0.9331
3.6	0.8909
4.8	0.8432
6	0.8926
7.2	0.8934
8.4	0.8899
10.8	0.8942
12	0.8968
14.4	0.8996
18	0.9117
24	0.9116
40	0.9018
60	0.9051
80	0.9693
100	0.9503
120	0.9356
140	0.8984
160	0.9012
180	0.8877
200	0.9714
240	0.9507
270	0.9358

**Πίνακας 5.18** – Βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος σε μπαταρία και φορτίο με τη χρήση Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	128.7	120.7
2.4	127.1	113.5
3.6	124.8	110.3
4.8	121.4	110.2
6	112.4	108.3
7.2	112.5	104.2
8.4	104.5	98.5
10.8	91.1	91.7
12	90.1	86.9
14.4	78.5	78.8
18	62.8	68.9
24	63.1	59.9
40	61.8	60.7
60	72.1	53.9
80	61.4	49.3
100	71.1	51.6
120	49.4	42.5
140	39.2	36.4
160	76.6	75.1
180	96.3	109.2
200	149.8	117.9
240	160.9	135.7
270	168.0	162.1

Η μέση τιμή των απωλειών ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_i^{23} (1-\eta(i))}{23} = 8.6\% \quad (5.28)$$

Οι μέσες τιμές των ποσοστών βαθμού απόδοσης και βελτίωσης παραγωγής ισχύος υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_i^{23} (\eta(i))}{23} = 96.2\% \quad (5.29)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_i^{23} (\eta(i))}{23} = 91.5\% \quad (5.30)$$

Τέλος, τα αποτελέσματα για τη διάταξη με χρήση Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.19 και 5.20.

**Πίνακας 5.19** – Βαθμός απόδοσης υλοποίησης με τη χρήση Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Βαθμός απόδοσης με τη χρήση Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier
1.2	0.9199
2.4	0.9266
3.6	0.8850
4.8	0.8726
6	0.8911
7.2	0.9180
8.4	0.8879
10.8	0.8971
12	0.9112
14.4	0.9215
18	0.9162
24	0.9112
40	0.9045
60	0.8759
80	0.8727
100	0.8878
120	0.8968
140	0.9129
160	0.9320
180	0.8982
200	0.9080
240	0.8870
270	0.9365

**Πίνακας 5.20** – Βαθμός βελτίωσης παραγωγής ισχύος σε μπαταρία και γεννήτρια με τη χρήση Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier.

Τιμή τάσης μπαταρίας (Volt)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε TENG (%)	Ποσοστό βελτίωσης παραγωγής σε φορτίο (%)
1.2	260.6	255.6
2.4	243.6	221.8
3.6	224.1	218.4
4.8	186.5	181.3
6	177.4	176.9
7.2	169.2	171.0
8.4	153.3	147.2
10.8	146.6	141.2
12	136.0	135.3
14.4	125.1	119.7
18	114.3	116.3
24	101.1	103.2
40	91.8	87.3
60	89.6	91.2
80	84.1	84.4
100	74.5	73.2
120	69.1	68.1
140	43.9	40.4
160	89.1	95.5
180	120.7	101.7
200	153.1	148.7
240	208.8	202.6
270	264.3	260.2

Η μέση τιμή των απωλειών ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{loss} \% = \frac{\sum_i^{23} (1-\eta(i))}{23} = 9.6\% \quad (5.31)$$

Οι μέσες τιμές των ποσοστών βαθμού απόδοσης και βελτίωσης παραγωγής ισχύος υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta_{teng} \% = \frac{\sum_i^{11} (\eta(i))}{11} = 144.4\% \quad (5.32)$$

$$\eta_{bat} \% = \frac{\sum_i^{11} (\eta(i))}{11} = 140.9\% \quad (5.33)$$

## 6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται τη βελτίωση της παραγωγής ισχύος σε διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τριβοηλεκτρικές γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές αποτελούν μια μορφή πηγής ενέργειας και χαρακτηρίζονται από μικρή παραγωγή ενέργειας αλλά με μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ισχύος. Τα συστήματα αυτά είναι υπεύθυνα για την λειτουργία της γεννήτριας στο σημείο MPP (Maximum Power Point).

Παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν αρκετές μέθοδοι για την εύρεση του σημείου MPP. Αρχικά μέσω της ανάπτυξης ενός αλγορίθμου MPPT (Maximum Power Point Tracking), ο οποίος ελέγχει έναν μετατροπέα Buck σε συνδυασμό με τη χρήση ενός διακόπτη παράλληλα στην γεννήτρια με έλεγχο κατάλληλο για την απόκτηση του μέγιστου δυνατού φορτίου σε κάθε κύκλο λειτουργίας φόρτισης. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν κυκλώματα με σκοπό την βελτίωση του συντελεστή ισχύος της γεννήτριας.

Πραγματοποιήθηκε εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούσαν βαθμούς απόδοσης και βελτίωσης παραγωγής ισχύος για τις διατάξεις που υλοποιήθηκαν σε σύγκριση με το συμβατικό μοντέλο για τη διαχείριση ενέργειας (γεννήτρια-ανορθωτής-φορτίο).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.1, ο οποίος αναγράφει τις μέσες τιμές διαφόρων παραμέτρων αξιολόγησης της κάθε υλοποίησης. Από τον πίνακα προκύπτει πως η χρήση του συνδυασμού μετατροπέα Buck με τον διακόπτη παράλληλα από την γεννήτρια, αλλά και η χρήση του Flying-Capacitor Buck Power Factor Correction Rectifier επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα.

**Πίνακας 6.1 – Αποτελέσματα Έρευνας**

	Πρώτο Μοντέλο Τριβοηλεκτρικής Γεννήτριας			Δεύτερο Μοντέλο Τριβοηλεκτρικής Γεννήτριας		
	<i>Βαθμός Απόδοσης</i>	<i>Ποσοστό Βελτίωσης στο TENG</i>	<i>Ποσοστό Βελτίωσης στο φορτίο</i>	<i>Βαθμός Απόδοσης</i>	<i>Ποσοστό Βελτίωσης στο TENG</i>	<i>Ποσοστό Βελτίωσης στο φορτίο</i>
<i>Switch</i>	86.4%	65.2%	60.1%	90.3%	63.7%	60.6%
<i>Buck Converter</i>	88.5%	73.2%	69.8%	89.2%	59.6%	59.1%
<i>Switch &amp; Buck Converter</i>	80.3%	163.9%	150.4%	86.9%	135.2%	131.9%
<i>PFC #1</i>	91.9%	91.3%	85.0%	91.4%	96.2%	91.5%
<i>PFC #2</i>	89.2%	98.3%	92.7%	90.4%	144.4%	146.1%

Μερικά θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω μελλοντικής διερεύνησης για τη μεγιστοποίηση παραγωγής ενέργειας από τριβοηλεκτρικές γεννήτριες είναι τα εξής:

- Ανάπτυξη του προτεινόμενου αλγορίθμου MPPT σε ηλεκτρονικό κύκλωμα, προσφέροντας έτσι την δυνατότητα εφαρμογής της έρευνας σε πρακτικό επίπεδο.
- Δημιουργία ολοκληρωμένου κυκλώματος με βάση τα προτεινόμενα συστήματα που υλοποιήθηκαν για την μελέτη των αποδόσεων σε πραγματικό περιβάλλον.



---

## 7. Βιβλιογραφία

---

- [1] Dunn, B., Kamath, H. & Tarascon, J. M. “Electrical energy storage for the grid: a battery of choices”. *Science* 334, 928–935 (2011).
- [2] Huskinson, B. et al. “A metal-free organic-inorganic aqueous flow battery”. *Nature* 505, 195–198 (2014).
- [3] Peng, Z. Q., Freunberger, S. A., Chen, Y. H. & Bruce, P. G. “A reversible and higher-rate Li-O<sub>2</sub> battery”. *Science* 337, 563–566 (2012).
- [4] El-Kady, M. F., Strong, V., Dubin, S. & Kaner, R. B. “Laser scribing of high performance and flexible graphene-based electrochemical capacitors”. *Science* 335, 1326–1330 (2012).
- [5] Zhu, Y. W. et al. “Carbon-based supercapacitors produced by activation of Graphene”. *Science* 332, 1537–1541 (2011).
- [6] Wang, Z. L. & Song, J. “Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays”. *Science* 312, 242–246 (2006).
- [7] Fan, F.-R., Tian, Z.-Q. & Lin Wang, Z. “Flexible triboelectric generator”. *Nano Energy* 1, 328–334 (2012).
- [8] Zhu, G. et al. “Linear-grating triboelectric generator based on sliding Electrification”. *Nano. Lett.* 13, 2282–2289 (2013).
- [9] Wang, Z. L., Chen, J. & Lin, L. “Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors”. *Energy Environ. Sci.* 8, 2250–2282 (2015).
- [10] Wang, Z. L. “Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors – Principles, problems and perspectives”. *Faraday Discuss.* 176, 447–458 (2014).

- [11] Wang, Z. L. “Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors”. ACS Nano 7, 9533–9557 (2013).
- [12] Zi, Y. et al. “Standards and figure-of-merits for quantifying the performance of triboelectric nanogenerators”. Nat. Commun. 6, 8376 (2015).
- [13] Chen, J. et al. “Harmonic-resonator-based triboelectric nanogenerator as a sustainable power source and a self-powered active vibration sensor”. Adv. Mater. 25, 6094–6099 (2013).
- [14] Yang, J. et al. “Triboelectrification-based organic film nanogenerator for acoustic energy harvesting and self-powered active acoustic sensing.” ACS Nano 8, 2649–2657 (2014).
- [15] Fan, X. et al. “Ultrathin, rollable, paper-based triboelectric nanogenerator for acoustic energy harvesting and self-powered sound recording”. ACS Nano 9, 4236–4243 (2015).
- [16] Yang, W. et al. “Harvesting energy from the natural vibration of human walking.” ACS Nano 7, 11317–11324 (2013).
- [17] Xie, Y. et al. “Grating-structured freestanding triboelectric-layer nanogenerator for harvesting mechanical energy at 85% total conversion efficiency.” Adv. Mater. 26, 6599–6607 (2014).
- [18] Chen, J. et al. “Networks of triboelectric nanogenerators for harvesting water wave energy: a potential approach toward blue energy”. ACS Nano 9, 3324–3331 (2015).
- [19] Wang, X. et al. “Triboelectric Nanogenerator based on fully enclosed rolling spherical structure for harvesting low-frequency water wave energy.” Adv. Energy Mater. 5, 15011467 (2015).
- [20] Wang, S. et al. “Motion charged battery as sustainable flexible-power-unit.” ACS Nano 7, 11263–11271 (2013).

- [21] Wang, J. et al. “A flexible fiber-based supercapacitor–triboelectric-nanogenerator power system for wearable electronics”. *Adv. Mater.* 27, 4830–4836 (2015).
- [22] Luo, J. et al. “Integration of micro-supercapacitors with triboelectric nanogenerators for a flexible self-charging power unit”. *Nano Res.* 8, 3934–3943 (2015).
- [23] Zhou, Y. S. et al. “Manipulating nanoscale contact electrification by an applied electric field”. *Nano. Lett.* 14, 1567–1572 (2014).
- [24] Zi, Y. et al. “Triboelectric–pyroelectric–piezoelectric hybrid cell for high efficiency energy-harvesting and self-powered sensing.” *Adv. Mater.* 27, 2340–2347 (2015).
- [25] Han, M. et al. “Magnetic-assisted triboelectric nanogenerators as self-powered visualized omnidirectional tilt sensing system”. *Sci. Rep.* 4, 4811 (2014).
- [26] Seung, W. et al. “Nanopatterned textile-based wearable triboelectric Nanogenerator”. *ACS Nano* 9, 3501–3509 (2015).
- [27] Niu, S. et al. “Optimization of triboelectric nanogenerator charging systems for efficient energy harvesting and storage”. *IEEE Trans. Electron Devices* 62, 641–647 (2015).
- [28] Pu, X. et al. “Efficient charging of Li-ion batteries with pulsed output current of triboelectric nanogenerators.” *Adv. Sci.* 3, 1500255 (2015).
- [29] Niu, S. et al. “Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators.” *Nano Energy* 12, 760–774 (2015).
- [30] Wang, S., Xie, Y., Niu, S., Lin, L. & Wang, Z. L. “Freestanding triboelectric-layer based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes.” *Adv. Mater.* 26, 2818–2824 (2014).
- [31] Cheng, G., Lin, Z.-H., Lin, L., Du, Z.-l. & Wang, Z. L. “Pulsed nanogenerator with huge instantaneous output power density”. *ACS Nano* 7, 7383–7391 (2013).

- [32] Yungtaek Jang, and Milan M. Jovanovi'. "Bridgeless High-Power-Factor Buck Converter" IEEE Trans. Power Electronics 26, 602-611 (2011)
- [33] Wenlong Qi, Sinan Li, Huawei Yuan<sup>1</sup>, Siew-Chong Tan<sup>1</sup>, and Shu-Yuen (Ron) Hui, "High-Power-Density Single-Phase Three-Level Flying-Capacitor Buck PFC Rectifier.". IEEE Trans. Power Electronics 34, 10833-10844 (2019).
- [34] L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti "CONTROL TECHNIQUES FOR POWER FACTOR CORRECTION CONVERTERS". IEEE Trans. Power Electronics 2, 146-152 (2018)
- [35] Bo-Kyung Yoon, Jeong Min Baik and Katherine A. Kim "Circuit Modeling Approach for Analyzing Triboelectric Nanogenerators for Energy Harvesting.". IEEE Trans. Industrial Electronics 10, 3063-3068 (2017)
- [36] Guang Zhu, Bai Peng, Jun Chen, Qingshen Jing, Zhong Lin Wang, "Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications". Nano Energy 14, 126-138. (2015).
- [37] L. Han and N. Narendran, "An accelerated test method for predicting the useful life of an LED driver," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 8, pp. 2249–2257, 2011.
- [38] Yunlong Zi, Jie Wang, Sihong Wang, Shengming Li, Zhen Wen, Hengyu Guo & Zhong Lin Wang "Effective energy storage from a triboelectric Nanogenerator". Nature Communications 7, 10987 (2016).
- [39] W. Qi, H. Wang, X. Tan, G. Wang, and K. D. T. Ngo, "A novel active power decoupling single-phase PWM rectifier topology," in Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2014, pp. 89–95, 2014.
- [40] P. T. Krein, R. S. Balog, and M. Mirjafari, "Minimum energy and capacitance requirements for single-phase inverters and rectifiers using a ripple port," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4690–4698, 2012.