



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

**Διπλωματική Εργασία**

**Διάγνωση Βλαβών Φωτοβολταϊκών  
Μετατροπέων Ισχύος με Τεχνικές  
Τεχνητής Νοημοσύνης**

**Λύτης Δημήτριος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Λαγουδάκης Μιχαήλ**

**Επίκουρος Καθηγητής Πέππας Γεώργιος**

**Χανιά, Ιούλιος 2025**

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>5</b>
1.1 Δομή της εργασίας.....	7
<b>2. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ.....</b>	<b>8</b>
2.1 Μετατροπείς ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	9
2.2 Κοινά σφάλματα και προβλήματα των μετατροπών ισχύος .....	18
2.3 Τεχνητή Νοημοσύνη.....	20
<b>3. ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ .....</b>	<b>35</b>
3.1 Χρήση GPR και GA για εντοπισμό σφαλμάτων.....	35
3.1.1 Μέθοδος GPR.....	35
3.1.2 Μέθοδος Genetic Algorithm (GA) .....	37
<b>4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ GPR ΚΑΙ GA ΣΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ .....</b>	<b>40</b>
4.1 Μετατροπείας Ισχύος Υποβιβασμού Τάσης .....	40
4.2 Μετατροπείας Ισχύος Ανύψωσης Τάσης .....	43
4.3 Αντιστροφείας Ισχύος.....	45
4.4 Εύρεση εύρους κανονικών δεδομένων με GPR.....	48
4.5 Εφαρμογή GA για βελτιστοποίηση σε μετατροπείς ισχύος .....	51
<b>5. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>56</b>
5.1 Μετατροπείας DC-DC υποβιβασμού τάσης.....	56
5.2 Μετατροπείας DC-DC ανύψωσης τάσης .....	68
5.3 Μετατροπείας DC-AC πλήρους γέφυρας.....	77
<b>6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>89</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>92</b>

# Περίληψη

Η αυξανόμενη παγκόσμια ανάγκη για βιώσιμες λύσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει ενισχύσει τη διεξόδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως, με τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα να διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο. Ωστόσο, η αξιοπιστία και η απόδοση των Φ/Β εγκαταστάσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή λειτουργία των μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας. Οι μετατροπείς ισχύος είναι ευάλωτοι σε αστοχίες εξαρτημάτων και εξωτερικές διαταραχές, γεγονός που καθιστά αναγκαία την έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων ώστε να διασφαλίζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα και η επιχειρησιακή συνέχεια των Φ/Β συστημάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας μεθοδολογίας εντοπισμού βλαβών σε φωτοβολταϊκούς μετατροπείς ισχύος μέσω τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται η Gaussian Process Regression (GPR) για την εκτίμηση του φυσιολογικού εύρους λειτουργίας ενός μετατροπέα και Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) για την εξαγωγή των ακραίων τιμών επτά στατιστικών χαρακτηριστικών της εξόδου του συστήματος (εύρος, μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία, κυρτότητα, εντροπία, κέντρο βάρους). Η σύγκριση των πραγματικών εξόδων με τα όρια που ορίζονται από τις GPR και ΓΑ επιτρέπει την έγκαιρη και αξιόπιστη ανίχνευση ανωμαλιών λειτουργίας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε και αξιολογήθηκε σε διαφορετικούς τύπους μετατροπέων (μετατροπέας υποβιβασμού τάσης Buck, μετατροπέας ανύψωσης τάσης Boost και DC/AC μετατροπέας Full-Bridge Inverter), επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια εντοπισμού σφαλμάτων ακόμα και σε περιπτώσεις ήπιων αποκλίσεων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στα συστήματα παρακολούθησης Φ/Β μετατροπέων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την προγνωστική τους ικανότητα και να μειώσει το κόστος συντήρησης, συμβάλλοντας στη μακροχρόνια αξιοπιστία και αποδοτικότητα των συστημάτων ΑΠΕ.

# Abstract

The growing global demand for sustainable electricity production has led to the widespread adoption of Renewable Energy Sources (RES), with photovoltaic (PV) systems playing a central role. However, the reliability and performance of PV installations heavily depend on the proper operation of power converters, which are responsible for energy conversion and management. These converters are prone to component faults and external disturbances, making timely fault detection essential to ensure energy efficiency and system continuity.

This thesis focuses on the development and evaluation of fault detection methodology for PV power converters using Artificial Intelligence (AI) techniques. Specifically, it employs Gaussian Process Regression (GPR) to estimate the normal operating range of a converter and Genetic Algorithms (GA) to extract the extreme values of seven statistical features of the system's output (range, mean, standard deviation, skewness, kurtosis, entropy, and centroid). By comparing actual output signals with the limits defined by GPR and GA, operational anomalies can be accurately and promptly identified.

The proposed methodology was applied and assessed on different types of converters (Buck converter, Boost converter, and Full-Bridge inverter), demonstrating high fault detection accuracy even in cases of subtle deviations. Results indicate that integrating AI methods into PV converter monitoring systems can significantly improve the predictive maintenance capabilities and reduce operational costs, thus enhancing the long-term reliability and efficiency of RES systems.

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η συνεχής αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης για ενέργεια και η ανάγκη για βιώσιμες πηγές ενέργειας έχουν οδηγήσει σε μια εκτεταμένη υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα να αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες λύσεις. Ωστόσο, η αξιοπιστία και η απόδοση των Φ/Β συστημάτων επηρεάζεται σημαντικά από σφάλματα που εμφανίζονται στους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι αποτελούν κύριες διατάξεις αυτών των συστημάτων, με αποτέλεσμα, η έγκαιρη ανίχνευση και διάγνωση τέτοιων σφαλμάτων να καθίσταται απαραίτητη για τη διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας των Φ/Β εγκαταστάσεων και τη μείωση των απωλειών ενέργειας και του κόστους συντήρησης. Η τεχνητή νοημοσύνη (TN) χρησιμοποιείται πλέον τα τελευταία χρόνια για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, όπως η ανίχνευση βλαβών σε ηλεκτρονικά συστήματα, προσφέροντας νέες δυνατότητες στην αναγνώριση και την πρόληψη σφαλμάτων, επιτρέποντας την πιο αποδοτική διαχείριση και συντήρηση αυτών των συστημάτων [1].

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας μεθοδολογίας για την ανίχνευση βλαβών σε μετατροπείς ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (TN). Εξετάζονται οι κύριες αιτίες σφαλμάτων στους μετατροπείς ισχύος, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους η TN μπορεί να συμβάλει στην έγκαιρη και αξιόπιστη ανίχνευσή τους [2]. Ειδικότερα, στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής

εργασίας θα αναπτυχθούν και θα αξιολογηθούν αλγόριθμοι που θα εκπαιδευτούν με δεδομένα από διάφορους μετατροπείς ισχύος για την αναγνώριση μοτίβων που υποδηλώνουν σφάλματα.

Οι μετατροπείς ισχύος είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) που παράγεται από τα Φ/Β πάνελ σε εναλλασσόμενο (AC) ή συνεχές (DC) ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο ή για την τροφοδότηση ηλεκτρικών ή ηλεκτρονικών συσκευών, αντίστοιχα, καθιστώντας την αποτελεσματική και απρόσκοπτη λειτουργία των μετατροπέων ισχύος απαραίτητη για τη διασφάλιση της μέγιστης απόδοσης των Φ/Β συστημάτων [3]. Ωστόσο, είναι ευάλωτοι σε διάφορα είδη σφαλμάτων, όπως υπερθέρμανση, ηλεκτρικές υπερτάσεις, φθορά των εξαρτημάτων, και διακοπή της λειτουργίας τους λόγω εξωτερικών παραγόντων, προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις, όπως μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος, αύξηση του κόστους συντήρησης, και σε ορισμένες περιπτώσεις, διακοπή της παραγωγής ενέργειας, ενώ, η παρατεταμένη λειτουργία ενός σφάλματος μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμες βλάβες στο σύστημα, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος αποκατάστασης.

Η έγκαιρη και αξιόπιστη ανίχνευση σφαλμάτων στους μετατροπείς ισχύος είναι επομένως απαραίτητη για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων και τη διασφάλιση της μακροχρόνιας βιωσιμότητας των Φ/Β εγκαταστάσεων, με την έγκαιρη διάγνωση να επιτρέπει στους συντηρητές να προβούν σε διορθωτικές ενέργειες πριν τα σφάλματα εξελιχθούν σε μεγαλύτερα προβλήματα, μειώνοντας έτσι τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και το συνολικό κόστος συντήρησης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων βασίζονται συνήθως σε προκαθορισμένους κανόνες και σε απλές διαγνωστικές διαδικασίες, οι οποίες ενδέχεται να μην είναι επαρκείς για την αντιμετώπιση των πολύπλοκων και δυναμικών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στους μετατροπείς ισχύος των Φ/Β συστημάτων, ενώ η TN, από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, εντοπίζοντας μοτίβα και συσχετίσεις που δεν είναι εμφανείς με τις συμβατικές μεθόδους [4].

Οι αλγόριθμοι TN μπορούν να επεξεργαστούν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αναγνωρίζοντας μοτίβα που υποδηλώνουν την παρουσία σφάλματος, ακόμα και όταν αυτά δεν είναι άμεσα ορατά, επιτρέποντας την πιο ακριβή πρόβλεψη και την έγκαιρη διάγνωση των προβλημάτων, καθιστώντας τη συντήρηση των Φ/Β συστημάτων πιο προληπτική παρά αντιδραστική [5]. Επιτρέπει ακόμα την ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να προβλέπουν σφάλματα πριν αυτά προκαλέσουν σημαντικές βλάβες ή απώλειες απόδοσης, μέσω της ανάλυσης προγνωστικών μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα και της συνεχούς επιτήρησης της κατάστασης του εξοπλισμού, μειώνοντας τις απρόβλεπτες διακοπές λειτουργίας και τα σχετικά κόστη. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι TN μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα ελέγχου

και παρακολούθησης των Φ/Β εγκαταστάσεων, επιτρέποντας την αυτόματη λήψη αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος σε πραγματικό χρόνο, όχι μόνο βελτιώνοντας την αξιοπιστία των συστημάτων, αλλά και αυξάνοντας τη συνολική αποδοτικότητά τους, συμβάλλοντας στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και στην ελαχιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων.

### **1.1 Δομή της εργασίας.**

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη σε έξι κεφάλαια, καθένα από τα οποία επικεντρώνεται σε διαφορετικές πτυχές της ανίχνευσης σφαλμάτων στους μετατροπείς ισχύος των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης (TN).

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το αντικείμενο της εργασίας, η σημασία της ανίχνευσης σφαλμάτων στους μετατροπείς ισχύος, και η χρήση της TN σε αυτήν την εφαρμογή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος στα Φ/Β συστήματα και παρουσιάζονται τα συνήθη σφάλματα που μπορούν να εμφανιστούν, ενώ επιπλέον, γίνεται και μια εκτενής ανασκόπηση των τεχνολογιών TN και των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σφαλμάτων, περιλαμβάνοντας και ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας, με αναφορές σε προηγούμενες έρευνες και εφαρμογές στον τομέα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την ανίχνευση σφαλμάτων, η ανάλυση των δεδομένων, οι τεχνικές προ επεξεργασίας, καθώς και οι αλγόριθμοι TN που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζοντας παράλληλα και την περιγραφή του φωτοβολταϊκού συστήματος και τον κώδικα MATLAB που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση των αλγορίθμων.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει την εφαρμογή της μεθοδολογίας του τρίτου κεφαλαίου σε 2 διαφορετικούς τύπους μετατροπέων ισχύος και έναν αντιστροφέα ισχύος, για την ανίχνευση σφαλμάτων σε αυτούς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης και αξιολόγησης των αλγορίθμων TN, γίνεται σύγκριση της απόδοσής τους με άλλες μεθόδους και συζητούνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα της εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις, ενώ αναφέρονται επίσης οι περιορισμοί της παρούσας προσέγγισης και πιθανοί τρόποι αντιμετώπισής τους σε μελλοντικές μελέτες.

# 2.

## ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

---

Το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας επικεντρώνεται στην παροχή μιας εις βάθος θεωρητικής ανάλυσης των θεμελιωδών εννοιών που σχετίζονται με την ανίχνευση σφαλμάτων στους μετατροπείς ισχύος των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων και τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης (TN) σε αυτήν την εφαρμογή, με στόχο του κεφαλαίου να είναι η θέσπιση των βάσεων για την κατανόηση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διπλωματική εργασία και να παρουσιάσει το θεωρητικό υπόβαθρο που είναι εξαιρετικά σημαντικό για την ανάπτυξη των μεθοδολογιών που ακολουθούν.

Αρχικά, θα γίνει ανασκόπηση των μετατροπέων ισχύος, των αρχών λειτουργίας τους και των πιο κοινών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν σε ένα Φ/Β σύστημα, με την κατανόηση αυτών των τεχνολογιών να απαιτείται για την αποτελεσματικότερη ανίχνευση και διάγνωση σφαλμάτων, καθώς τα σφάλματα αυτά μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση και τη μακροχρόνια λειτουργικότητα των Φ/Β εγκαταστάσεων [6]. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι βασικές έννοιες της τεχνητής νοημοσύνης οι μεθοδολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση σφαλμάτων, με τους αλγόριθμους TN, όπως τα νευρωνικά δίκτυα και οι μέθοδοι



μηχανικής μάθησης να αποτελούν σημαντικά εργαλεία στην πρόβλεψη και την αναγνώριση σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο, καλύπτοντας τις θεωρητικές αρχές που διέπουν αυτούς τους αλγορίθμους, καθώς και παραδείγματα εφαρμογών τους στον τομέα της ενέργειας.

## **2.1 Μετατροπείς ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Οι μετατροπείς ισχύος αποτελούν επιτρέπουν τη μετατροπή της παραγόμενης συνεχούς τάσης από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση, κατάλληλη για χρήση στα ηλεκτρικά δίκτυα ή σε αυτόνομα συστήματα, επηρεάζοντας άμεσα την απόδοση του συνολικού Φ/Β συστήματος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται σε Φ/Β συστήματα, με τους πιο κοινούς να παρουσιάζονται παρακάτω [7].

### **2.1.1 Αντιστροφείς (Inverters)**

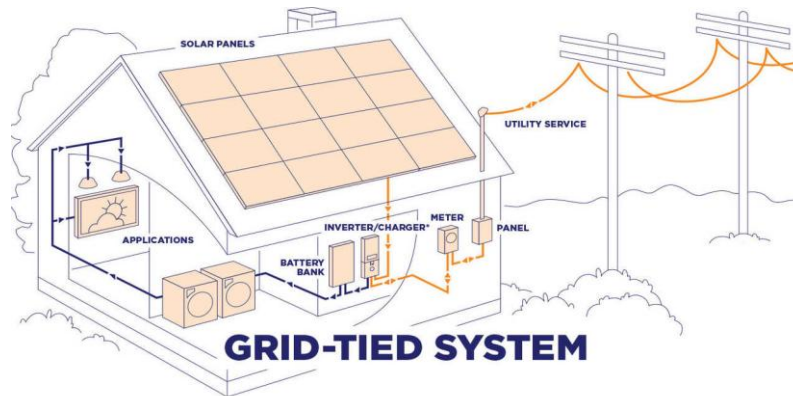
Οι αντιστροφείς (inverters) αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς και ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους μετατροπέων ισχύος στα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, με βασική λειτουργία τους την μετατροπή της συνεχούς τάσης (DC) που παράγεται από τα Φ/Β πάνελ σε εναλλασσόμενη τάση (AC), η οποία είναι συμβατή με το ηλεκτρικό δίκτυο ή τα ηλεκτρικά φορτία, βήμα απαραίτητο διότι τα περισσότερα οικιακά και βιομηχανικά συστήματα τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση, ενώ τα Φ/Β πάνελ παράγουν συνεχή τάση.

Οι αντιστροφείς λειτουργούν χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος, όπως τρανζίστορ, για να μετατρέψουν την DC τάση σε AC, περιλαμβάνοντας τη δημιουργία μιας παλμοειδούς τάσης που εναλλάσσεται με συγκεκριμένη συχνότητα (50 ή 60 Hz), έτσι ώστε να προσομοιάζει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, με τους σύγχρονους αναστροφείς να χρησιμοποιούν τεχνικές όπως η διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) για να παράγουν μια τάση εξόδου που είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε ημιτονοειδή κυματομορφή, μειώνοντας έτσι τις αρμονικές και βελτιώνοντας την ποιότητα της ισχύος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αντιστροφέων ανάλογα με την εφαρμογή:

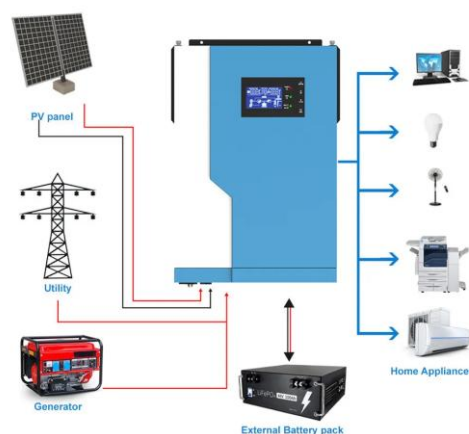
1. Αντιστροφείς Δικτύου (Grid-Tied Inverters), που είναι σχεδιασμένοι να συνδέονται απευθείας με το ηλεκτρικό δίκτυο [8]. Εκτός από τη μετατροπή της τάσης, οι αντιστροφείς δικτύου συγχρονίζονται με τη συχνότητα και την τάση του δικτύου, εξασφαλίζοντας ότι η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο χωρίς προβλήματα, ενώ είναι εφοδιασμένοι και με συστήματα ασφαλείας για να αποτρέπουν την τροφοδοσία ενέργειας στο

δίκτυο κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος, προστατεύοντας τους τεχνικούς που εργάζονται στις γραμμές. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα σύστημα Grid-Tied Inverter συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 2.1. Σύστημα Grid-Tied inverter συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο [50].

2. Αυτόνομοι Αναστροφείς (Off-Grid Inverters), που χρησιμοποιούνται σε συστήματα που δεν απαιτούν σύνδεση με το δίκτυο και συνήθως συνδυάζονται με μπαταρίες για την αποθήκευση ενέργειας. Είναι σχεδιασμένοι να παρέχουν σταθερή τάση και συχνότητα στα φορτία, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της παραγωγής από τα Φ/Β πάνελ ή της αποθήκευσης ενέργειας στις μπαταρίες. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι δυνατότητες σύνδεσης ενός Off Grid Inverter [9].



Σχήμα 2.2. Συνδεσιμότητα Off Grid Inverter [51].

3. Υβριδικοί Αναστροφείς (Hybrid Inverters), που μπορούν να λειτουργούν τόσο σε συνδεδεμένα όσο και σε αυτόνομα συστήματα. Είναι συνήθως πιο σύνθετοι και περιλαμβάνουν

δυνατότητες διαχείρισης ενέργειας, όπως η βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας από τις μπαταρίες, τα Φ/Β πάνελ, και το δίκτυο. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η συνδεσιμότητα ενός hybrid inverter [10].



Σχήμα 2.3. Συνδεσιμότητα Hybrid Inverter [52].

Οι επιδόσεις ενός αντιστροφέα αξιολογούνται μέσω διαφόρων παραμέτρων που καθορίζουν την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Πρώτον, ο βαθμός απόδοσης (efficiency) αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες επίδοσης, καθώς δείχνει πόσο αποτελεσματικά ο αντιστροφέας μετατρέπει την εισερχόμενη DC ενέργεια σε AC, χωρίς να παρουσιάζει σημαντικές απώλειες ενέργειας, με τους σύγχρονους αντιστροφείς να έχουν υψηλά επίπεδα αποδοτικότητας, που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 95% και 98%, κάτι που είναι σημαντικό για τη βέλτιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος [11]. Μια άλλη παράμετρος αξιολόγησης είναι ο συγχρονισμός με το δίκτυο, με τους αντιστροφείς που είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο, να έχουν την ικανότητα να συγχρονίζουν την παραγόμενη τάση με τη συχνότητα και την τάση του δικτύου, εξασφαλίζοντας την σταθερότητα και την ασφάλεια του συστήματος, αποτρέποντας ενδεχόμενες διαταραχές στη λειτουργία του [12].

Επιπλέον, οι σύγχρονοι αντιστροφείς με δυνατότητες υβριδικής λειτουργίας ενσωματώνουν συστήματα διαχείρισης ενέργειας, επιτρέποντας τη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας μεταξύ των φωτοβολταϊκών πάνελ, των μπαταριών, και του δικτύου, εξασφαλίζοντας ότι η αποθήκευση και η κατανάλωση ενέργειας πραγματοποιούνται με τον πιο αποδοτικό τρόπο, μειώνοντας τις απώλειες και βελτιστοποιώντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Τέλος, η

αντοχή και η αξιοπιστία των αντιστροφών είναι εξίσου σημαντικές παράμετροι, δεδομένου ότι αυτοί λειτουργούν συνεχώς και υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, με την μακροχρόνια αξιοπιστία τους να εξασφαλίζεται μέσω ποιοτικής κατασκευής και σωστής συντήρησης, και συνήθως συνοδεύονται από εγγυήσεις διάρκειας 5 έως 10 ετών, αλλά με σωστή συντήρηση, η διάρκεια ζωής τους μπορεί να φτάσει και τα 15-20 χρόνια, καθιστώντας την σωστή επιλογή και τη συντήρησή τους βασική για την μακροχρόνια βιωσιμότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος [13].

Αν και αποδοτικοί, μπορούν να παρουσιάσουν όμως διάφορα προβλήματα, όπως θερμικές καταπονήσεις, απώλειες ισχύος, και σφάλματα στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, με την έγκαιρη και σωστή ανίχνευση και η διάγνωση αυτών των σφαλμάτων να είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της αποδοτικότητας και της ασφάλειας του Φ/Β συστήματος [14]. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, αναπτύσσονται συνεχώς νέες βελτιώσεις στους αναστροφείς, όπως η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την πρόβλεψη σφαλμάτων, ενώ οι ίδιοι οι σύγχρονοι αντιστροφείς γίνονται όλο και πιο μικρού μεγέθους, μικρού βάρους και αποδοτικοί, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στην εγκατάσταση και τη χρήση τους σε ποικίλα περιβάλλοντα.

### **2.1.2 DC-DC Μετατροπείς**

Οι DC-DC μετατροπείς είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης (DC) που παράγεται από τα Φ/Β πάνελ σε μια άλλη συνεχή τάση, που μπορεί να είναι είτε πιο υψηλή είτε πιο χαμηλή της αρχικής, διαδικασία απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και την εξασφάλιση ότι η τάση που τροφοδοτείται στις μπαταρίες, στους αντιστροφείς ή σε άλλα στοιχεία του συστήματος είναι σε σωστό επίπεδο και σταθερή.

Οι DC-DC μετατροπείς λειτουργούν με την αλλαγή του επιπέδου της τάσης εισόδου σε ένα νέο επίπεδο τάσης εξόδου, και υπάρχουν δύο βασικοί τύποι DC-DC μετατροπέων, που διαφοροποιούνται ανάλογα με την επιθυμητή σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου και εξόδου:

1. Μετατροπείς ανύψωσης τάσης (Boost Converters) που αυξάνουν την τάση εισόδου σε μια υψηλότερη τάση εξόδου και χρησιμοποιούνται συχνά σε περιπτώσεις όπου η τάση που παρέχεται από τα Φ/Β πάνελ είναι χαμηλότερη από την απαιτούμενη τάση για την τροφοδότηση άλλων συσκευών ή για την αποθήκευση ενέργειας στις μπαταρίες, με τον βασικό μηχανισμό ενός ανυψωτή να περιλαμβάνει την αύξηση της τάσης με τη βοήθεια διακοπών και διατάξεων ελέγχου. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης [15].



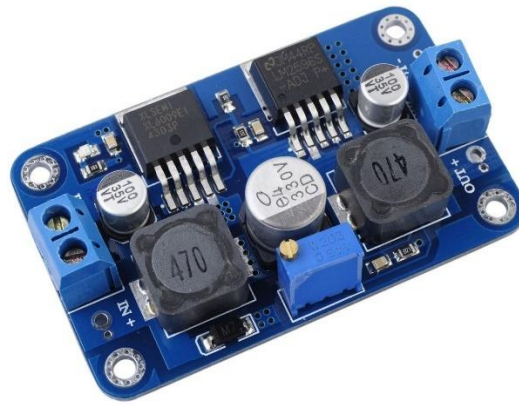
*Σχήμα 2.4. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost converter) [53].*

2. Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης (Buck Converters), που μειώνουν την τάση εισόδου σε μια χαμηλότερη τάση εξόδου, και χρησιμοποιούνται όταν η τάση που παρέχεται από τα Φ/Β πάνελ είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη τάση για την τροφοδότηση φορτίων ή για την αποθήκευση ενέργειας. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης [16].



*Σχήμα 2.5. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck converter) [54].*

3. Μετατροπείς ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης (Buck-Boost Converters), που μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την τάση εισόδου, προσφέροντας ευελιξία σε εφαρμογές όπου η τάση εισόδου μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη, είτε μικρότερη από την απαιτούμενη τάση εξόδου [17].



Σχήμα 2.6. Μετατροπέας ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης (Buck-Boost Converter)[55].

Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν την απόδοση ενός DC-DC μετατροπέα και εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος, είναι αρκετές. Αρχικά, η αποδοτικότητα (efficiency) η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου, με τους σύγχρονους DC-DC μετατροπείς να έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν υψηλή αποδοτικότητα, συνήθως άνω του 90%, μειώνοντας έτσι τις απώλειες ενέργειας κατά τη μετατροπή της τάσης, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε συστήματα όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και η ελαχιστοποίηση των απωλειών είναι ζητούμενες. Επιπλέον, η σταθερότητα τάσης (voltage regulation) καθορίζει την ικανότητα ενός DC-DC μετατροπέα να διατηρεί μια σταθερή τάση εξόδου, ακόμη και όταν η τάση εισόδου ή η ισχύς του φορτίου μεταβάλλονται, ικανότητα απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, καθώς διασφαλίζει ότι οι συσκευές που τροφοδοτούνται από τον μετατροπέα λειτουργούν υπό βέλτιστες συνθήκες, χωρίς να επηρεάζονται από διακυμάνσεις στην τροφοδοσία.

Η θερμική διαχείριση (thermal management) αποτελεί έναν άλλο σημαντικό παράγοντα για την απόδοση των DC-DC μετατροπέων, με τους μετατροπείς να παράγουν θερμότητα κατά την λειτουργία τους με την αποτελεσματική διαχείριση αυτής της θερμότητας να είναι απαραίτητη για την αποφυγή υπερθέρμανσης, που μπορεί να μειώσει την απόδοση και να επηρεάσει αρνητικά τη μακροχρόνια αξιοπιστία του, επιβάλλοντας την ύπαρξη αποτελεσματικών μηχανισμών ψύξης και θερμικής διαχείρισης για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας και της μακροζωίας του μετατροπέα. Τέλος, η απόκριση σε φόρτο (load response) είναι μια ακόμη σημαντική παράμετρος που αξιολογείται στους DC-DC μετατροπείς, με την ικανότητα του μετατροπέα να αντιδρά γρήγορα σε αλλαγές φορτίου χωρίς να επηρεάζεται η τάση εξόδου επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια και την αποδοτικότητα του συστήματος, διασφαλίζοντας ότι ο μετατροπέας μπορεί να παρέχει σταθερή ισχύ ακόμη και σε δυναμικές συνθήκες λειτουργίας,

αποτρέποντας πιθανά προβλήματα που θα μπορούσαν να προκύψουν από απότομες αλλαγές στο φορτίο. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ένας βιομηχανικός DC-DC μετατροπέας ισχύος [18].



*Σχήμα 2.7. Βιομηχανικός μετατροπέας ισχύος [56].*

Στα Φ/Β συστήματα, οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται κυρίως για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των Φ/Β πάνελ και για την προσαρμογή της τάσης για άλλες εφαρμογές, με μερικές να αναφέρονται παρακάτω:

- Σε διαχείριση ενέργειας, δηλαδή σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, οι μετατροπείς ανύψωσης τάσης χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την τάση από πολλές σειρές Φ/Β πάνελ ώστε να επιτευχθεί μια επιθυμητή τάση εξόδου για τη σύνδεση με έναν κεντρικό αντιστροφέα.
- Σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπου στα αυτόνομα Φ/Β συστήματα με μπαταρίες, οι μετατροπείς υποβιβασμού τάσης χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν την τάση από τα Φ/Β πάνελ στην απαιτούμενη τάση για φόρτιση των μπαταριών μέσω των charge controllers.
- Σε βελτιστοποίηση απόδοσης, με τους DC-DC μετατροπείς που περιλαμβάνουν MPPT (Maximum Power Point Tracking) ελεγκτές να βελτιστοποιούν τη λειτουργία των Φ/Β πάνελ, εξασφαλίζοντας ότι η τάση και η ρεύμα που εξάγεται από τα πάνελ είναι πάντα στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος.

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση DC-DC μετατροπέων πρέπει να αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η θερμική διαχείριση, ο βαθμός απόδοσης και η απόκριση σε φόρτο. Με τις συνεχείς εξελίξεις στην τεχνολογία, οι σύγχρονοι μετατροπείς είναι ολοένα και πιο συμπαγείς, αποδοτικοί και ευέλικτοι, με τις τεχνολογίες να προχωρούν προς τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας, μέσω της χρήσης προηγμένων υλικών και σχεδιαστικών τεχνικών για την αύξηση της αποδοτικότητας και τη μείωση του κόστους παραγωγής.



### 2.1.3 MPPT (Maximum Power Point Tracking) Ελεγκτές

Οι MPPT (Maximum Power Point Tracking) ελεγκτές βελτιστοποιούν την απόδοση των Φ/Β πάνελ εξασφαλίζοντας ότι λειτουργούν πάντα κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος τους, και είναι σχεδιασμένοι να ανιχνεύουν και να προσαρμόζουν συνεχώς τις συνθήκες λειτουργίας των πάνελ για να μεγιστοποιούν την ποσότητα ενέργειας που παράγεται από αυτά [19]. Το MPP είναι το σημείο στο οποίο η συνδυασμένη τάση και ρεύμα των πάνελ επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ, και δεδομένου ότι οι συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασίας και άλλων παραγόντων μπορεί να αλλάζουν διαρκώς, η τάση και το ρεύμα των πάνελ μπορεί να μετακινηθούν μακριά από το MPP.

Ο MPPT ελεγκτής λειτουργεί με συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά ο ελεγκτής μετρά συνεχώς την τάση και το ρεύμα των Φ/Β πάνελ για να υπολογίσει την ισχύ που παράγεται. Ακολουθώντας με βάση τις μετρήσεις, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί διάφορους αλγόριθμους για να υπολογίσει το σημείο μέγιστης ισχύος, περιλαμβάνοντας τη διαχείριση του συνδυασμού τάσης και ρεύματος που παράγουν τα πάνελ για να βρει την ιδανική κατάσταση λειτουργίας. Το επόμενο βήμα είναι η προσαρμογή της εξόδου του μετατροπέα ισχύος (DC-DC μετατροπέα) για να εξασφαλιστεί ότι τα πάνελ λειτουργούν κοντά στο MPP, επιτρέποντας την εξαγωγή της μέγιστης δυνατής ισχύος, με τον ελεγκτή να επαναλαμβάνει τα παραπάνω βήματα συνεχώς, ανατροφοδοτώντας τα δεδομένα και προσαρμόζοντας την τάση και το ρεύμα για να ανταποκριθούν στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για την επίτευξη λειτουργίας στο MPP, οι MPPT ελεγκτές χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους, με τους πιο γνωστούς να παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ο αλγόριθμος Perturb and Observe (P&O), που λειτουργεί διαταράσσοντας περιοδικά την τάση του Φ/Β συστήματος και παρατηρώντας την επίδραση στην ισχύ [20]. Αν η ισχύς αυξάνεται, η τάση προσαρμόζεται στην κατεύθυνση της αύξησης, ενώ αν η ισχύς μειώνεται, η τάση προσαρμόζεται αντίθετα, με τον αλγόριθμο να επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία συνεχώς για να βρει το MPP [21].
- Ο αλγόριθμος Incremental Conductance (IncCond), που λειτουργεί μετρώντας την παράγωγο του ρεύματος ως προς την τάση των πάνελ για να υπολογίσει αν η ισχύς αυξάνεται ή μειώνεται και να προσαρμόσει τη τάση έτσι ώστε να επιτευχθεί λειτουργία στο MPP, καθιστώντας τον ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις με γρήγορες αλλαγές στις συνθήκες φωτισμού [22]. Ο αλγόριθμος παρακολούθησης με βελτιστοποίηση τάσης (Voltage-Based MPPT) που εστιάζει



στη συνεχή προσαρμογή της τάσης εξόδου, χρησιμοποιώντας στατιστικά στοιχεία και μοντέλα για να προβλέψει την βέλτιστη τάση [23].

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των μεθόδων MPPT είναι η ικανότητά τους να μεγιστοποιούν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ, μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και προσαρμογής της τάσης και του ρεύματος των πάνελ, επιτρέποντας έτσι την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ισχύος, ακόμα και σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φωτισμού και θερμοκρασίας, διασφαλίζοντας ότι τα πάνελ λειτουργούν πάντα κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος, αυξάνοντας τη συνολική παραγωγή ενέργειας του συστήματος. Επιπλέον προσφέρουν εξαιρετική ευελιξία σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού, που μπορούν να αλλάζουν γρήγορα λόγω καιρικών συνθηκών ή άλλων παραγόντων, έχοντας την ικανότητα να προσαρμόζονται γρήγορα σε αυτές τις αλλαγές, εξασφαλίζοντας ότι τα πάνελ λειτουργούν πάντα κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος ακόμα και όταν οι συνθήκες περιβάλλοντος μεταβάλλονται συνεχώς.

Η συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση που παρέχουν οι MPPT ελεγκτές συμβάλλει επίσης στη μακροχρόνια αξιοπιστία του φωτοβολταϊκού συστήματος, βοηθώντας στη μείωση των απωλειών ενέργειας και εξασφαλίζει ότι το σύστημα λειτουργεί με τη βέλτιστη απόδοση, βελτιώνοντας παράλληλα την συνολική αξιοπιστία και την μακροχρόνια απόδοση του συστήματος, μειώνοντας τον κίνδυνο προβλημάτων που προκύπτουν από μη βέλτιστη λειτουργία. Τέλος, σε συστήματα φωτοβολταϊκών που περιλαμβάνουν αποθήκευση ενέργειας, οι MPPT ελεγκτές βελτιώνουν την αποδοτικότητα της φόρτισης των μπαταριών, συμβάλλοντας στην αύξηση της ποσότητας της ενέργειας που αποθηκεύεται, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική ενεργειακή διαχείριση του συστήματος και την παροχή περισσότερης διαθέσιμης ενέργειας όταν είναι απαραίτητο [24].

Ωστόσο, οι MPPT ελεγκτές δεν είναι χωρίς περιορισμούς, με κυριότερη την υπολογιστική πολυπλοκότητα που απαιτεί η λειτουργία τους, απαιτώντας σημαντική υπολογιστική ισχύ για να επιτύχουν την βέλτιστη απόδοση, κάτι που μπορεί να προσθέσει κόστος και πολυπλοκότητα στο σύστημα, το οποίο μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για κάποιες εφαρμογές, ιδιαίτερα για μικρότερα ή προϋπολογισμένα συστήματα. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα των MPPT ελεγκτών μπορεί να μειωθεί σε καταστάσεις υψηλής σκίασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καθώς όταν τα φωτοβολταϊκά πάνελ βρίσκονται υπό σκιά, η ικανότητα των MPPT ελεγκτών να διατηρήσουν τη λειτουργία κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος μπορεί να περιοριστεί, επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση του συστήματος. Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη

θερμική διαχείριση των MPPT ελεγκτών, με ορισμένους ελεγκτές να αντιμετωπίζουν προβλήματα υπερθέρμανσης, ιδιαίτερα όταν λειτουργούν σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή όταν η σχεδίαση του συστήματος δεν παρέχει επαρκή ψύξη, με την υπερθέρμανση επηρεάζει δυννητικά τη λειτουργία και την αξιοπιστία των ελεγκτών, απαιτώντας πρόσθετους μηχανισμούς ψύξης ή άλλες λύσεις για την αποφυγή υπερθέρμανσης και την εξασφάλιση της μακροχρόνιας αξιοπιστίας του συστήματος [25]. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένας λειτουργικός ελεγκτής φόρτισης MPPT.



Σχήμα 2.8 Παράδειγμα εμπορικά διαθέσιμου ελεγκτή φόρτισης MPPT [57].

## 2.2 Κοινά σφάλματα και προβλήματα των μετατροπέων ισχύος

Ο μετατροπέας ισχύος λειτουργεί σε συνεργασία με τα Φ/Β πάνελ και άλλες υπό-συγκροτήσεις του συστήματος, όπως μπαταρίες και συστήματα παρακολούθησης, και καθώς η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τα Φ/Β πάνελ, αυτή εισέρχεται στον μετατροπέα όπου υφίσταται επεξεργασία για να πληροί τις απαιτήσεις τάσης και συχνότητας του δικτύου ή των φορτίων που πρόκειται να τροφοδοτηθούν. Στις πιο προηγμένες εγκαταστάσεις, οι μετατροπείς ισχύος συνδέονται σε δίκτυα επικοινωνίας που επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο της απόδοσης τους, καθώς και τη λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας δυνατή την άμεση αντίδραση σε οποιεσδήποτε ανωμαλίες ή σφάλματα που μπορεί να προκύψουν. Οι μετατροπείς ισχύος είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν με υψηλή αποδοτικότητα, διασφαλίζοντας ότι η μέγιστη δυνατή ενέργεια από τα Φ/Β πάνελ μεταφέρεται στα φορτία ή στο

δίκτυο, με τις σύγχρονες τεχνολογίες να επιτρέπουν την ανάπτυξη μετατροπών με υψηλή αξιοπιστία και χαμηλό κόστος συντήρησης, συμβάλλοντας έτσι στη βιωσιμότητα και αποδοτικότητα των Φ/Β συστημάτων.

Η λειτουργία των μετατροπών ισχύος επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως η ποιότητα των εξαρτημάτων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, και η συντήρηση του εξοπλισμού, καθιστώντας την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας τους απαραίτητη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων ανίχνευσης και διάγνωσης σφαλμάτων, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια της εργασίας.

Οι μετατροπείς ισχύος μπορεί να αντιμετωπίσουν διάφορα σφάλματα και προβλήματα που επηρεάζουν την απόδοσή τους οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση του συστήματος, αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, ή ακόμα και βλάβη των εξαρτημάτων. Παρακάτω αναλύονται τα κοινά σφάλματα και προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στους μετατροπείς ισχύος:

### **1. Θερμική Υπερφόρτωση**

Η υπερθέρμανση είναι ένα κοινό πρόβλημα στους μετατροπείς ισχύος, το οποίο μπορεί να προκληθεί από υπερφόρτωση, κακή σχεδίαση ή ανεπαρκή θερμική διαχείριση, οδηγώντας σε μειωμένη αποδοτικότητα, αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και ενδεχομένως σε μόνιμη βλάβη του μετατροπέα [26]. Τα προβλήματα θερμικής υπερφόρτωσης μπορεί να προληφθούν με τη χρήση επαρκών συστημάτων ψύξης και τη διασφάλιση ότι ο μετατροπέας λειτουργεί εντός των καθορισμένων θερμοκρασιακών ορίων.

### **2. Αστάθεια Εξόδου**

Η αστάθεια στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα ασταθή τάση εισόδου ή ελαττωματικά εξαρτήματα, επηρεάζοντας την ποιότητα της τάσης που παρέχεται στο υπόλοιπο σύστημα, οδηγώντας σε αναποτελεσματική λειτουργία άλλων συσκευών που τροφοδοτεί ο μετατροπέας, ή ακόμα και σε βλάβες [27].

### **3. Κακή Απόκριση σε Φορτίο**

Οι μετατροπείς ισχύος πρέπει να ανταποκρίνονται γρήγορα σε αλλαγές στο φορτίο, γιατί αν ο μετατροπέας δεν έχει καλή απόκριση σε γρήγορες αλλαγές φορτίου, η τάση εξόδου μπορεί να υποστεί μεγάλες διακυμάνσεις, επηρεάζοντας την απόδοση του συνολικού συστήματος, με ελλείψεις στη σχεδίαση του ελεγκτή και ακατάλληλες ρυθμίσεις να οδηγούν σε αργή ή μη επαρκή απόκριση [28].

#### **4. Απώλειες Ενέργειας**

Η αποδοτικότητα των μετατροπέων ισχύος δεν είναι πάντα 100%, και κάποιες απώλειες ενέργειας είναι αναπόφευκτες, και προκύπτουν από την αντίσταση των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων του μετατροπέα, την έλλειψη βέλτιστης σχεδίασης ή την κακή συντήρηση, με την αύξηση της αποδοτικότητας και την μείωση των απωλειών ενέργειας να είναι βασικές για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος [29].

#### **5. Ηλεκτρικές Παρεμβολές και Θόρυβος**

Η παρουσία ηλεκτρικών παρεμβολών και θορύβου επηρεάζουν την απόδοση των μετατροπέων ισχύος, προκαλώντας προβλήματα στην ποιότητα της τάσης και της ρεύματος, με τον θόρυβο να μπορεί να προκληθεί από την κακή σχεδίαση του κυκλώματος ή από εξωτερικές πηγές ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, με την χρήση φίλτρων και την σωστή σχεδίαση του κυκλώματος να μειώνει τις παρεμβολές και να βελτιώσει την απόδοση [30].

#### **6. Ελαττωματικά Στοιχεία**

Ελαττωματικά ή φθαρμένα εξαρτήματα του μετατροπέα, όπως πυκνωτές, πηνία ή διακόπτες ισχύος, οδηγούν σε μειωμένη απόδοση ή ακόμα και σε πλήρη αποτυχία του μετατροπέα, με τον τακτικό έλεγχο και τη συντήρηση των στοιχείων του μετατροπέα να εντοπίζουν και να προλαμβάνουν τέτοια προβλήματα πριν οδηγήσουν σε σοβαρές βλάβες [31].

#### **7. Λάθη Σχεδίασης και Υλοποίησης**

Τέλος, λάθη στη σχεδίαση ή στην υλοποίηση του μετατροπέα ισχύος οδηγούν σε προβλήματα λειτουργίας, περιλαμβάνοντας την επιλογή ακατάλληλων εξαρτημάτων, λανθασμένους υπολογισμούς ή ανακριβείς ρυθμίσεις, με την προσεκτική σχεδίαση και την δοκιμή του μετατροπέα κατά την υλοποίηση να οδηγεί στην αποφυγή τέτοιων προβλημάτων [32].

### **2.3 Τεχνητή Νοημοσύνη**

Η τεχνητή νοημοσύνη εστιάζει στη δημιουργία και ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων που έχουν ως στόχο την πρόβλεψη ή τη λήψη αποφάσεων, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης δεδομένων, όπου οι αλγόριθμοι και τα μοντέλα εκπαιδεύονται για να εξάγουν νέα και ασφαλή δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις ή αποφάσεις. Η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης είναι ευρεία και περιλαμβάνει τον τομέα της αναγνώρισης προτύπων, της υπολογιστικής όρασης, της επεξεργασίας εικόνας και φωνής, καθώς και την πρόβλεψη διαφόρων τιμών, όπως η πρόβλεψη αποδόσεων μετοχών.

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τη τεχνητή νοημοσύνη, που προέρχονται από διαφορετικούς τομείς. Δύο τέτοιοι ορισμοί είναι:

- Ορισμός του Carbonell (1997): "Η μελέτη υπολογιστικών μεθόδων για την απόκτηση νέας γνώσης, νέων δεξιοτήτων και νέων τρόπων οργάνωσης της υπάρχουσας γνώσης".
- Ορισμός του Mitchell (1997): "Ένα πρόγραμμα υπολογιστή θεωρείται ότι μαθαίνει μέσω της εμπειρίας  $E$  που αποκτά κατά τη διάρκεια κάποιων δραστηριοτήτων  $T$ , και σε συνδυασμό με μια μετρική απόδοσης  $P$ , εάν οι επιδόσεις του στις δραστηριότητες  $T$ , όπως αξιολογούνται από την  $P$ , βελτιώνονται με την εμπειρία  $E$ ".

Η επιβλεπόμενη μάθηση (Supervised Learning) είναι η πρώτη κατηγορία της μηχανικής μάθησης. Σε αυτήν την κατηγορία, το μοντέλο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων που περιλαμβάνει τόσο τις εισόδους ( $x_i$ ) όσο και τις αντίστοιχες επιθυμητές εξόδους ( $y_i$ ), όπου  $i = 1, 2, \dots, n$ . Κάθε  $x_i$  αντιπροσωπεύει ένα διάνυσμα εισόδου διαστάσεων  $d$ , ενώ οι  $y_i$  αντιστοιχούν στις επιθυμητές εξόδους. Ανάλογα με τον τύπο της μεταβλητής εξόδου  $y_i$ , η επιβλεπόμενη μάθηση χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Κατηγοριοποίηση, με τις κλάσεις της μεταβλητής εξόδου να είναι διακριτές.
- Παλινδρόμηση, με τις κλάσεις της μεταβλητής εξόδου να είναι συνεχείς.

Η μη-επιβλεπόμενη μάθηση (Unsupervised Learning) είναι δεύτερη κατηγορία μηχανικής μάθησης. Σε αυτήν την κατηγορία, τα δεδομένα δεν έχουν ετικέτες, και το μοντέλο προσπαθεί να ανακαλύψει μοτίβα ή δομές στα δεδομένα χωρίς καθοδήγηση. Διάφορα παραδείγματα της μη-επιβλεπόμενης μάθησης είναι:

- Συσταδοποίηση (Clustering): ο στόχος εδώ είναι να ομαδοποιηθούν τα δεδομένα σε ομάδες με βάση την ομοιότητά τους [33].
- Μείωση Διαστάσεων (Dimensionality Reduction): ο στόχος είναι να μειωθεί η διαστατικότητα των δεδομένων, διατηρώντας τη σημαντική πληροφορία [34].
- Αναγνώριση Προτύπων (Pattern Recognition): το μοντέλο προσπαθεί να αναγνωρίσει μοτίβα ή πρότυπα στα δεδομένα χωρίς προηγούμενη γνώση [35].
- Ανάλυση Συσχετίσεων: το μοντέλο εξετάζει τις συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών χαρακτηριστικών των δεδομένων.

Η τρίτη κατηγορία μηχανικής μάθησης είναι η ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning), με τον αλγόριθμο ο οποίος συχνά αποκαλείται «πράκτορας» (agent) να εκπαιδεύεται για να παίρνει

αποφάσεις αλληλοεπιδρώντας με ένα περιβάλλον. Σε κάθε χρονική στιγμή ο πράκτορας παρατηρεί την κατάσταση του περιβάλλοντος και εκτελεί μια ενέργεια λαμβάνοντας ανταμοιβές ή ποινές για κάθε ενέργεια που εκτελείται.[36]. Ο στόχος είναι να μάθει μια πολιτική που να οδηγεί σε μέγιστη ανταμοιβή. Η ενισχυτική μάθηση χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα σχεδιασμού (planning) και σε περιβάλλοντα που είναι δυναμικά και αλληλεπιδρούν με τον χρήστη.

Η βαθιά μάθηση (Deep Learning) αποτελεί μια εξειδικευμένη προσέγγιση της μηχανικής μάθησης, η οποία χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα με πολλά επίπεδα για την ανάλυση και την εξαγωγή πληροφοριών από τα δεδομένα [37]. Με τη χρήση αυτών των πολύπλοκων δικτύων, η βαθιά μάθηση μπορεί να ανακαλύψει σύνθετα μοτίβα και χαρακτηριστικά σε μεγάλα σύνολα δεδομένων.

Οι διαφορές μεταξύ βαθιάς μάθησης και μηχανικής μάθησης είναι οι εξής:

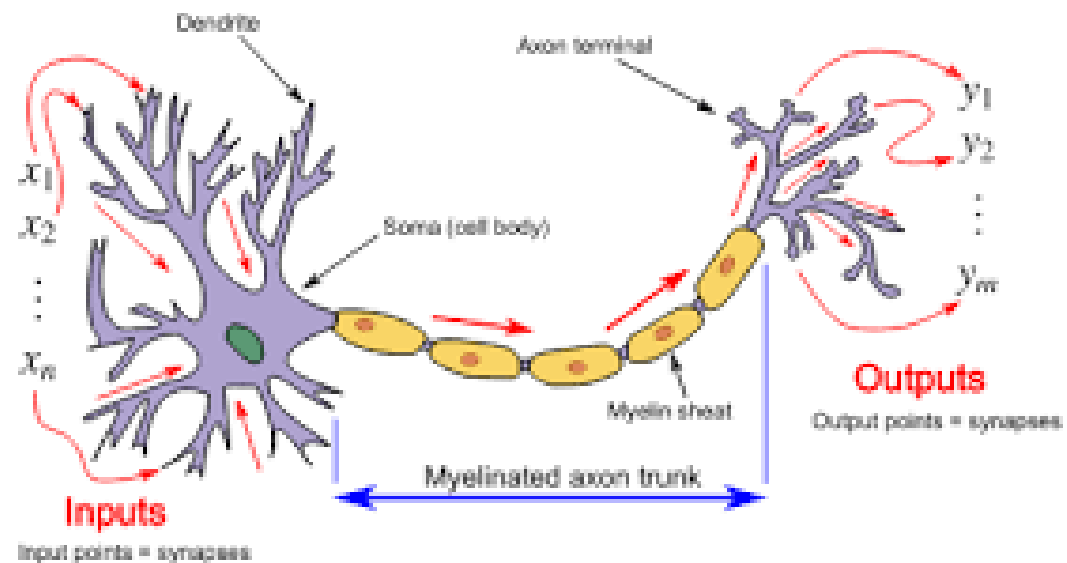
- Στην μηχανική μάθηση, η διαδικασία εστιάζει στη χρήση μικρότερου όγκου δεδομένων και στην αυτόματη ταξινόμηση. Επιπλέον, η εξαγωγή χαρακτηριστικών γίνεται με τη συνεισφορά του ανθρώπου.
- Στη βαθιά μάθηση, οι νευρώνες εκπαιδεύονται από τα δεδομένα και το μοντέλο "μαθαίνει" από τα σφάλματά του. Αυτός ο τύπος μάθησης απαιτεί πολύ μεγαλύτερο όγκο δεδομένων και χαρακτηρίζεται από μια πλήρως αυτόματη διαδικασία.

### **2.3.1 Νευρωνικά Δίκτυα**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι σημαντικότερες πληροφορίες σχετικά με τα νευρωνικά δίκτυα. Θα εξετάσουμε τρία είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων: τα νευρωνικά δίκτυα πρόσω τροφοδότησης (Feed Forward Neural Networks), τα αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (Recurrent Neural Networks) και τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks) [38,39]. Αρχικά θα εξετάσουμε τη βιολογική βάση των νευρωνικών δικτύων, και στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στις διάφορες δομές αυτών των δικτύων. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τη θεωρία της συνάρτησης κόστους (loss function), τις μεθόδους εκπαίδευσης, και τέλος θα εξετάσουμε διάφορες μετατροπές των συνόλων δεδομένων και των αλγορίθμων.

Ο όρος "νευρώνας" αναφέρεται στο νευρικό κύτταρο με όλες τις διεργασίες του. Οι νευρώνες είναι ειδικά κύτταρα που μπορούν να δέχονται και να μεταδίδουν σήματα νευρικής δραστηριότητας. Παρά τη μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος και τη μορφολογία τους, όλοι έχουν ένα κυτταρικό σώμα, από το οποίο απομακρύνονται οι νευρίτες. Οι νευρίτες λαμβάνουν την

πληροφορία από άλλους νευρώνες μέσω των δενδριτών και τη μεταφέρουν προς το κυτταρικό σώμα. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η λειτουργία ενός πραγματικού νευρώνα.

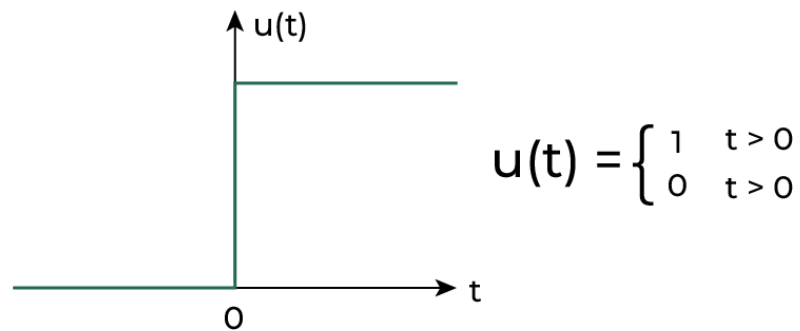


Σχήμα 2.9. Τρόπος λειτουργίας πραγματικού νευρώνα [58].

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (TNN) είναι ένας κλάδος της μηχανικής μάθησης που αντλεί έμπνευση από τη βιολογία του ανθρώπινου εγκεφάλου, με στόχο να επιτρέπουν στους υπολογιστές να επεξεργάζονται δεδομένα με τον τρόπο που λειτουργούν οι νευρώνες του εγκεφάλου για να κατανοήσουν τις εισροές πληροφοριών από τις αισθήσεις τους. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των βιολογικών και των τεχνητών νευρώνων όσον αφορά την αρχιτεκτονική και τις ιδιότητές τους.

Ένα TNN υλοποιεί αυτόματες διαδικασίες μέσω δύο κύριων φάσεων: τη φάση εκπαίδευσης (training) και τη φάση ελέγχου (testing), με κάθε τέτοιο δίκτυο να απαρτίζεται από μια σειρά νευρώνων, οι οποίοι λαμβάνουν δεδομένα εισόδου (inputs). Κάθε είσοδος έχει διαφορετική τιμή βάρους (weight), η οποία καθορίζει τη σημασία της εισόδου για τον νευρώνα. Στη συνέχεια, οι νευρώνες επεξεργάζονται τα δεδομένα και εξάγουν την πληροφορία (outputs).

Η πρώτη συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η συνάρτηση βήματος (step function). Αυτή η συνάρτηση λαμβάνει δύο τιμές: μηδέν (0) αν η είσοδος είναι μικρότερη ή ίση από ένα καθορισμένο κατώφλι ενεργοποίησης ( $\theta$ ), και ένα (1) αν η είσοδος είναι μεγαλύτερη από αυτό το κατώφλι [41]. Με αυτόν τον τρόπο, η συνάρτηση βήματος κατατάσσει τα δεδομένα στην αντίστοιχη κλάση που ανήκουν, λειτουργώντας ως ένα είδος κατωφλίου. Η γραφική απεικόνιση αυτής της λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10. Βηματική συνάρτηση.

Το μοντέλο αυτό είναι το μοντέλο McCulloch-Pitts, το οποίο συνδέεται με τη μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ), και καθώς η έρευνα στον τομέα αυτό εξελισσόταν, προέκυπτε η ανάγκη να εξεταστεί η σημασία της συνάρτησης ενεργοποίησης στη βελτίωσή τους.

### Multilayer Perceptron, MLP

Τα νευρωνικά δίκτυα τύπου Multilayer Perceptron (MLP) είναι πολύ ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος νευρωνικών δικτύων και υπάγεται στην κατηγορία των δικτύων προς τα εμπρός τροφοδότησης (Feed-Forward Neural Networks, FNN), με την πληροφορία να μεταφέρεται από την είσοδο προς την έξοδο [42]. Τα Πολύ-επίπεδα Μοντέλα (MLP) είναι το επόμενο εξελικτικό βήμα των μονοστρωματικών νευρωνικών δικτύων (single-layer perceptrons) και λειτουργούν χωρίς ανατροφοδότηση προς τους νευρώνες. Μια αρνητική πτυχή τους είναι η αργή διαδικασία εκμάθησης και η ανάγκη για μεγάλο όγκο δεδομένων.

Τα MLP αποτελούνται από τα εξής βασικά στοιχεία:

- Τους κόμβους εισόδου που αντιστοιχούν στη στιβάδα εισόδου (inputs).
- Μία ή περισσότερες κρυφές στιβάδες νευρώνων (hidden layers).
- Μία τελική στιβάδα εξόδου υπολογιστικών κόμβων (outputs).

Αν αναπαραστήσουμε την έξοδο του επιπέδου  $i$  ως  $h_i$ , τη συνάρτηση ενεργοποίησης ως  $F_i$ , την παράμετρο μετατόπισης ως  $b_i$  και τα βάρη ως  $W_i$ , γίνεται φανερό ότι ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως μια αλληλουχία μαθηματικών πράξεων.

Τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται με τη βοήθεια του αλγορίθμου back-propagation, μιας μεθόδου που βασίζεται στη συνεχή διόρθωση των σφαλμάτων που



προκύπτουν κατά την πρόβλεψη. Ο αλγόριθμος back-propagation αποτελείται από δύο περάσματα μέσα από το δίκτυο:

Κατά την πρώτη φάση, τα δεδομένα εισόδου διαδίδονται μέσα στο δίκτυο, υπολογίζοντας την έξοδο. Στη συνέχεια, κατά τη δεύτερη φάση, το σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής εξόδου υπολογίζεται και διαδίδεται προς τα πίσω, προσαρμόζοντας τα βάρη του δικτύου.

Κατά τη φάση της αντίστροφης διάδοσης, το σφάλμα που προκύπτει συγκρίνεται με την επιθυμητή έξοδο και διαδίδεται προς τα πίσω μέσα στο δίκτυο. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στην προσαρμογή των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, με στόχο τη μείωση του σφάλματος και την βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων.

### **Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional neural Network, CNN)**

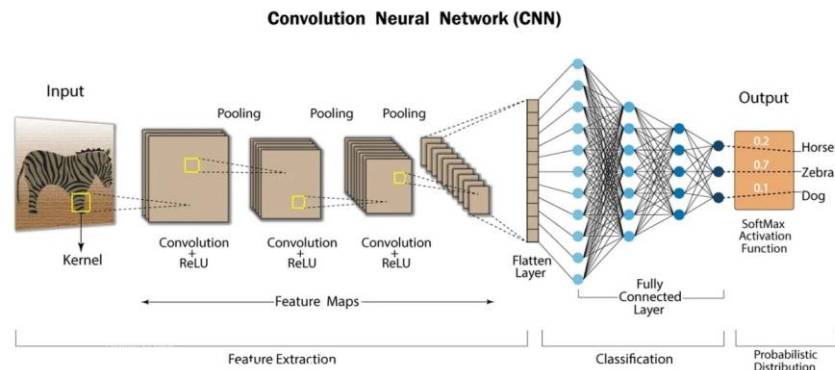
Τα Convolutional Neural Networks (CNNs) είναι ένας τύπος τεχνητών νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιούνται κυρίως για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων εικόνας και βίντεο, και είναι ειδικά σχεδιασμένα για να αναγνωρίζουν μοτίβα και χαρακτηριστικά σε εικόνες, με αποτέλεσμα να είναι αποτελεσματικά για προβλήματα όπως η αναγνώριση αντικειμένων, η ταξινόμηση εικόνων και η ανίχνευση προσώπων [43].

Τα CNNs αποτελούνται από διάφορα στρώματα που συνεργάζονται για να εξάγουν και να επεξεργαστούν χαρακτηριστικά από την είσοδο εικόνας.

Τα κύρια στρώματα είναι:

- τα στρώματα σύγκλισης (convolutional layers)
- τα στρώματα pooling
- και τα στρώματα πλήρους συνδεσιμότητας (fully connected layers).

Τα στρώματα σύγκλισης εφαρμόζουν φίλτρα στην είσοδο εικόνας, ανιχνεύοντας χαρακτηριστικά όπως άκρα και υφές, ενώ τα στρώματα pooling μειώνουν τις διαστάσεις των χαρτών ενεργοποίησης, διατηρώντας τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και μειώνοντας τον υπολογιστικό φόρτο. Τέλος τα στρώματα πλήρους σύνδεσης λειτουργούν όπως τα παραδοσιακά νευρωνικά δίκτυα, όπου κάθε νευρώνας συνδέεται με όλους τους νευρώνες του προηγούμενου στρώματος, συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά για την τελική πρόβλεψη ή ταξινόμηση. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ένα τυπικό δίκτυο CNN.



Σχήμα 2.11. Τυπικό δίκτυο CNN [59].

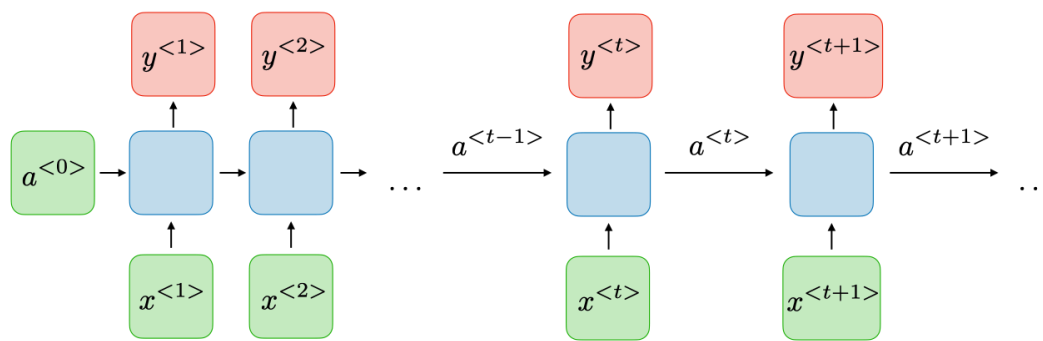
Κατά την εκπαίδευση των CNNs, το δίκτυο μαθαίνει να προσαρμόζει τα βάρη των φίλτρων του μέσω της διαδικασίας της οπισθοδρόμησης (back propagation) και του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, επιτρέποντας στο δίκτυο να βελτιώνει την ακρίβειά του στο να αναγνωρίζει τα σωστά χαρακτηριστικά, με τα πλεονεκτήματα των CNNs να είναι πολυάριθμα:

- μπορούν να μάθουν αυτόματα τα κατάλληλα χαρακτηριστικά από τα δεδομένα, χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης εξαγωγής χαρακτηριστικών.
- η χρήση των φίλτρων και των στρωμάτων pooling μειώνει τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να μάθει το δίκτυο, καθιστώντας το πιο αποδοτικό.
- τα CNNs είναι ανθεκτικά σε μικρές μεταβολές της κλίμακας, της περιστροφής και της μετάθεσης των αντικειμένων στις εικόνες.

### Παλινδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks, RNN)

Τα παλινδρομικά νευρωνικά δίκτυα (RNN) είναι μια κατηγορία τεχνητών νευρωνικών δικτύων, κατάλληλη για την επεξεργασία ακολουθιακών δεδομένων. Έχει επιτυχώς χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, όπως η μετάφραση κειμένου και η αναγνώριση φωνής. Η τοπολογία του είναι παρόμοια με εκείνη των MLP, αλλά επιτρέπει συνδέσεις μεταξύ των κρυφών επιπέδων με χρονική καθυστέρηση. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να "μαθαίνει" από προηγούμενα δεδομένα, ακόμα και μεγάλης χρονικής απόστασης μεταξύ τους. Αντίθετα, τα MLP δημιουργούν προβλέψεις μόνο από την τρέχουσα είσοδό τους [44].

Το Σχήμα 2.12 απεικονίζει τη βασική δομή ενός απλού επαναλαμβανόμενου νευρωνικού δικτύου, όπου τα δεδομένα εισόδου επεξεργάζονται σε κάθε χρονική στιγμή, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την τρέχουσα είσοδο όσο και την προηγούμενη κατάσταση του δικτύου, και αποτελείται από τρία κύρια τμήματα: την είσοδο, την κρυφή στρώση και την έξοδο.



Σχήμα 2.12. Ακολουθιακό νευρωνικό δίκτυο[60].

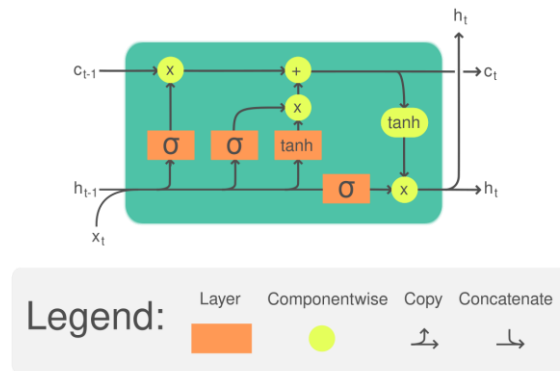
Η λειτουργία ενός τυπικού νευρωνικού δικτύου RNN είναι όπως ακολούθως: σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ , τα δεδομένα εισόδου από την τρέχουσα μονάδα δεδομένων  $x(t)$  εισέρχονται στις στρώσεις με επαναλαμβανόμενες συνδέσεις. Ταυτόχρονα, εισέρχονται και τιμές από την κρυφή στρώση  $a(t-1)$ , όπου αυτές οι τιμές αντιπροσωπεύουν την κατάσταση του δικτύου μια χρονική στιγμή πριν. Ο υπολογισμός της  $y(t)$  καθορίζεται από τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το  $a(t)$  της κρυφής στρώσης τη χρονική στιγμή  $t$ . Είναι φυσικό ότι τα δεδομένα εισόδου  $x(t-1)$  που λαμβάνονται τη χρονική στιγμή  $t-1$  μπορούν να επηρεάσουν την έξοδο  $y(t)$  της χρονικής στιγμής  $t$  και, στη συνέχεια, με την πάροδο των επαναλαμβανόμενων συνδέσεων αν το δίκτυο έχει εκπαιδευτεί σωστά και ελέγχει τη διάδοση των δεδομένων τότε τα δεδομένα εξόδου μπορεί να ενισχυθούν, ενώ αν δεν έχουμε σωστή εκπαίδευση υπάρχει περίπτωση να χαθούν κάποια δεδομένα εισόδου από προηγούμενες χρονικές στιγμές.

### Δίκτυα Μακράς Βραχύχρονης Μνήμης (LSTM)

Τα νευρωνικά δίκτυα μακράς βραχύχρονης μνήμης (Long Short-Term Memory) είναι μέρος της ευρύτερης κατηγορίας των παλινδρομικών νευρωνικών δικτύων (RNN) [45]. Τα RNN λύνουν αποτελεσματικά αρκετά προβλήματα, αλλά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στη μεταφορά πληροφορίας σε μεγάλα χρονικά διαστήματα λόγω της τάσης τους να ξεχνούν πληροφορίες από προηγούμενα χρονικά βήματα. Τα νευρωνικά δίκτυα Long Short-Term Memory δημιουργήθηκαν για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα, με την πρώτη τους αναφορά να χρονολογείται το 1997 από τους Sepp Hochreiter και Jürgen Schmidhuber [46].

Τα νευρωνικά δίκτυα Long Short-Term Memory είναι σχεδόν παρόμοια με τα RNN, αλλά διαθέτουν πρόσθετες πύλες (gates) που επιτρέπουν τη ρύθμιση της ροής της πληροφορίας στο εσωτερικό τους σώματος. Αυτές οι πύλες επιτρέπουν σε ένα νευρωνικό δίκτυο Long Short-Term

Memory να προσθέτει ή να αφαιρεί πληροφορία ανάλογα με τη σημασία της για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Με αυτόν τον τρόπο, το νευρωνικό δίκτυο Long Short-Term Memory μπορεί να αντιμετωπίσει μακροχρόνιες συσχετίσεις σε ακολουθιακά δεδομένα με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται ένας νευρώνας δικτύου Long Short-Term Memory.



Σχήμα 2.13. Νευρώνας LSTM [61].

## Νευρώνας LSTM

Η εσωτερική κατάσταση (cell state) των μονάδων LSTM αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο, καθώς διαδραματίζει ρόλο στη διατήρηση και μεταφορά της πληροφορίας από προηγούμενα σε μελλοντικά χρονικά βήματα. Οι πύλες (gates) είναι κρίσιμες για τη λειτουργία της εσωτερικής κατάστασης, καθώς ελέγχουν τη ροή της πληροφορίας. Ο πολλαπλασιασμός element-wise των εξόδων των πυλών με το αντίστοιχο διάνυσμα εισόδου ελέγχει την ποσότητα πληροφορίας που περνάει μέσω του δικτύου. Επιπλέον, η κρυφή κατάσταση χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ των χρονικών βημάτων, συμβάλλοντας στην εξαγωγή σημαντικών προβλέψεων.

Η πύλη λήθης σε ένα LSTM δίκτυο λειτουργεί ως ένα είδος "φίλτρου" που αποφασίζει ποια πληροφορία από το παρελθόν είναι σημαντική για να διατηρηθεί και ποια μπορεί να απορριφθεί. Με άλλα λόγια, "ξεχνά" τις άχρηστες πληροφορίες και "θυμάται" αυτές που χρειάζονται για τις μελλοντικές προβλέψεις.

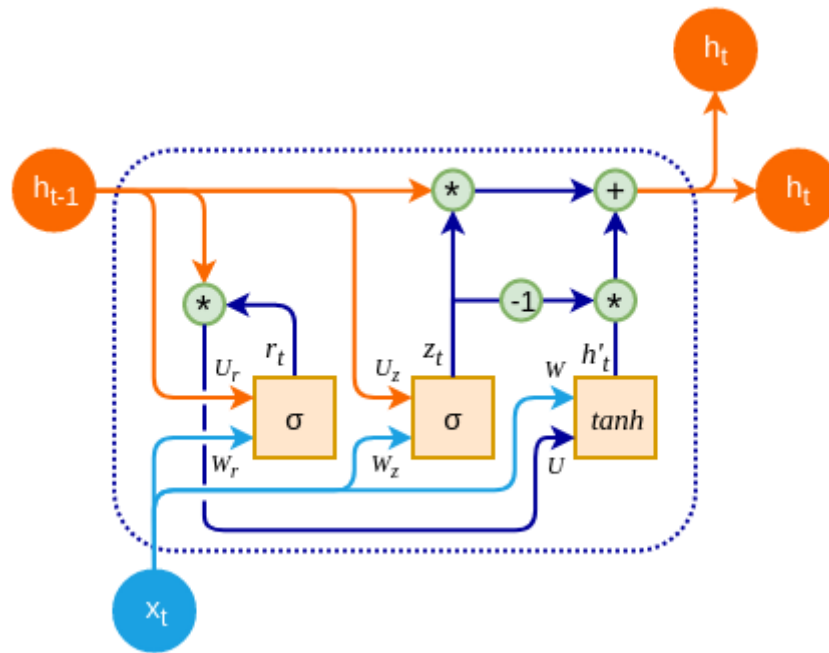
Η πύλη εισόδου καθορίζει σε ποιο βαθμό η νέα πληροφορία θα επηρεάσει την εσωτερική κατάσταση του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο μπορεί να εστιάσει στις πιο σημαντικές πτυχές των εισερχόμενων δεδομένων.

Η πύλη εξόδου (output gate) έχει ως κύριο ρόλο να επιλέγει ποια στοιχεία της εσωτερικής κατάστασης  $c_t$  Σχήμα 2.13 θα περάσουν στην έξοδο του δικτύου. Το διάνυσμα  $c_t$  υπολογίζεται ως η σύνθεση δύο άλλων διανυσμάτων, με τη χρήση της συνάρτησης ενεργοποίησης  $\tanh$ , παράγοντας έτσι το τελικό διάνυσμα εξόδου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, οι τιμές του διανύσματος βρίσκονται στο διάστημα  $[-1,1]$ .

### **Gated recurrent units (GRU)**

Τα Gated Recurrent Units (GRU) αποτελούν μια κατηγορία παλινδρομικών νευρωνικών δικτύων εξέχουσας σημασίας, που αναπτύχθηκε ως μια επέκταση στα RNN δίκτυα. Για πρώτη φορά εμφανιστήκαν το 2014 από τον Cho [47]. Δομικά είναι παρεμφερή με τα LSTM δίκτυα, αλλά χρειάζονται λιγότερες παραμέτρους, καθιστώντας τα πιο αποδοτικά σε υπολογιστική ισχύ.

Τα GRU δίκτυα συνδυάζουν τις πύλες ενημέρωσης (update gate) και επαναφοράς (reset gate) των LSTM σε μια μόνο πύλη, η οποία ονομάζεται πύλη ενημέρωσης. Και τα δύο αυτά μοντέλα σχεδιάστηκαν για τη διαγραφή από τη μνήμη της άχρηστης πληροφορίας. Η προσέγγιση του GRU εκθέτει πλήρως το περιεχόμενο της μνήμης του και, μέσω της μεθόδου ολοκλήρωσης διαρροής (Leaky Integration), επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ του προηγούμενου περιεχομένου μνήμης και του νέου περιεχομένου μνήμης. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται ένας νευρώνας GRU.



Σχήμα 2.14. Νευρώνας GRU [61].

Η πύλη επαναφοράς σε ένα δίκτυο GRU χρησιμεύει ως μηχανισμός που επιτρέπει στο δίκτυο να "ξεχνά" προηγούμενες πληροφορίες και να εστιάζει σε νέες εισόδους. Είναι σαν ένα είδος "reset" κουμπιού που επιτρέπει στο δίκτυο να ξεκινήσει από την αρχή την επεξεργασία νέων δεδομένων.

Η πύλη ενημέρωσης σε ένα GRU δίκτυο καθορίζει σε ποιο βαθμό η τρέχουσα κατάσταση του δικτύου θα ενημερωθεί με βάση την τρέχουσα είσοδο. Όπως και η πύλη επαναφοράς, υπολογίζει μια τιμή μεταξύ 0 και 1. Μια τιμή κοντά στο 1 υποδεικνύει ότι η τρέχουσα κατάσταση του δικτύου πρέπει να ενημερωθεί σημαντικά με βάση την τρέχουσα είσοδο, ενώ μια τιμή κοντά στο 0 υποδεικνύει ότι η τρέχουσα κατάσταση πρέπει να παραμείνει σχετικά αμετάβλητη. Επιτρέπει στο GRU να μαθαίνει τις μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις μεταξύ των δεδομένων εισόδου, καθιστώντας το ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε εργασίες όπως η αναγνώριση ομιλίας, η μετάφραση μηχανής και η ανάλυση φυσικής γλώσσας.

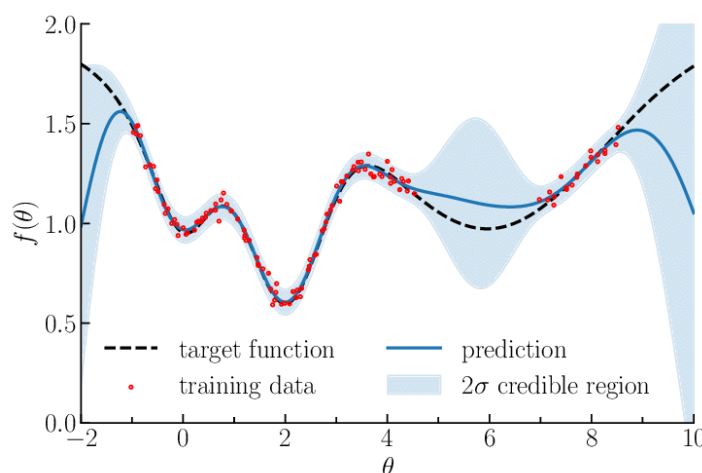
Τα GRU είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση μακροπρόθεσμων συσχετίσεων σε ακολουθιακά δεδομένα και έχουν λιγότερες παραμέτρους από τα LSTM, καθιστώντας τα πιο ελαφριά σε υπολογιστική πολυπλοκότητα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα LSTM παραμένουν προτιμητέα, ιδίως όταν αντιμετωπίζουμε πολύπλοκες ακολουθίες με μακρά χρονικά διαστήματα και απαιτούνται μακροχρόνιες εξαρτήσεις.

### 2.3.2 Gaussian Process Regression (GPR)

Η Gaussian Process Regression (GPR) είναι μια ισχυρή μη παραμετρική μέθοδος στατιστικής μοντελοποίησης, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση και πρόβλεψη σύνθετων συστημάτων, και παρέχει μια ευέλικτη προσέγγιση όπου το μοντέλο καθορίζεται από τα ίδια τα δεδομένα μέσω της διαδικασίας Gaussian, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παλινδρόμησης, οι οποίες προϋποθέτουν έναν καθορισμένο τύπο συνάρτησης που θα ταιριάζει στα δεδομένα [48].

Συγκεκριμένα, η διαδικασία Gaussian ορίζεται ως μια συλλογή τυχαίων μεταβλητών, τέτοια ώστε κάθε πεπερασμένο υποσύνολο τους να ακολουθεί πολυδιάστατη κανονική (Gaussian) κατανομή. Αντί λοιπόν να υποθέσουμε εξ αρχής ένα συγκεκριμένο μοντέλο για τη συνάρτηση που περιγράφει τα δεδομένα, θεωρούμε ότι οι παρατηρήσεις είναι δειγματοληψίες από μια Gaussian διαδικασία, δηλαδή από μια συνάρτηση που σε κάθε σημείο ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Η διαδικασία καθορίζεται από δύο στοιχεία: τη μέση συνάρτηση  $m(x)$  και τη συνάρτηση συνδιακύμανσης  $k(x, x')$ , με την μέση συνάρτηση  $m(x)$  να ορίζει την αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης στο σημείο  $x$ , και την συνάρτηση συνδιακύμανσης  $k(x, x')$  που καθορίζει τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των τιμών της συνάρτησης στα σημεία  $x$  και  $x'$ , ενώ και οι δύο συναρτήσεις μπορούν να παραμετροποιηθούν, επιτρέποντας την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Gaussian Process Regression.



Σχήμα 2.15. Παράδειγμα εφαρμογής Gaussian Process Regression [63].

Η εφαρμογή της GPR ξεκινά με την κατασκευή ενός προκαταρκτικού μοντέλου που περιλαμβάνει την υπόθεση μιας συνάρτησης συνδιακύμανσης, συνήθως γνωστής ως "kernel", με ένα δημοφιλές παράδειγμα να είναι το Radial Basis Function (RBF) ή Gaussian kernel, το οποίο καθορίζει ότι τα κοντινά σημεία στο χώρο εισόδου έχουν υψηλή συσχέτιση, ενώ τα μακρινά σημεία έχουν χαμηλή συσχέτιση. Μόλις καθοριστεί το kernel, η GPR χρησιμοποιεί τα παρατηρημένα δεδομένα για να υπολογίσει την κατανομή πιθανότητας της συνάρτησης στόχου σε νέα σημεία, με την πρόβλεψη να γίνεται με βάση τη μέση τιμή και τη συνδιακύμανση της κατανομής που παράγεται από τα παρατηρημένα δεδομένα, επιτρέποντας την παροχή όχι μόνο προβλέψεων, αλλά και εκτιμήσεων για την αβεβαιότητα αυτών των προβλέψεων.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της GPR είναι η ικανότητά της να παρέχει ακριβείς προβλέψεις ακόμα και με περιορισμένα δεδομένα, με την δυνατότητα της να εκτιμά την αβεβαιότητα στις προβλέψεις, να την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπου η αξιοπιστία των προβλέψεων είναι το σημαντικότερο, όπως στη ρομποτική και την ιατρική διάγνωση. Ωστόσο, η GPR έχει και κάποιους περιορισμούς, με έναν από τους βασικούς περιορισμούς να είναι η κλιμάκωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας με τον αριθμό των δεδομένων, απαιτώντας την αποθήκευση και επεξεργασία ενός πίνακα συνδιακύμανσης των δεδομένων, που οδηγεί σε υπολογιστική πολυπλοκότητα  $O(n^3)$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των δεδομένων, καθιστώντας την λιγότερο πρακτική για πολύ μεγάλα σύνολα δεδομένων.

Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, όπως η παλινδρόμηση σε υψηλές διαστάσεις και η ενσωμάτωση μηχανικής μάθησης με φυσικά μοντέλα, ενώ σε συστήματα πρόβλεψης, όπως η ανίχνευση βλαβών σε Φ/Β συστήματα, η GPR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη ανωμαλιών στη λειτουργία τους βασιζόμενη σε ιστορικά δεδομένα απόδοσης, προσφέροντας έτσι μια ισχυρή μέθοδο για την αναγνώριση και την αντιμετώπιση προβλημάτων πριν αυτά εξελιχθούν σε σημαντικές βλάβες.

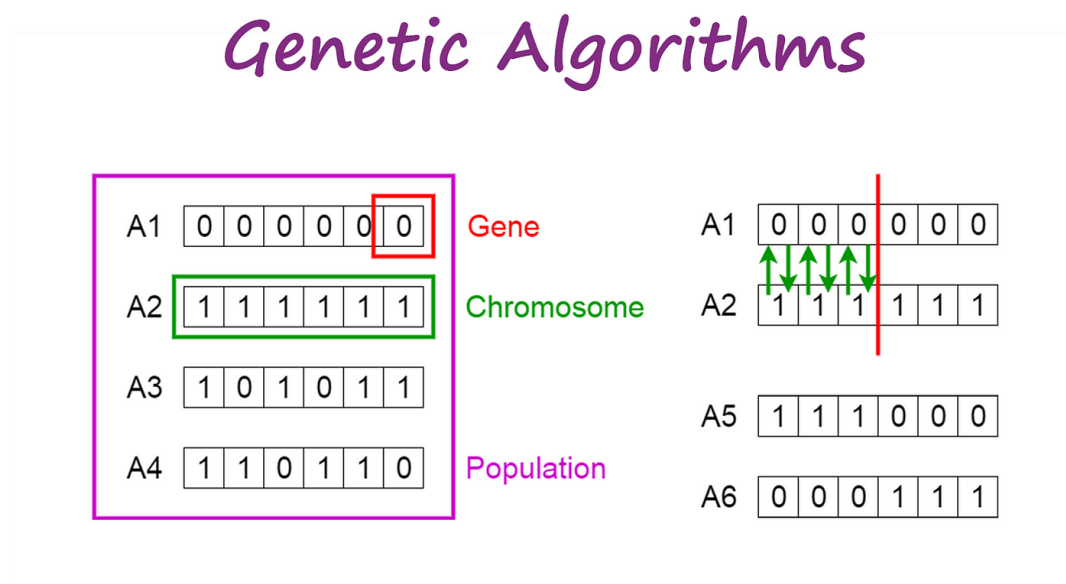
### 2.3.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms, GAs) αποτελούν μια κατηγορία αλγορίθμων βελτιστοποίησης που εμπνέονται από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής, και πρόκειται για μια μέθοδο εξελικτικής υπολογιστικής που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς, όπως η μηχανική, η οικονομία, και η τεχνητή νοημοσύνη [49]. Βασίζονται στην ιδέα της «επιβίωσης του ισχυρότερου», όπως προτάθηκε από τον Δαρβίνο στη θεωρία της εξέλιξης, με την βασική αρχή να είναι η δημιουργία



ενός πληθυσμού λύσεων, οι οποίες αναπαράγονται και εξελίσσονται με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης για ένα δεδομένο πρόβλημα.

Κάθε λύση στο πρόβλημα κωδικοποιείται ως ένα «χρωμόσωμα» ή «άτομο», το οποίο αποτελείται από μια ακολουθία γονιδίων, όπου κάθε γονίδιο αντιπροσωπεύει μια παράμετρο ή χαρακτηριστικό της λύσης, με την διαδικασία να ξεκινά με την αρχικοποίηση ενός πληθυσμού από τυχαία χρωμοσώματα, ενώ στη συνέχεια, εφαρμόζονται τελεστές όπως η επιλογή (selection), η διασταύρωση (crossover), και η μετάλλαξη (mutation) για την παραγωγή νέων γενεών. Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η λειτουργία ενός γενετικού αλγορίθμου.



Σχήμα 2.16. Παράδειγμα λειτουργίας γενετικού αλγορίθμου [40].

Τα παραπάνω καθιστούν τους γενετικούς αλγορίθμους εξαιρετικά ευέλικτους και μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης, ακόμη και όταν ο χώρος αναζήτησης είναι μεγάλος ή πολύπλοκος. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η ικανότητά τους να αποφεύγουν την παγίδευση σε τοπικά ελάχιστα, καθώς εξερευνούν πολλαπλά σημεία στον χώρο λύσεων ταυτόχρονα, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτούν τη γνώση της παραγωγού της συνάρτησης κόστους, καθιστώντας τους ιδανικούς για μη-γραμμικά ή ασυνεχή προβλήματα. Ωστόσο, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορεί να είναι υπολογιστικά απαιτητικοί, ιδιαίτερα για προβλήματα με μεγάλους χώρους αναζήτησης ή όταν απαιτούνται πολλές γενεές για τη σύγκλιση σε μια λύση, ενώ η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή

παραμετροποίηση των τελεστών (π.χ., ποσοστό μετάλλαξης, μέγεθος πληθυσμού), κάτι που μπορεί να απαιτεί δοκιμές και πειραματισμό.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν βρει εφαρμογή σε ποικίλους τομείς, από τη βελτιστοποίηση βιομηχανικών διεργασιών μέχρι τη σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και τη μηχανική μάθηση και πιο συγκεκριμένα σε συστήματα ανίχνευσης βλαβών, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση και τη βελτιστοποίηση μοντέλων μηχανικής μάθησης, επιτρέποντας την εύρεση βέλτιστων συνόλων παραμέτρων που μεγιστοποιούν την ακρίβεια στην ανίχνευση βλαβών.

---

# 3.

## ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

---

### 3.1 Χρήση GPR και GA για εντοπισμό σφαλμάτων

#### 3.1.1 Μέθοδος GPR

Η παλινδρόμηση διαδικασίας Gauss (GPR) είναι μια δημοφιλής μη-παραμετρική μέθοδος παλινδρόμησης για την πρόβλεψη και τον υπολογισμό της αβεβαιότητας των δεδομένων. Το θεμέλιο της GPR είναι μια συνεχής Γκαουσιανή διαδικασία που χαρακτηρίζει την κατανομή των πιθανών συναρτήσεων που θα μπορούσαν να προσαρμοστούν στα δεδομένα, σε αντίθεση με άλλες τεχνικές παλινδρόμησης που απαιτούν μια προκαθορισμένη μορφή (όπως γραμμική ή πολυωνυμική). Η GPR είναι ιδανική για την αναπαράσταση μη-γραμμικών και ασαφών σχέσεων

μεταξύ μεταβλητών, επειδή επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων μοντέλων χωρίς να γίνονται συγκεκριμένες υποθέσεις σχετικά με τη μορφή της συνάρτησης.

Η ανάπτυξη μιας κατανομής πιθανοτήτων για τις τιμές εξόδου ενός μοντέλου είναι ο θεμελιώδης στόχος της GPR. Αφού εκπαιδευτεί σε δεδομένα, το μοντέλο GPR παράγει προβλέψεις για τις τιμές εξόδου μαζί με ένα επίπεδο αβεβαιότητας για κάθε πρόβλεψη. Αυτή η εκτίμηση αβεβαιότητας βοηθά στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας της πρόβλεψης και, κατά συνέπεια, στον ακριβέστερο εντοπισμό σφαλμάτων και αποκλίσεων. Σημαντικές διαφορές μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών σε εφαρμογές ανίχνευσης σφαλμάτων μπορεί να υποδεικνύουν πιθανές παρατυπίες ή λάθη στο σύστημα. Με την ανάπτυξη ενός μοντέλου που προβλέπει τυπικές τιμές εξόδου, όπως η τάση και το ρεύμα, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί κανονικά, η τεχνική GPR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση σφαλμάτων σε μετατροπείς ισχύος. Η εκπαίδευση του μοντέλου GPR με δεδομένα εξόδου από τον μετατροπέα υπό τυπικές συνθήκες λειτουργίας για την εκτίμηση του εύρους της κανονικής εξόδου είναι το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανίχνευσης σφαλμάτων. Το GPR αναπτύσσει ένα προφίλ αναφοράς των εξόδων του μετατροπέα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, καθώς προσαρμόζεται στα δεδομένα και μαθαίνει να προβλέπει το εύρος τιμών, τη μέση τιμή, και τη διακύμανση της κανονικής εξόδου. Η αναμενόμενη τιμή κάθε εξόδου και μια εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης περιλαμβάνονται σε αυτό το προφίλ.

Μετά την εκπαίδευση του μοντέλου, οι τιμές εξόδου του αντιστροφέα συγκρίνονται με τις προβλέψεις του μοντέλου GPR για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Μια πιθανή ανωμαλία ή σφάλμα υποδεικνύεται όταν οι πραγματικές τιμές διαφέρουν από το προβλεπόμενο εύρος τιμών, είναι δηλαδή μεγαλύτερες από τα όρια που δίνει το GPR. Ως αποτέλεσμα, το GPR καθιστά δυνατή την παρακολούθηση των εξόδων του μετατροπέα σε πραγματικό χρόνο και τον εντοπισμό τυχόν αλλαγών που ενδέχεται να συνδέονται με σφάλματα. Η χρήση του GPR για την ανίχνευση σφαλμάτων έχει πολλά πλεονεκτήματα, μπορώντας να διαχειριστεί μη-γραμμικές σχέσεις μεταξύ των εισόδων και των εξόδων του μετατροπέα, διευκολύνοντας την ανάλυση ακόμη και πολύπλοκων συστημάτων. Επιπλέον, το GPR προσφέρει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας για κάθε πρόβλεψη, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη στην ακρίβεια των ευρημάτων του. Τέλος, η ικανότητα της μεθόδου να εντοπίζει και να διαγιγνώσκει ζητήματα έγκαιρα επιτρέπει τη λήψη προληπτικών μέτρων, εξασφαλίζοντας τη συνεχή και ασφαλή λειτουργία του μετατροπέα ισχύος.

### 3.1.2 Μέθοδος Genetic Algorithm (GA)

Οι τεχνικές στοχαστικής βελτιστοποίησης, γνωστές ως γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ), βασίζονται στις βιολογικές έννοιες της φυσικής επιλογής και της εξέλιξης. Πρωταρχικός σκοπός τους είναι η βελτιστοποίηση παραμέτρων που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με τη χρήση παραδοσιακών αναλυτικών ή αριθμητικών τεχνικών. Σε πολύπλοκα προβλήματα με μακροχρόνιες αναζητήσεις παραμέτρων και μη-γραμμικές σχέσεις, όπου οι συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης μπορεί να μην λειτουργούν ή να χρειάζονται πολύ χρόνο για την επεξεργασία τους, οι ΓΑ λειτουργούν καλά.

Η δημιουργία και η ανάπτυξη ενός πληθυσμού πιθανών λύσεων είναι απαραίτητη για τη θεμελιώδη λειτουργία των ΓΑ. Αυτά τα «χρωμοσώματα», όπως συνήθως αποκαλούνται, αντιπροσωπεύουν πιθανές υποψήφιες λύσεις. Ο βαθμός στον οποίο κάθε λύση ανταποκρίνεται στον στόχο βελτιστοποίησης καθορίζεται με τη σύγκρισή της με μια συνάρτηση καταλληλότητας.

Η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη είναι οι τρεις κύριες διαδικασίες στην εξέλιξη του πληθυσμού. Προκειμένου ο πληθυσμός να εξελιχθεί και να βελτιστοποιηθεί με την πάροδο του χρόνου, οι διαδικασίες αυτές μιμούνται τις διαδικασίες του γενετικού ανασυνδυασμού και της φυσικής επιλογής:

- **Επιλογή:** Οι λύσεις με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας επιλέγονται για αναπαραγωγή σε αυτό το βήμα. Η επιλογή γίνεται συχνά με τη χρήση επιλογής τύπου ‘τουρνουά’ η οποία βασίζεται στην επιλογή  $k$  τυχαίων ατόμων από τον πληθυσμό και την επιλογή της λύσης με την καλύτερη επίδοση, ή επιλογής τύπου ‘ρουλέτας’, η οποία βασίζεται στην πιθανότητα αναπαραγωγής των λύσεων με τις καλύτερες επιδόσεις. Η πιθανότητα βελτίωσης του πληθυσμού αυξάνεται επειδή οι καλύτερες λύσεις είναι πιο πιθανό να μεταφέρουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά.
- **Διασταύρωση:** Στη διασταύρωση, μία ή περισσότερες νέες λύσεις (απόγονοι) δημιουργούνται από το συνδυασμό δύο επιλεγμένων λύσεων (γονείς). Προκειμένου να αναπτυχθούν νέες λύσεις που διατηρούν τα θετικά χαρακτηριστικά των γονέων, η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη μεταβίβαση των χαρακτηριστικών των γονέων στα παιδιά. Η πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η διασταύρωση ενός σημείου, κατά την οποία ένας νέος απόγονος παράγεται με τυχαία διασταύρωση των χαρακτηριστικών των γονέων. Προκειμένου να βρεθούν νέοι συνδυασμοί τιμών που ενδέχεται να παράγουν καλύτερες λύσεις, η διασταύρωση είναι απαραίτητη.

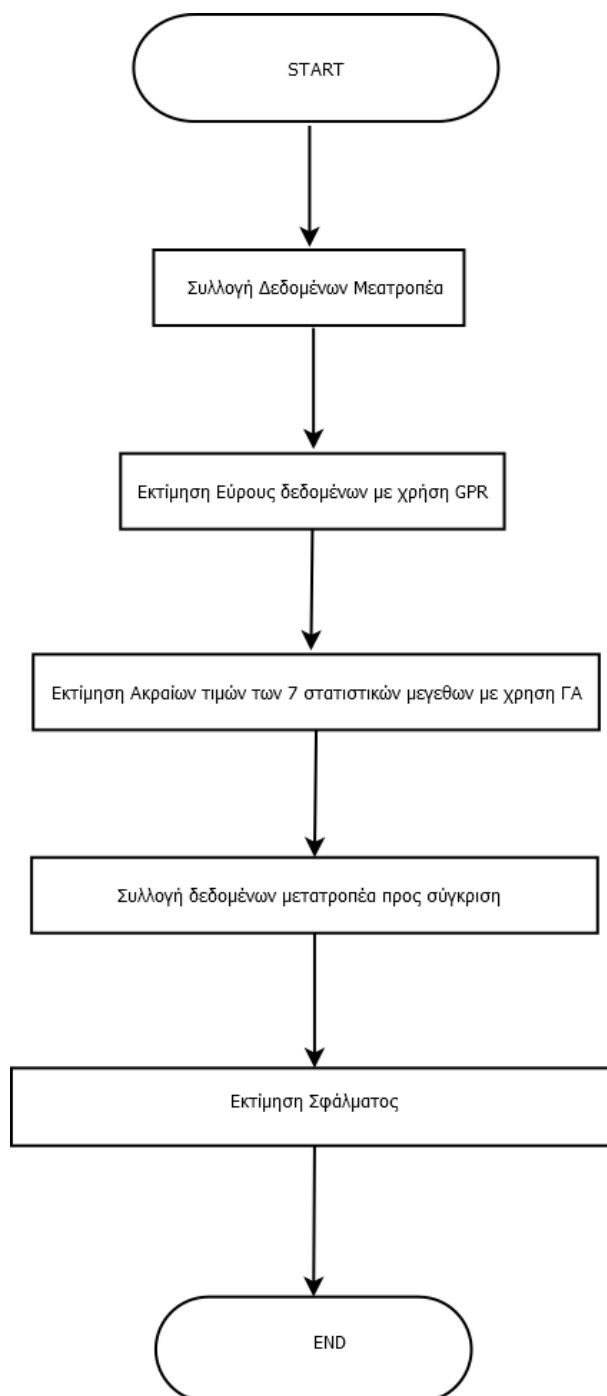
- **Μετάλλαξη:** Για να προστεθεί ποικιλομορφία στον πληθυσμό, η μετάλλαξη εφαρμόζεται σε περιορισμένο αριθμό απογόνων. Η μετάλλαξη προκαλεί τυχαίες τροποποιήσεις σε συγκεκριμένες τιμές της αναπαράστασης της λύσης. Αυτό το στάδιο εγγυάται την εξερεύνηση διαφόρων περιοχών του χώρου αναζήτησης και εμποδίζει τον αλγόριθμο να συγκλίνει πολύ σύντομα σε τοπικά ελάχιστα. Όταν ο πληθυσμός έχει κολλήσει σε συγκεκριμένες λύσεις με μικρή έως καθόλου βελτίωση, η μετάλλαξη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.

Ο γενετικός αλγόριθμος επιτρέπει στον πληθυσμό να εξελίσσεται με τρόπο που να παράγει ολοένα και καλύτερες λύσεις επαναλαμβάνοντας αυτά τα βήματα. Ενώ η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη τροποποιούν συνεχώς τον πληθυσμό για την εξαγωγή της βέλτιστης λύσης, κατά τη διάρκεια διαδοχικών γενεών ο πληθυσμός εξελίσσεται και οι υποψήφιες λύσεις συγκλίνουν σταδιακά προς τις ιδανικές παραμέτρους που οδηγούν στη βέλτιστη λύση του προβλήματος.

### **Εφαρμογή του GA στη Βελτιστοποίηση Στατιστικών Παραμέτρων για Ανίχνευση Σφαλμάτων**

Οι στατιστικές ιδιότητες ενός συστήματος, όπως ένας μετατροπέας ισχύος, μπορούν να βελτιστοποιηθούν με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) για την παραγωγή ενός τυπικού προφίλ λειτουργίας. Επτά χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη το εύρος (range), η μέση τιμή (mean), η τυπική απόκλιση (std), η ασυμμετρία (skewness), η κυρτότητα (kurtosis), η εντροπία (entropy) και το κέντρο βάρους (centroid) περιλαμβάνονται σε αυτό το προφίλ για να χαρακτηρίσουν τη συμπεριφορά του συστήματος υπό τυπικές συνθήκες. Ένα πρότυπο αναφοράς για τον εντοπισμό αποκλίσεων και σφαλμάτων δημιουργείται με τη χρήση ΓΑ. Ο εντοπισμός των ακραίων τιμών των παραπάνω επτά στατιστικών μεγεθών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό σφαλμάτων, καθώς εάν κάποιο από αυτά τα χαρακτηριστικά μεγέθη (που υπολογίζονται, με είσοδο για παράδειγμα τις τιμές της εξόδου τάσης κάποιου μετατροπέα) παρεκκλίνει από τις ακραίες τιμές υπάρχει ένδειξη σφάλματος στον συγκεκριμένο μετατροπέα. Έτσι, ο ΓΑ χρησιμεύει ως βάση για την ανίχνευση σφαλμάτων και προσφέρει ένα ευέλικτο μέσο για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών που περιγράφουν την τυπική λειτουργία του συστήματος.

Η χρήση της GPR και ΓΑ μεθοδολογίας για την ανεύρεση σφαλμάτων παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.1.



Σχήμα 3-1. Διαδικασία εύρεσης σφαλμάτων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος με χρήση τεχνητής νοημοσύνης.

# 4.

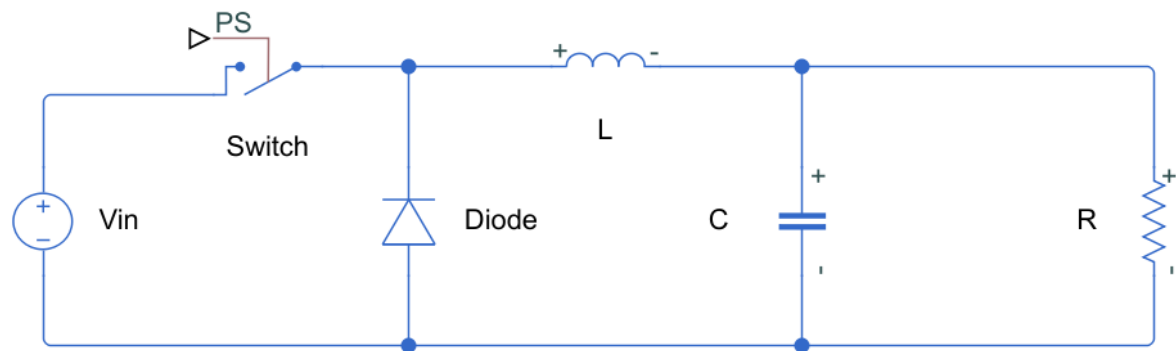
## ΕΦΑΡΜΟΓΗ GPR ΚΑΙ GA ΣΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ

---

### 4.1 Μετατροπές Ισχύος Υποβιβασμού Τάσης

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2, σημαντικό ρόλο στη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος διαδραματίζουν οι μετατροπές ισχύος. Η ραγδαία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γέννησε την ανάγκη για νέες εφαρμογές με στόχο την βέλτιστη απόδοση των συστημάτων. Οι μετατροπές ισχύος υποβιβασμού τάσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην τροφοδότηση φορτίων και την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Βάσει αυτών, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε ένας μετατροπές ισχύος υποβιβασμού τάσης (Buck Converter) για την ανεύρεση βλαβών με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία ενός τέτοιου μετατροπέα ισχύος ο οποίος αποτελείται από ένα διακόπτη (switch) , ένα πηνίο  $L$  που αποθηκεύει ενέργεια όταν ο διακόπτης είναι κλειστός και την απελευθερώνει όταν είναι ανοιχτός, έναν πυκνωτή  $C$  που λειτουργεί ως φίλτρο εξομάλυνσης, μειώνοντας τον κυματισμό τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.





Σχήμα 4-1. Τοπολογία μετατροπέα ισχύος υποβιβασμού τάσης.

Επιπλέον στοιχεία στη συνδεσμολογία είναι μια πηγή σταθερής τάσης που παρέχει μια σταθερή τάση, μια δίοδος που επιτρέπει το ρεύμα να συνεχίζει να ρέει όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός και τέλος το φορτίο (R) που το κύκλωμα τροφοδοτεί με σταθερή μειωμένη τάση.

Ο μετατροπέας είναι συνδεδεμένος με μια εξωτερική γεννήτρια τετραγωνικών σημάτων με περίοδο T και πλάτος παλμού Pulse Width. Από τα παραπάνω με τη βοήθεια της σχέσης (4.1) υπολογίζεται το Duty Cycle (D):

$$D = \frac{\text{Pulse Width}}{T} \quad (4.1)$$

όπου:

D το Duty Cycle το οποίο εκφράζει το ποσοστό της περιόδου T που το τετραγωνικό σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη,

Pulse Width: η χρονική διάρκεια που το τετραγωνικό σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη και

T η περίοδος του τετραγωνικού σήματος.

Ανάλογα με την κατάσταση του διακόπτη, ο παραπάνω μετατροπέας διαθέτει δύο φάσεις λειτουργίας:

**• Φάση λειτουργίας 1: διακόπτης κλειστός**

Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα ρέει από την πηγή μέσω του πηνίου  $L$  και του φορτίου  $R$ . Το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια αυξάνοντας το μαγνητικό του πεδίο. Η τάση στην έξοδο εξαρτάται από το duty cycle  $D$  και περιγράφεται με τη σχέση (4.2):

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (4.2)$$

όπου:

$D$  είναι το ποσοστό του χρόνου που ο διακόπτης παραμένει κλειστός,

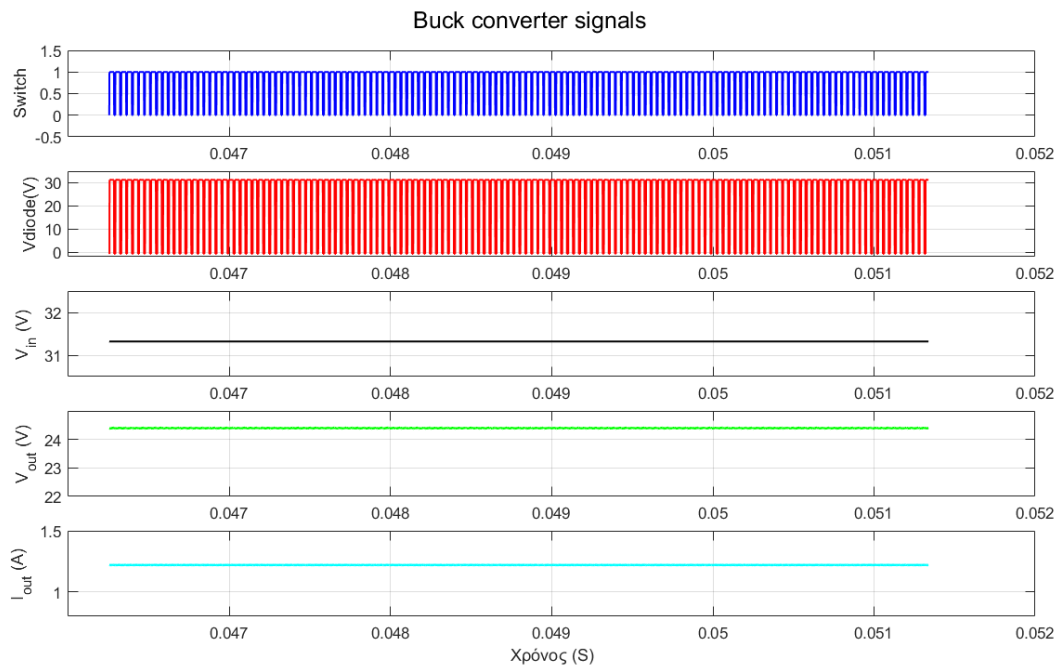
$V_{out}$  η τάση εξόδου και

$V_{in}$  η τάση εισόδου.

**• Φάση λειτουργίας 2: διακόπτης ανοικτός**

Όταν ο διακόπτης ανοίγει, το πηνίο συνεχίζει να παρέχει ρεύμα στο φορτίο μέσω της διόδου. Το ρεύμα στο πηνίο μειώνεται καθώς η ενέργεια που είχε αποθηκευτεί μεταφέρεται στο φορτίο. Ο πυκνωτής  $C$  συμβάλλει στη μείωση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου κατά τη διάρκεια αυτών των δύο φάσεων λειτουργίας του μετατροπέα.

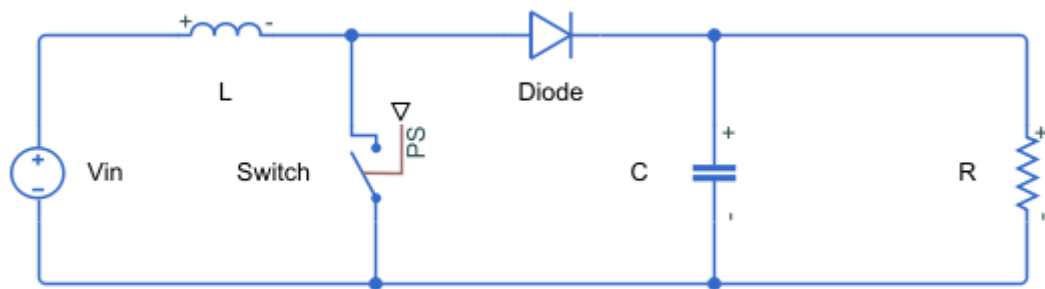
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το σήμα ελέγχου διακόπτη, η τάση στη διόδο, το ρεύμα εξόδου και η τάση εξόδου σε σχέση με τον χρόνο  $t$  κατά τη λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα 4-2. Σήμα διακόπτη, τάση διόδου, τάση εισόδου, ρεύμα εξόδου και τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος υποβιβασμού τάσης.

## 4.2 Μετατροπέας Ισχύος Ανύψωσης Τάσης

Αντίστοιχα με τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, σημαντικό ρόλο στην παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων διαδραματίζουν και οι μετατροπείς ισχύος ανύψωσης τάσης. Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι μετατροπείς ισχύος ανύψωσης τάσης λειτουργούν βοηθητικά σε μια συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών συστημάτων όταν απαιτείται μεγαλύτερη τάση από την παραγόμενη για την τροφοδότηση κάποιων φορτίων ή την αποθήκευση ενέργειας. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Η συνδεσμολογία περιέχει ένα διακόπτη, το πηνίο  $L$  που αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή μαγνητικού πεδίου όταν ο διακόπτης είναι κλειστός και την απελευθερώνει όταν είναι ανοικτός και τον πυκνωτή  $C$  που λειτουργεί ως φίλτρο εξομάλυνσης, μειώνοντας τον κυματισμό της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 4-3. Τοπολογία μετατροπέα ισχύος ανύψωσης τάσης.

Επιπλέον στοιχεία στη συνδεσμολογία είναι μια πηγή σταθερής τάσης που παρέχει μια σταθερή τάση, μια δίοδος που επιτρέπει το ρεύμα να συνεχίζει να ρέει όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός και τέλος το φορτίο (R) που το κύκλωμα τροφοδοτεί με σταθερή αυξημένη τάση.

Ο μετατροπέας είναι συνδεδεμένος με μια εξωτερική γεννήτρια τετραγωνικών σημάτων με περίοδο T και διάρκεια παλμού Pulse width. Από τα παραπάνω με τη βοήθεια της σχέσης (4.1) υπολογίζεται το Duty Cycle (D).

Το κύκλωμα του Σχήματος 4.5 λειτουργεί σύμφωνα με τη συμπεριφορά του διακόπτη και διαθέτει δύο φάσεις λειτουργίας:

#### • Φάση λειτουργίας 1: διακόπτης κλειστός

Το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια υπό τη μορφή μαγνητικού πεδίου, καθώς διαρρέεται από ρεύμα που προέρχεται από την πηγή  $V_{in}$ . Η δίοδος είναι αντίστροφα πολωμένη και το φορτίο τροφοδοτείται από τον πυκνωτή. Η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση (4.3):

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (4.3)$$

όπου:

D είναι το ποσοστό του χρόνου που ο διακόπτης είναι κλειστός,

$V_{out}$  η τάση εξόδου και

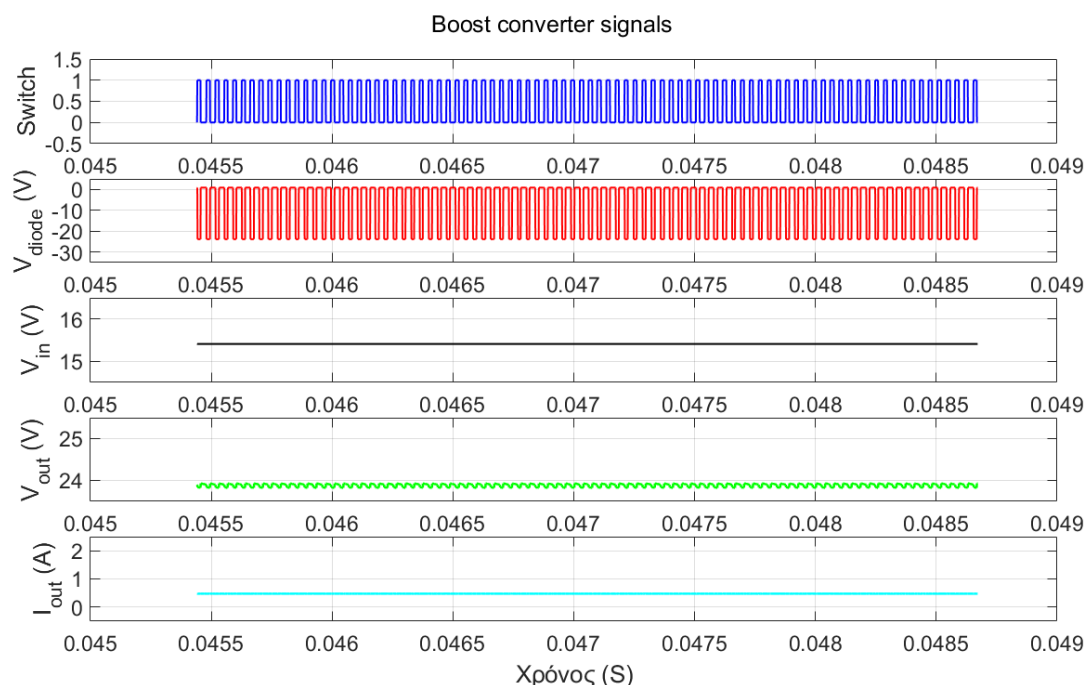
$V_{in}$  η τάση εισόδου.

### • Φάση λειτουργίας 2: διακόπτης ανοικτός

Το πηνίο συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα και προοδευτικά εκφορτίζεται. Η διόδος D πολώνεται ορθά και επιτρέπει τη ροή του ρεύματος προς τον πυκνωτή C και το φορτίο R.

Ο πυκνωτής C συμβάλλει στη μείωση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου κατά τη διάρκεια αυτών των δύο φάσεων λειτουργίας του μετατροπέα.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το σήμα ελέγχου διακόπτη, η τάση στη διόδο, το ρεύμα εξόδου και η τάση εξόδου σε σχέση με τον χρόνο  $t$  κατά τη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

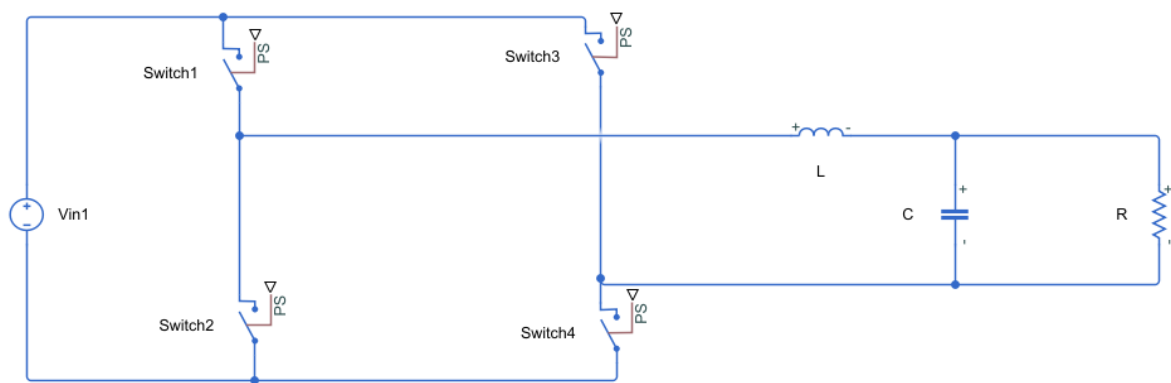


Σχήμα 4-4. Σήμα διακόπτη, τάση διόδου, τάση εισόδου, ρεύμα εξόδου και τάση εξόδου του μετατροπέα ισχύος ανύψωσης τάσης.

### 4.3 Αντιστροφείας Ισχύος

Ένα εξίσου σημαντικό δομικό στοιχείο μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος είναι οι αντιστροφείς ισχύος. Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2 η χρήση τους σε ένα σύστημα όπως το παραπάνω κρίνεται απαραίτητη καθώς μετατρέπουν την σταθερή (DC) τάση που παράγεται

από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε εναλλασσόμενη (AC) τάση ώστε να είναι συμβατή με το δίκτυο και τις ηλεκτρικές συσκευές καθημερινής χρήσης. Με βάση τα παραπάνω, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιείται ένας αντιστροφής ισχύος πλήρους γέφυρας (Full-Bridge Inverter). Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του παραπάνω αντιστροφέα ισχύος. Το κύκλωμα αποτελείται από 4 διακόπτες λειτουργούν σε εναλλασσόμενα ζεύγη (Switch1 και Switch4 ή Switch2 και Switch3) δημιουργώντας έτσι μία παλμοσειρά εναλλασσόμενης τάσης. Η υλοποίηση του διακόπτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορα ηλεκτρικά στοιχεία ανάλογα με τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται στη λειτουργία ενός αντιστροφέα. Το πηνίο L και ο πυκνωτής C λειτουργούν ως βαθυπερατό φίλτρο στην τάση εξόδου απαλείφοντας τις υψηλές αρμονικές. Η τάση  $V_{in}$  παρέχει σταθερή τάση εισόδου στον αντιστροφέα. Το φορτίο R παίζει το ρόλο κάποιας ηλεκτρικής συσκευής που καταναλώνει ενέργεια.



Σχήμα 4-5. Τοπολογία αντιστροφέα ισχύος πλήρους γέφυρας.

Το κύκλωμα του Σχήματος (4.5) λειτουργεί σύμφωνα με τις εναλλαγές των διακοπών και διαθέτει δύο φάσεις λειτουργίας:

- **Φάση λειτουργίας 1: (Switch1 και Switch4 ON, Switch2 και Switch3 OFF).**

Η τάση εξόδου παράγεται από τους διακόπτες Switch1 και Switch4 και δίνεται από τη σχέση (4.4):

$$V_{out} = V_{in} \quad (4.4)$$

όπου:

$V_{out}$  η τάση εξόδου και

$V_{in}$  η τάση εισόδου.

• **Φάση λειτουργίας 2: (Switch1 και Switch4 OFF, Switch2 και Switch3 ON).**

Η τάση εξόδου παράγεται από τους διακόπτες Switch2 και Switch3 και δίνεται από τη σχέση (4.5):

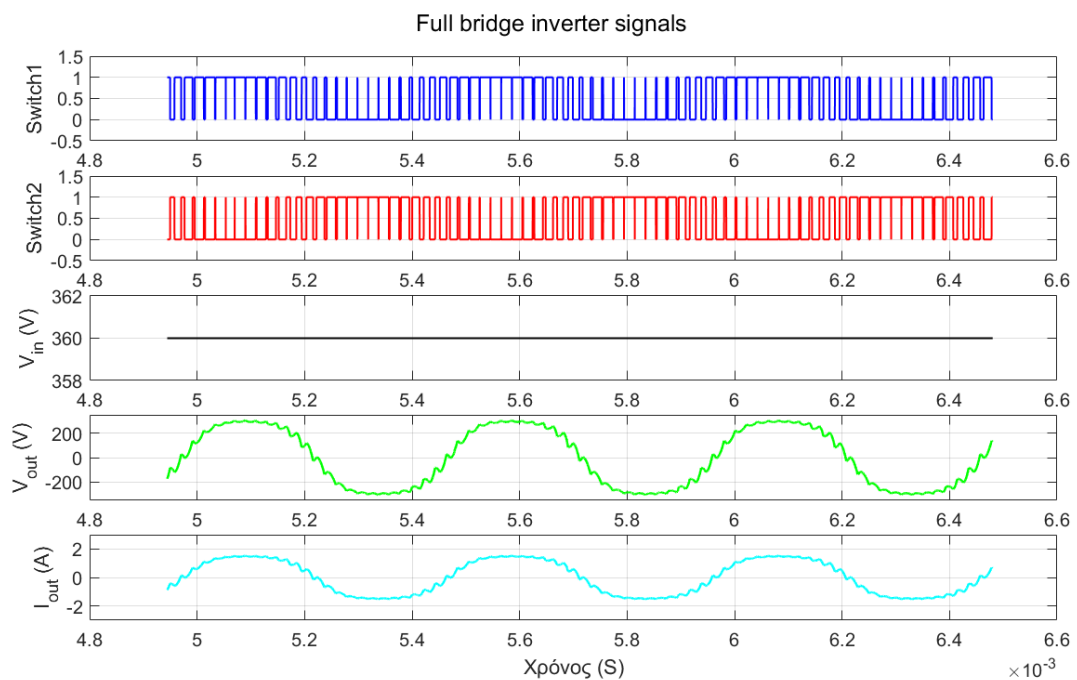
$$V_{out} = -V_{in} \quad (4.5)$$

όπου:

$V_{out}$  η τάση εξόδου και

$V_{in}$  η τάση εισόδου.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η λειτουργία των ζευγών διακοπών του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, η τάση εξόδου κατά τη λειτουργία του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου.



Σχήμα 4-6. Σήμα διακόπτη 1, σήμα διακόπτη 2, τάση εισόδου ρεύμα εξόδου και τάση εξόδου αντιστροφέα ισχύος πλήρους γέφυρας.

#### 4.4 Εύρεση εύρους κανονικών δεδομένων με GPR

Η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος και ο εντοπισμός τυχόν σφαλμάτων λειτουργίας απαιτεί τη σύγκριση των παρατηρούμενων τιμών του μετατροπέα ισχύος με τις προβλέψεις που γίνονται με την μέθοδο GPR. Προκειμένου να εντοπιστούν ενδείξεις σφαλμάτων λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος, η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στον εντοπισμό των διαφορών μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και των προβλεπόμενων τιμών της GPR. Τα ακόλουθα βήματα αποτελούν μέρος της διαδικασίας:

- **Πρόβλεψη GPR:** υπό τυπικές συνθήκες λειτουργίας, το GPR χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της τάσης και του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα ισχύος. Το GPR χρησιμοποιεί τα δεδομένα εκπαίδευσης για να μάθει πώς οι είσοδοι και οι αναμενόμενες έξοδοι του συστήματος σχετίζονται μεταξύ τους, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες του συστήματος, όπως μεταβολές στην τάση εισόδου λόγω θορύβου, ανοχές εξαρτημάτων και απώλειες ισχύος του συστήματος .
- **Σύγκριση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών:** για την ίδια χρονική περίοδο και το ίδιο σύνολο συνθηκών, οι προβλέψεις του GPR αντιπαραβάλλονται με τις πραγματικές τιμές εξόδου του μετατροπέα ισχύος (όπως η μετρούμενη τάση και το ρεύμα). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σύγκριση σε πραγματικό χρόνο, είτε στατιστική ανάλυση συνόλων δεδομένων.
- **Υπολογισμός απόκλισης:** η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών υπολογίζεται για κάθε παρατηρούμενη τιμή. Για τον υπολογισμό αυτής της απόκλισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η διαφορά, είτε το ποσοστό της διαφοράς (απόλυτο ή σχετικό σφάλμα). Ο υπολογισμός της απόκλισης αποδίδει μια αριθμητική αξιολόγηση της ακρίβειας της πρόβλεψης GPR.
- **Καθορισμός ορίων αποδοχής:** ο περιορισμός της αποδεκτής απόκλισης είναι ζωτικής σημασίας για την ανίχνευση σφαλμάτων. Συνήθως, για τον καθορισμό αυτών των ορίων χρησιμοποιούνται οι τεχνικές προδιαγραφές του μετατροπέα ή μια ανάλυση των προηγούμενων επιδόσεων του συστήματος. Θεωρείται ένδειξη πιθανής ανωμαλίας ή σφάλματος εάν η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης τιμής είναι μεγαλύτερη από αυτά τα όρια.
- **Προσδιορισμός σφαλμάτων:** αποκλίσεις που είναι σημαντικές και υπερβαίνουν τα προκαθορισμένα όρια υποδηλώνουν την ύπαρξη σφαλμάτων στη λειτουργία του μετατροπέα



ισχύος. Τα προβλήματα αυτά θα μπορούσαν να προκληθούν από διάφορες αιτίες, όπως βλάβη εξαρτημάτων, ανωμαλίες στην παροχή ρεύματος ή άλλες διαταραχές στη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος. Εκτός από τη χρήση πρόσθετων τεχνικών, όπως ο γενετικός αλγόριθμος (GA) για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων και τον αποτελεσματικότερο εντοπισμό των ανωμαλιών, η ανάλυση αποκλίσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ακριβή εντοπισμό των βλαβών.

Η εκπαίδευση του μοντέλου GPR πραγματοποιείται μέσω των ακόλουθων βημάτων:

- Τα δεδομένα (χρόνος και τάση) φορτώνονται από το εργαλείο Simulink. Χρησιμοποιούνται ως είσοδος (χρόνος) και έξοδος (τάση) για την εκπαίδευση.
- Με χρήση της συνάρτησης `fitrgp`, δημιουργείται το μοντέλο παλινδρόμησης, βασισμένο σε μια custom συνάρτηση πυρήνα (`customKernel`). Η συνάρτηση πυρήνα που χρησιμοποιείται είναι το άθροισμα της περιοδικής συνάρτησης (`periodic covariance function`) συνδιακύμανσης που δίνεται από τη σχέση (4.2) και της τετραγωνικής εκθετικής συνάρτησης συνδιακύμανσης (`square exponential covariance function`) που δίνεται από τη σχέση (4.3):

$$k_{PER}(t, t') = \frac{\sigma_1^2 \exp\left[\frac{2}{l_1^2} \sin^2(\pi(t-t'))\right]}{P} \quad (4.2)$$

όπου:

$\sigma_1^2$  παράμετρος που ρυθμίζει την ισχύ της συνάρτησης,

$l_1$  παράμετρος που ρυθμίζει το εύρος της λειτουργίας της απόστασης και  $P$  η περίοδος της συνάρτησης.

Η τετραγωνική συνάρτηση συνδιακύμανσης (`square exponential covariance function`) δίνεται από τη σχέση:

$$k_{SE}(t, t') = \sigma_2^2 \exp\left[-\frac{(t-t')^2}{2l_2^2}\right] \quad (4.3)$$

όπου:

$\sigma_2^2$  παράμετρος που ρυθμίζει την ισχύ της συνάρτησης και

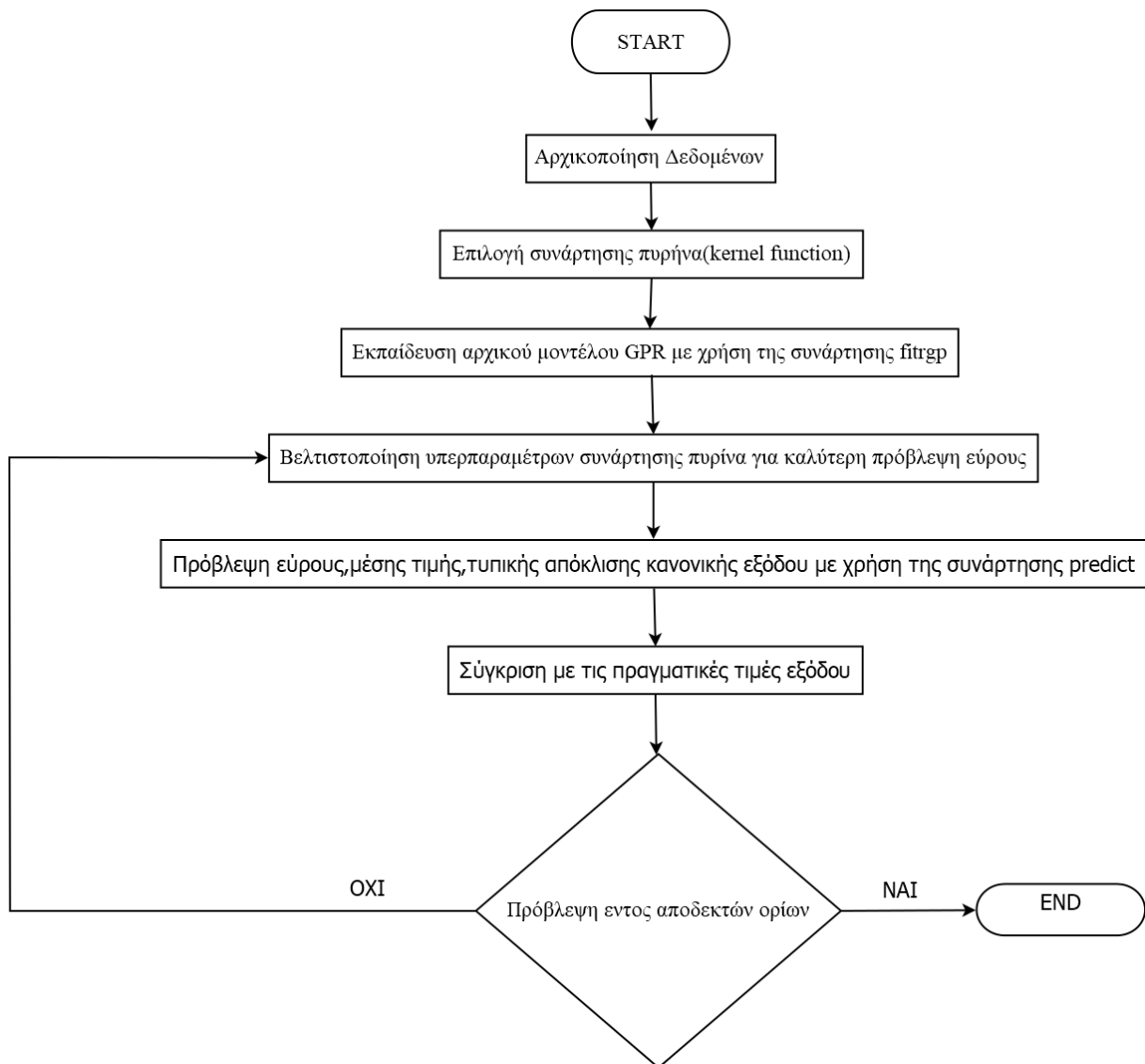
$l_2$  παράμετρος που ρυθμίζει το εύρος της επίδρασης.

Με βάση τα παραπάνω, η τελική συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως συνάρτηση πυρήνα δίνεται από τη σχέση (4.4):

$$k_C = k_{PER}(t, t') + k_{SE}(t, t') = \frac{\sigma_1^2 \exp\left[\frac{2}{l_1^2} \sin^2(\pi(t-t'))\right]}{P} + \sigma_2^2 \exp\left[-\frac{(t-t')^2}{2l_2^2}\right] \quad (4.4)$$

- Συνεχίζοντας ο αλγόριθμος εκτιμά αυτόματα τις υπερπαραμέτρους που περιγράφονται στις σχέσεις (4.2) και (4.3) έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί το μοντέλο GRP.
- Τέλος, ο αλγόριθμος προβλέπει τη μέση τιμή, τη διακύμανση και το εύρος τιμών της εξόδου του μετατροπέα ισχύος.

Στο Σχήμα 4.7 περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση του αλγορίθμου GPR:



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα ροής για την υλοποίηση του αλγορίθμου GPR.

#### 4.5 Εφαρμογή GA για βελτιστοποίηση σε μετατροπείς ισχύος

Η διαδικασία εκτίμησης των ακραίων τιμών περιλαμβάνει την ανάλυση πολλών φυσιολογικών εξόδων, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα, τον χρόνο μοντελοποίησης και την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Παράλληλα, οι ακραίες τιμές χρησιμοποιούνται ως δείκτες ανίχνευσης, οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια ανίχνευσης σφαλμάτων λειτουργίας. Για να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού και να επιτευχθούν πιο ακριβείς ακραίες τιμές, χρησιμοποιούνται οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ), οι οποίοι προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με τη μέθοδο της τυχαίας δειγματοληψίας. Τα στατιστικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται είναι: το εύρος ( $r$ ), η μέση τιμή ( $m$ ), η τυπική απόκλιση ( $u$ ), η ασυμμετρία (skewness), η κυρτότητα (kurtosis), η εντροπία (entropy) και το κέντρο βάρους (centroid), αντίστοιχα.

Η τιμή του εύρους  $R$  υπολογίζεται ως εξής:

$$r = x_{\max} - x_{\min} \quad (4.5)$$

όπου:

$x_{\max}$  η μέγιστη τιμή των δεδομένων εξόδου και

$x_{\min}$  είναι η ελάχιστη τιμή των δεδομένων εξόδου του μετατροπέα.

Η μέση τιμή υπολογίζεται ως εξής:

$$m = E(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.6)$$

όπου:

$n$  ο αριθμός των δεδομένων εξόδου και

$x$  τα δεδομένα εξόδου.

Η τιμή της τυπικής απόκλισης υπολογίζεται ως εξής:

$$u = \sqrt{E(x - m)^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot [E(x)]^2 \right)} \quad (4.7)$$

όπου:

$m$  η μέση τιμή,

x τα δεδομένα εξόδου,

n ο αριθμός των δεδομένων εξόδου και

$E[X]$  η μέση τιμή των δεδομένων εξόδου.

Η τιμή της ασυμμετρίας υπολογίζεται ως εξής:

$$s = E \left[ \left( \frac{x - m}{u} \right)^3 \right] \quad (4.8)$$

όπου:

x τα δεδομένα εξόδου,

m η μέση τιμή και

u η τυπική απόκλιση,

Η τιμή της κυρτότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$k = \frac{E\{x^4\}}{[E\{x^2\}]^2} = n \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i^4}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)^2} \quad (4.9)$$

όπου:

n το μέγεθος των δεδομένων εξόδου και

$E[X]$  η μέση τιμή των δεδομένων εξόδου.

Η τιμή της εντροπίας υπολογίζεται ως εξής:

$$e \approx k_1 \left( E\{G^1(x)\} \right)^2 + k_2 \left( E\{G^2(x)\} - \sqrt{1/2} \right)^2 \quad (4.10)$$

όπου:

x τα δεδομένα εξόδου και

$$k_1 = \frac{36}{8\sqrt{3} - 9}$$

$$k_2 = \frac{24}{16\sqrt{3} - 27}$$

$$G^1(x) = x \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right)$$

Η τιμή του κέντρου βάρους υπολογίζεται ως εξής:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n n \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (4.11)$$

όπου:

x τα δεδομένα εξόδου και

n ο αριθμός των δεδομένων εξόδου.

Οι παραπάνω σχέσεις υπολογίζονται για την τάση εξόδου κάθε μετατροπέα – αντιστροφέα για 500 συνεχόμενες χρονικές στιγμές.

Η διαδικασία για την εύρεση ακραίων τιμών με τη χρήση ΓΑ απαιτεί συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά, ορίζεται η κωδικοποίηση των δεδομένων εξόδου σε δυαδική μορφή. Κάθε κανονική έξοδος του μετατροπέα θεωρείται γονίδιο ενός ατόμου, με τον αριθμό των κανονικών εξόδων να συμβολίζεται ως N και τον αριθμό των σημείων δειγματοληψίας ως m. Η κωδικοποίηση καθορίζεται από τον αριθμό n, ο οποίος αντιπροσωπεύει τον μικρότερο θετικό ακέραιο για τον οποίο ισχύει  $2^n > N$ . Κάθε μήτρα δυαδικού κώδικα  $n \times m$  αναπαριστά μια κανονική έξοδο. Η δυαδική κωδικοποίηση των δεδομένων για έναν μετατροπέα ισχύος εφαρμόζεται ως εξής: κάθε έξοδος τάσης για 500 χρονικές στιγμές του μετατροπέα αντιστοιχεί σε μια θέση δυαδικής μορφής για τον γενετικό αλγόριθμο. Αφού  $N = 500$  εύκολα υπολογίζεται ότι  $n = 9\text{bits}$ . Εφόσον για κάθε χρονική στιγμή ο μετατροπέας έχει μια μοναδική έξοδο τάσης προκύπτει ότι  $m=1$ . Στη συνέχεια, ορίζεται η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function), η οποία αξιολογεί την καταλληλότητα κάθε ατόμου σε κάθε γενιά. Η σχέση (4.12) περιγράφει την συνάρτηση καταλληλότητας που βασίζεται στην εκθετική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση τους φυσικούς αριθμούς. Άτομα με υψηλότερη καταλληλότητα επιλέγονται στοχαστικά από τον πληθυσμό, ώστε να συμμετέχουν στην επόμενη γενιά. Ακολουθεί ο σχεδιασμός των γενετικών τελεστών. Η επιλογή των ατόμων γίνεται με μέθοδο αναλογικής κατανομής, γνωστή και ως ρουλέτα επιλογής (roulette wheel selection). Ο τελεστής διασταύρωσης που χρησιμοποιείται είναι η διασταύρωση ενός σημείου (simple point crossover), ενώ ο τελεστής μετάλλαξης εφαρμόζει απλή μετάλλαξη (simple mutation). Τέλος, η επιλογή των ακραίων τιμών για τα επτά στατιστικά χαρακτηριστικά βασίζεται στη διαδικασία ΓΑ που ενσωματώνει όλα τα παραπάνω στάδια. Συγκεκριμένα, ο ΓΑ εφαρμόζεται πάνω στα δεδομένα εξόδου τάσης του μετατροπέα ισχύος, με στόχο τον εντοπισμό των χρονικών περιοχών όπου καταγράφονται οι ακραίες τιμές (μέγιστες και ελάχιστες) για κάθε χαρακτηριστικό.

Κάθε άτομο του πληθυσμού του αλγορίθμου αναπαρίσταται μέσω δυαδικής κωδικοποίησης και αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο χρονικό υποσύνολο της εξόδου. Σε κάθε υποσύνολο εφαρμόζεται εξαγωγή επτά βασικών στατιστικών παραμέτρων: εύρος (range), μέση τιμή (mean), τυπική απόκλιση (standard deviation), ασυμμετρία (skewness), κυρτότητα (kurtosis), εντροπία (entropy) και κέντρο βάρους (centroid). Η καταλληλότητα κάθε ατόμου αξιολογείται μέσω συνάρτησης κόστους, η οποία συναρτάται από τις τιμές αυτών των χαρακτηριστικών.

Κατά τη διάρκεια των επαναληπτικών γενεών του ΓΑ, το σύστημα καταγράφει τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές που παρατηρούνται για κάθε χαρακτηριστικό. Οι τιμές αυτές αποτελούν το ακραίο όριο φυσιολογικής λειτουργίας του μετατροπέα και χρησιμοποιούνται ως κατώφλια σύγκρισης, για την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων.

Με αυτή τη μέθοδο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια και αποδοτικότητα στον υπολογισμό των ακραίων τιμών. Η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$f(x) = e^{(r+m+v+s+k+e+c)} \quad (4.12)$$

όπου:

r το εύρος της τάσης εξόδου του μετατροπέα,

m η μέση τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα,

v η τυπική απόκλιση της τάσης εξόδου του μετατροπέα,

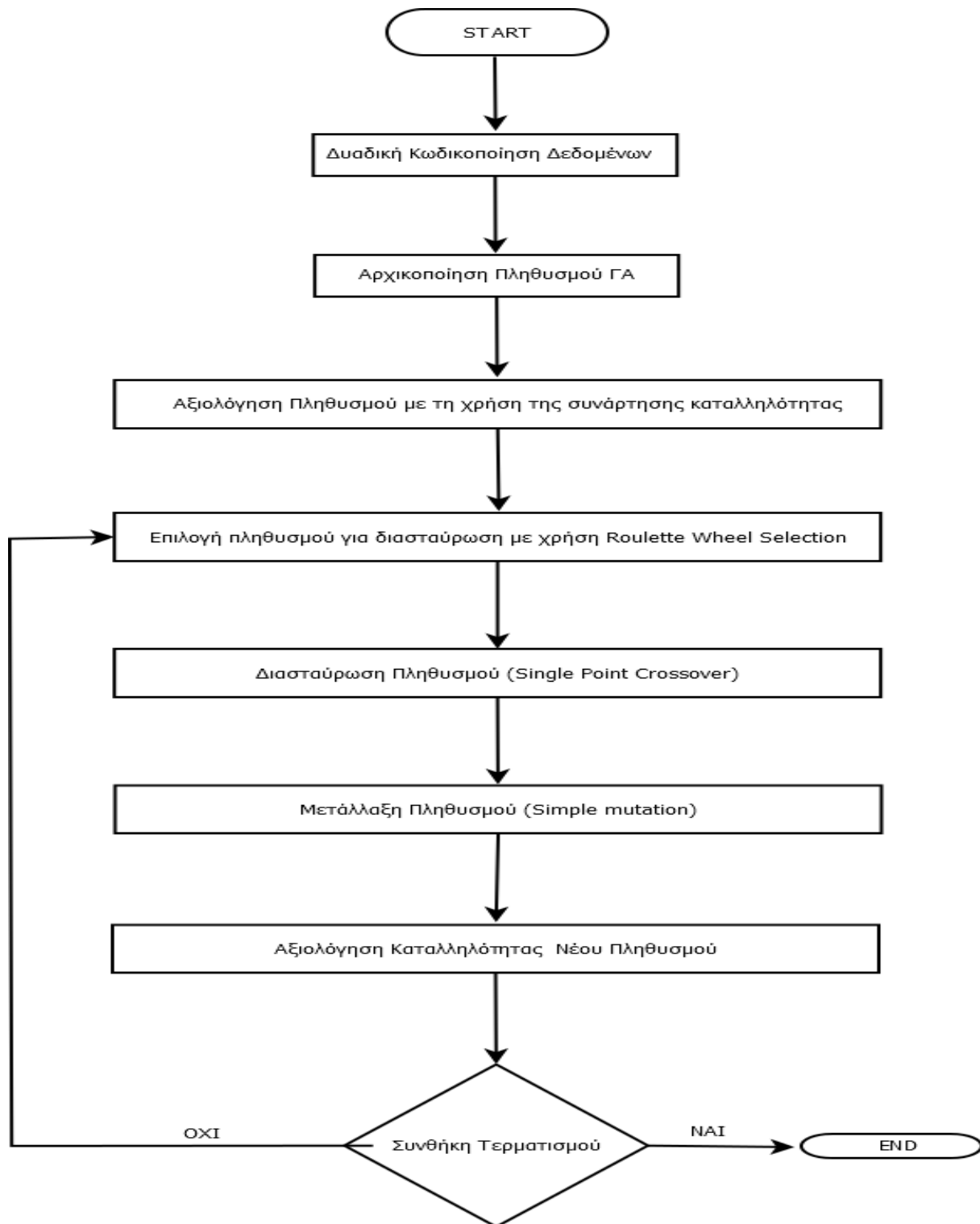
s η ασυμμετρία της τάσης εξόδου του μετατροπέα,

k η κυρτότητα της τάσης εξόδου του μετατροπέα,

e η εντροπία της τάσης εξόδου του μετατροπέα και

c το κέντρο βάρους της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Η διαδικασία ανεύρεσης βλαβών του μετατροπέα ισχύος ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των 7 στατιστικών μεγεθών για την έξοδο του μετατροπέα και τη σύγκρισή τους με τις ακραίες τιμές. Αν οποιαδήποτε τιμή κάποιου από τα στατιστικά μεγέθη είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ακραία τιμή ή μικρότερη από την ελάχιστη τιμή των ακραίων τιμών, αυτό προσδιορίζει την ύπαρξη σφάλματος στη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος. Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.8 περιγράφονται τα βήματα της υλοποίησης του ΓΑ.



Σχήμα 4.8. Διάγραμμα ροής για την υλοποίηση του Γενετικού Αλγορίθμου.

# 5.

## ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

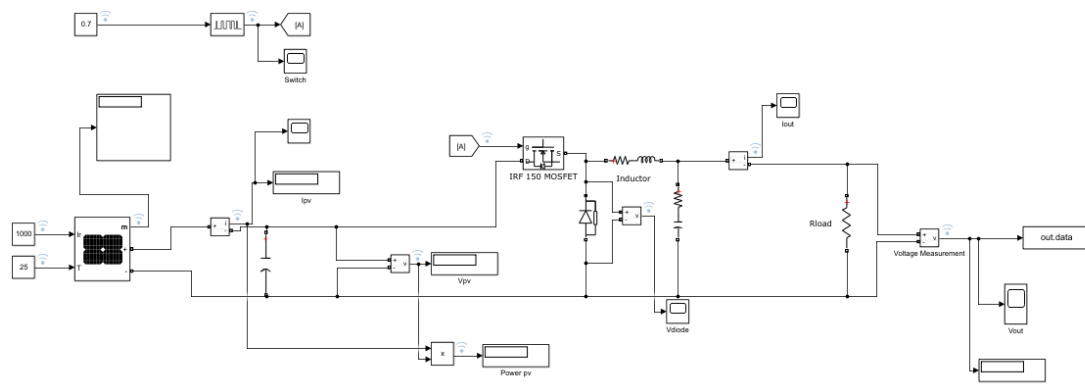
---

### 5.1 Μετατροπéας DC-DC υποβιβασμού τάσης

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο εντοπισμός βλαβών ενός μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού τάσης (Buck converter), συνδεδεμένου με μια γεννήτρια σημάτων PWM και έχει ως είσοδο μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Για τη μοντελοποίηση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης χρησιμοποιείται το εργαλείο Simulink/Matlab.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η σχεδίαση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με ένα IRF 150 Mosfet transistor που λειτουργεί ως διακόπτης και ρυθμίζει σε ποιο ποσοστό μιας περιόδου  $T$  το κύκλωμα βρίσκεται στη φάση λειτουργίας 1 και σε ποιο ποσοστό στη φάση λειτουργίας 2, όπως αυτές περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.





Σχήμα 5-1 Μοντελοποίηση Buck Converter στο περιβάλλον Simulink.

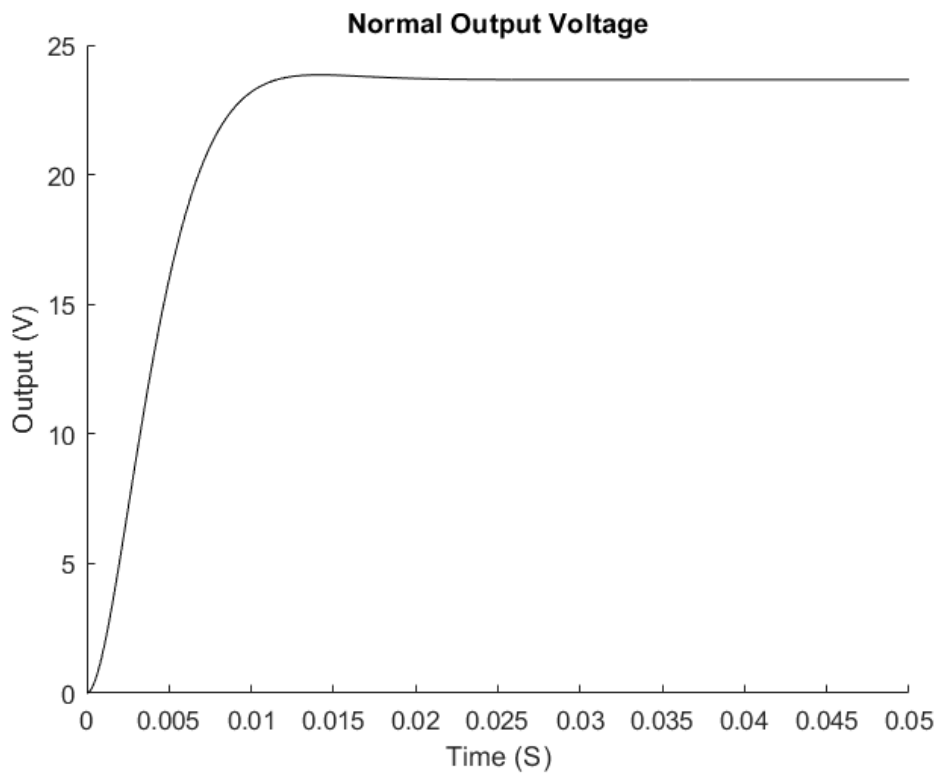
Η σχεδίαση του παραπάνω μετατροπέα υλοποιείται με είσοδο την τάση εξόδου φωτοβολταϊκής συστοιχίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 και χρησιμοποιώντας τα βασικά ηλεκτρικά στοιχεία με τα χαρακτηριστικά τους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

<b>Πίνακας 5-1. Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών στοιχείων μετατροπέα υποβιβασμού τάσης</b>	
$V_{pv}$	34.33V
$C_{pv}$	1mF
Mosfet	IRF 150
$R_{on}$	0.01 $\Omega$
$R_d$	0.01 $\Omega$
L	737 $\mu$ F
$R_L$	0.1 $\Omega$
C	558 $\mu$ F
ESR/ $R_C$	0.1 $\Omega$
$R_{load}$	50 $\Omega$
Συχνότητα switching	25kHz

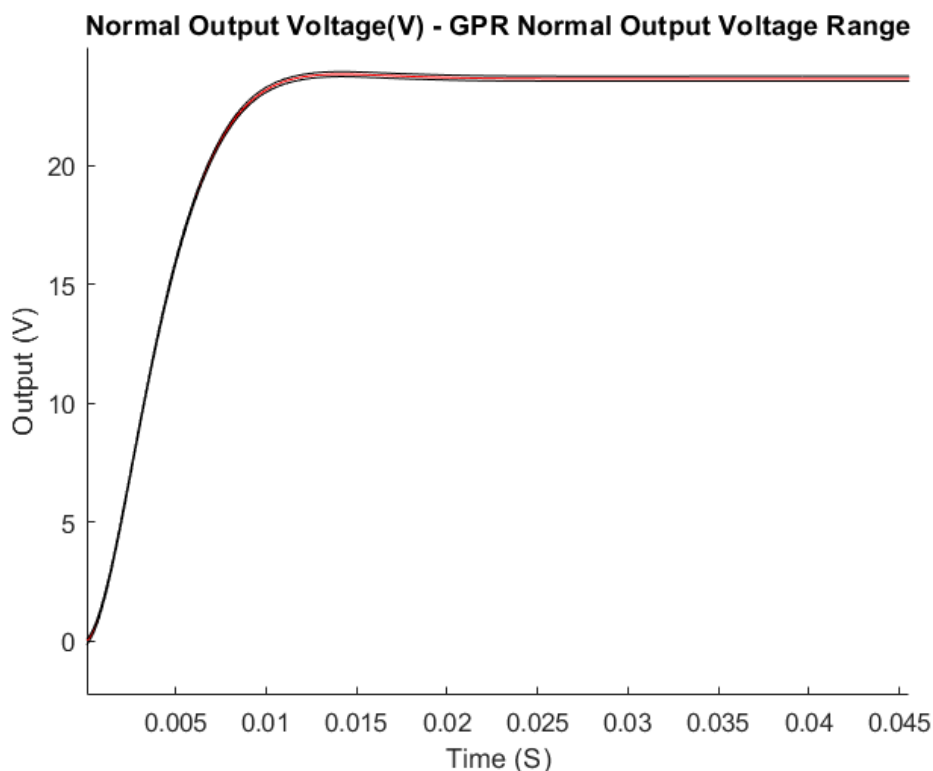
Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 για την ανεύρεση βλαβών σε μετατροπείς ισχύος με την χρήση GPR και ΓΑ. Τα βήματα της διαδικασίας υλοποιούνται με τη χρήση της γλώσσας MATLAB. Οι δύο αλγόριθμοι χρησιμοποιούν 200 συνεχείς τιμές εξόδου της μοντελοποίησης του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης που περιγράφεται στο Σχήμα 5.1, όταν αυτός λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση δηλαδή μετά τη φάση της εκκίνησης, όπου ο μετατροπέας παράγει σταθερή έξοδο τάσης χωρίς παροδικές διακυμάνσεις ή εξωτερικές διαταραχές..

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η πραγματική τάσης εξόδου του κυκλώματος σε σχέση με το χρόνο, για τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η πραγματική τάση εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης σε σύγκριση με την πρόβλεψη του εύρους με χρήση GPR. Το εύρος τάσης εξόδου υπολογίζεται από τη μέθοδο GPR με τη χρήση δεδομένων τάσης εξόδου κανονικής λειτουργίας χωρίς σφάλματα του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Όπως εύκολα παρατηρείται η πραγματική τάση βρίσκεται εντός των ορίων εκτίμησης της μεθόδου GPR. Επίσης παρατηρείται μια μικρή διαφορά που μπορεί να οφείλεται είτε σε μικρά

σφάλματα μοντελοποίησης είτε σε στοχαστικές διακυμάνσεις των σημάτων εισόδου που δεν είχαν ληφθεί πλήρως υπόψη από το εκπαιδευμένο μοντέλο GPR.



*Σχήμα 5.2 Εκτίμηση τάσης εξόδου μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με τη μέθοδο GPR.*



Σχήμα 5.3 Πραγματική τάση εξόδου σε σύγκριση με το εκτιμώμενο εύρος τάσης εξόδου της μεθόδου GPR.

Ο ΓΑ όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 υπολογίζει της ακραίες τιμές των 7 στατιστικών μεγεθών που είναι πολύ σημαντικά για την ανεύρεση των βλαβών του μετατροπέα ισχύος. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης των ακραίων τιμών των μεγεθών αυτών, χρησιμοποιώντας σαν είσοδο την κανονική τάση εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης που περιγράφεται στο Σχήμα 5.1. Ο υπολογισμός των ακραίων τιμών υπολογίζονται από τον ΓΑ.

	Πίνακας 5-2 Ακραίες τιμές 7 στατιστικών μεγεθών						
	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ασυμμετρία	Κυρτότητα	Εντροπία	Κέντρο Βάρους
<b>min</b>	0.2131	22.9673	0.0617	-0.0718	1.0000	34.2090	200.8091
<b>max</b>	0.2482	23.0222	0.0719	-0.0630	1.0005	34.2452	225.9058

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου ΓΑ στον εντοπισμό σφαλμάτων λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος υποβιβασμού τάσης, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή 15 σφαλμάτων στη λειτουργία του. Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα 15 σφάλματα λειτουργίας που εισάγονται στον μετατροπέα. Παρατηρείται ότι τα σφάλματα που εισάγονται είναι είτε μεμονωμένα είτε πολλαπλά ώστε να ελεγχθεί αποτελεσματικά η λειτουργία της μεθοδολογίας εντοπισμού σφαλμάτων που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα σφάλματα εφαρμόζονται στα περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία του κυκλώματος και έχουν διαφορετική επίδραση το κάθε ένα στην κανονική λειτουργία του μετατροπέα ισχύος.

<b>Πίνακας 5-3 Σφάλματα λειτουργίας μετατροπέα ισχύος υποβιβασμού τάσης.</b>	
Σφάλμα 1	$-10\% \times C$
Σφάλμα 2	$-15\% \times C$
Σφάλμα 3	$+20\% \times R_C$
Σφάλμα 4	$-25\% \times L$
Σφάλμα 5	$+10\% \times R_C$
Σφάλμα 6	$+35\% \times R_{on}$
Σφάλμα 7	$+10\% \times L \ \& \ +7\% \times R_L$
Σφάλμα 8	$-5\% \times C \ \& \ +6\% \times R_C \ \& \ +10\% \times R_{on}$
Σφάλμα 9	$-10\% \times C \ \& \ +7\% \times R_C \ \& \ +11\% \times L \ \& \ +11\% \times R_L$
Σφάλμα 10	$-6\% \times C \ \& \ +12\% \times R_C \ \& \ +11\% \times L \ \& \ +23\% \times R_L$
Σφάλμα 11	$-9\% \times C \ \& \ +13\% \times R_C \ \& \ +22\% \times L \ \& \ +14\% \times R_L \ \& \ +11\% \times R_{on}$
Σφάλμα 12	L Open-circuit fault
Σφάλμα 13	C Short-circuit fault
Σφάλμα 14	$R_{load} +10\%$
Σφάλμα 15	$R_{load} -8\%$

**Σφάλμα 1:** Η μείωση της τιμής του πυκνωτή εξόδου οδηγεί σε αύξηση της κυμάτωσης της τάσης (voltage ripple), επηρεάζοντας τη σταθερότητα της τάσης εξόδου και προκαλώντας ανεπιθύμητες διακυμάνσεις σε φορτία που απαιτούν σταθερή παροχή.

**Σφάλμα 2:** Η περαιτέρω μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή εντείνει το πρόβλημα κυμάτωσης, με αποτέλεσμα αυξημένο ηλεκτρικό θόρυβο και πιθανές παρεμβολές στη

λειτουργία άλλων κυκλωμάτων ή αισθητήρων (πχ. για έλεγχο του μετατροπέα ισχύος) που συνδέονται στο σύστημα.

**Σφάλμα 3:** Η αύξηση της εσωτερικής αντίστασης του πυκνωτή ( $R_C$ ) προκαλεί απώλειες ενέργειας και μείωση της αποδοτικότητας, καθώς μέρος της ισχύος διαχέεται υπό μορφή θερμότητας, μειώνοντας την ενεργειακή αξιοπιστία του μετατροπέα.

**Σφάλμα 4:** Η μείωση της επαγωγής ( $L$ ) του πηνίου οδηγεί σε ταχύτερες μεταβολές ρεύματος, αυξάνοντας τον κυματισμό ρεύματος και επιβαρύνοντας τον πυκνωτή εξόδου, κάτι που επηρεάζει τη μακροχρόνια σταθερότητα του κυκλώματος.

**Σφάλμα 5:** Η αύξηση της αντίστασης του πυκνωτή ( $R_C$ ) σε ακόμα μεγαλύτερη τιμή επιδεινώνει τις απώλειες ισχύος, αυξάνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας και μειώνοντας τη διάρκεια ζωής του στοιχείου, οδηγώντας σε πιθανή αστοχία.

**Σφάλμα 6:** Η αύξηση της αντίστασης του διακόπτη ( $R_{on}$ ) συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες αγωγής όταν ο διακόπτης είναι σε λειτουργία, επιδρώντας αρνητικά στην απόδοση και προκαλώντας τοπική υπερθέρμανση.

**Σφάλμα 7:** Η αύξηση της αντίστασης του πηνίου ( $R_L$ ) αυξάνει τις απώλειες ενέργειας, μειώνοντας την αποδοτικότητα του μετατροπέα.

**Σφάλμα 8:** Ο συνδυασμός πολλαπλών σφαλμάτων, όπως μειωμένος πυκνωτής και αυξημένες αντιστάσεις  $R_C$ ,  $R_{on}$  και  $R_L$ , ενισχύουν αθροιστικά τις επιπτώσεις τους, προκαλώντας έντονες απώλειες, αστάθεια λειτουργίας και θερμική καταπόνηση στο κύκλωμα.

**Σφάλμα 9:** Με περαιτέρω μείωση της αυτεπαγωγής, σε συνδυασμό με αυξημένες τιμές των αντιστάσεων, το κύκλωμα παρουσιάζει έντονα φαινόμενα αστάθειας, κυμάτωσης και απώλειας ρύθμισης της τάσης εξόδου.

**Σφάλμα 10:** Η περαιτέρω μείωση του πυκνωτή μαζί με υψηλές απώλειες  $R_C$  και  $R_L$  επιφέρει μη-γραμμική συμπεριφορά στον μετατροπέα, καθιστώντας δύσκολη τη ρύθμιση μέσω μεθόδων ελέγχου.

**Σφάλμα 11:** Συνδυάζοντας ακραίες τιμές αντίστασης στον διακόπτη ( $R_{on}$ ), στο πηνίο ( $R_L$ ) και στον πυκνωτή ( $R_C$ ), το κύκλωμα λειτουργεί με έντονη μείωση απόδοσης και κίνδυνο θερμικής καταστροφής.

**Σφάλμα 12:** Η ανοικτή επαφή στο πηνίο διακόπτει πλήρως τη ροή ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο, οδηγώντας σε πλήρη παύση της λειτουργίας του μετατροπέα και πιθανή καταστροφή εξαρτημάτων λόγω αποθηκευμένης ενέργειας.

**Σφάλμα 13:** Η βραχυκύκλωση του πυκνωτή εξόδου δημιουργεί στιγμιαία αυξημένα ρεύματα που ενδέχεται να καταστρέψουν τον διακόπτη ή το πηνίο, ενώ ταυτόχρονα μηδενίζει την ικανότητα εξομάλυνσης της εξόδου, καθιστώντας την πολύ ασταθή.

**Σφάλμα 14:** Η αύξηση της αντίστασης φορτίου κατά 10% σε έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης μειώνει το ρεύμα εξόδου. Αν και ο μετατροπέας συνεχίζει να λειτουργεί εντός των ορίων του, η μείωση του ρεύματος μπορεί να προκαλέσει παροδική υπέρταση στην έξοδο. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα της εξόδου και να μειώσει τη δυναμική απόκριση του συστήματος, ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη προσαρμογή σε μεταβολές φορτίου.

**Σφάλμα 15:** Η αύξηση του φορτίου μειώνει την τάση εξόδου αν το κύκλωμα δεν έχει επαρκή ρύθμιση, επιβαρύνοντας τα στοιχεία του μετατροπέα και ενδέχεται να οδηγήσει σε λειτουργία εκτός των προδιαγραφών, προκαλώντας φθορές ή μειωμένη απόδοση.

Στους Πίνακες 5.4, 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των 7 στατιστικών μεγεθών του μετατροπέα με λειτουργία σφάλματος με τις ακραίες τιμές που εκτιμούνται με χρήση ΓΑ. Παρατηρείται ότι όλα τα σφάλματα εντοπίζονται καθώς μια ή παραπάνω τιμές των στατιστικών μεγεθών αποκλίνουν από τις ακραίες τιμές.



**Πίνακας 5-4 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 1-5.**

	Σφάλμα1	Σφάλμα2	Σφάλμα3	Σφάλμα 4	Σφάλμα 5
Εύρος	4.83%	6.53%	0.03%	89.23%	0.01%
Μέση τιμή	0.76%	1.14%	0.00%	6.07%	0.00%
Τυπική απόκλιση	4.83%	6.53%	0.03%	89.13%	0.01%
Ασυμμετρία	4.98%	8.12%	0.01%	548.47%	0.01%
Κυρτότητα	0.00%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%
Εντροπία	0.03%	0.06%	0.00%	1.28%	0.00%
Κέντρο Βάρους	0.01%	0.01%	0.00%	0.14%	0.00%

**Πίνακας 5-5 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 6-10.**

	Σφάλμα 6	Σφάλμα 7	Σφάλμα 8	Σφάλμα 9	Σφάλμα 10
Εύρος	0.53%	23.44%	2.65%	20.10%	22.37%
Μέση τιμή	0.15%	2.93%	0.38%	3.96%	3.74%
Τυπική απόκλιση	0.58%	23.43%	2.65%	20.90%	22.36%
Ασυμμετρία	0.27%	19.19%	2.25%	24.07%	22.79%
Κυρτότητα	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%	0.01%
Εντροπία	0.00%	0.06%	0.02%	0.06%	0.06%
Κέντρο Βάρους	0.00%	0.05%	0.00	0.05%	0.05%

**Πίνακας 5-6 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 11-15.**

	Σφάλμα 11	Σφάλμα 12	Σφάλμα13	Σφάλμα 14	Σφάλμα 15
Εύρος	40.37%	100.00%	100%	22.87%	16.44%
Μέση τιμή	7.23%	100%	100%	3.43%	3.17%
Τυπική απόκλιση	40.34%	100%	100%	22.87%	16.43%
Ασυμμετρία	35.84%	100%	100.00%	39.88%	20.11%
Κυρτότητα	0.01%	100.00%	100.00%	0.00%	0.05%
Εντροπία	0.04%	1.58%	0.95%	0.20%	0.06%
Κέντρο Βάρους	0.09%	100.00%	100.00%	0.04%	0.04%

Στα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι ο γενετικός αλγόριθμος έχει εντοπίσει τα επιμέρους σφάλματα καθώς μια ή παραπάνω τιμές αποκλίνουν από τις ακραίες τιμές του Πίνακα 5.3. Πιο αναλυτικά για κάθε σφάλμα:

**Σφάλμα 1:** Το εύρος αυξάνεται κατά 4.83% και η τυπική απόκλιση κατά 4.83% υποδεικνύοντας αυξημένη διακύμανση στην έξοδο, χωρίς όμως μεγάλη μεταβολή στη μέση τιμή. Η ασυμμετρία του σήματος εξόδου επηρεάζεται, με 4.98% απόκλιση και η κυρτότητα είναι μηδενική. Όλα τα παραπάνω δείχνουν καθαρή αύξηση θορύβου.

**Σφάλμα 2:** Παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στο εύρος 6,53% και τυπική απόκλιση 6,53%, δηλώνοντας σημαντική αστάθεια στην έξοδο. Η ασυμμετρία αυξάνεται στο 8,12%, αλλά χωρίς αλλαγή στην κυρτότητα, δείχνοντας πιο επίπεδη κατανομή τιμών.

**Σφάλμα 3:** Πολύ μικρές αποκλίσεις σε όλα τα μεγέθη εύρος 0.03% και τυπική απόκλιση 0.03%, γεγονός που δηλώνει ότι το σφάλμα δεν έχει ουσιαστική επίδραση στην έξοδο και πιθανόν να είναι δυσδιάκριτο από κοινές μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων όπως η σύγκριση τιμών τάσης εξόδου.

**Σφάλμα 4:** Η μέση τιμή αυξάνεται κατά 6.07% και η τυπική απόκλιση κατά 89.13%, υποδηλώνοντας μετατόπιση της εξόδου. Το εύρος αυξάνεται κατά 89.23%, δηλώνοντας τόσο αύξηση διασποράς όσο και της μέσης τιμής, καθιστώντας το σφάλμα ευδιάκριτο.

**Σφάλμα 5:** Παρότι προκύπτει ελάχιστη αύξηση εύρους 0.01%, οι υπόλοιποι δείκτες παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι, γεγονός που δείχνει μη αξιοσημείωτη επίδραση στην απόδοση.

**Σφάλμα 6:** Μηδενικές αποκλίσεις σχεδόν σε όλα τα μεγέθη, . Το σφάλμα δύσκολα εντοπίζεται από κοινές μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων όπως η απλή σύγκριση σημάτων με βάση αυτά τα μεγέθη, παρότι η αύξηση της  $R_{on}$  προκαλεί θερμικές απώλειες.

**Σφάλμα 7:** Παρουσιάζει έντονες αυξήσεις σε εύρος 23.44% και τυπική 23.43%, με αύξηση και στη μέση τιμή 2.93%. Το σφάλμα επηρεάζει έντονα τη διακύμανση και το κέντρο βάρους 0.05%, υποδεικνύοντας σαφή επίδραση στην τάση εξόδου.

**Σφάλμα 8:** Εμφανίζονται μεσαίες αποκλίσεις σε εύρος 2.65%, τυπική απόκλιση 2.65% ενώ οι υπόλοιποι δείκτες παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι. Το σφάλμα επηρεάζει κυρίως τη μεταβλητότητα και όχι τη θέση της κατανομής.

**Σφάλμα 9:** Παρουσιάζει μεγάλες αυξήσεις σε εύρος 20.10% και τυπική απόκλιση 20.9%, μαζί με μετατόπιση στη μέση τιμή 3.74%. Το κέντρο βάρους επίσης αλλάζει 0.05%, υποδηλώνοντας ισχυρή επίδραση στην τάση εξόδου.

**Σφάλμα 10:** Είναι ένα από τα πιο έντονα σφάλματα, με εύρος 22.37%, τυπική απόκλιση 22.36% και μετατόπιση μέσης τιμής 3.74%. Παρουσιάζει αυξημένη εντροπία 0.06% και μεταβολή στο κέντρο βάρους 0.05%, δηλώνοντας πλήρη διαταραχή του συστήματος.

**Σφάλμα 11:** Προκαλεί πολύ μεγάλες αποκλίσεις σε όλα τα μεγέθη [εύρος 40.37%, τυπική απόκλιση 40.34%, μέση τιμή 7.23% και ασυμμετρία 35.84%, κάτι που υποδεικνύει δραστική αλλοίωση της εξόδου. Το κέντρο βάρους αλλάζει επίσης 0.09%, ενώ η κυρτότητα 0.01% δείχνει ελαφρώς πιο "πλατιά" κατανομή.

**Σφάλμα 12:** Η αποσύνδεση του πηνίου οδηγεί σε πλήρη κατάρρευση και όλα τα στατιστικά μεγέθη παρουσιάζουν 100%. Πρόκειται για εξαιρετικά εντοπίσιμο σφάλμα.

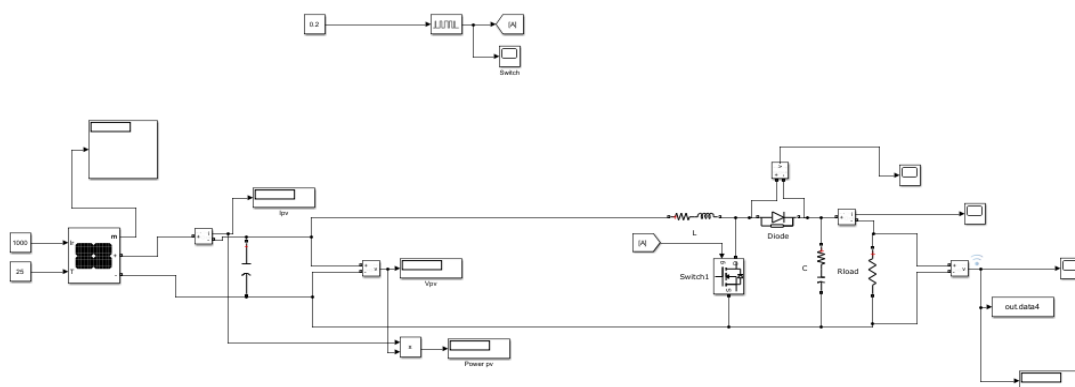
**Σφάλμα 13:** Παρόμοια με το σφάλμα 12, παρουσιάζει 100% απόκλιση σε βασικά μεγέθη και εντροπία 0.95%, γεγονός που το καθιστά εξαιρετικά ανιχνεύσιμο, αφού διαταράσσει εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση σε εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό πράγμα που σημαίνει ότι ο μετατροπέας δίνει εντελώς διαφορετική τάση εξόδου από την υπό κανονικές συνθήκες τάση εξόδου.

**Σφάλμα 14:** Μέτριες αποκλίσεις στο εύρος 22.87%, την τυπική απόκλιση 22.87% και την ασυμμετρία 39.88%, μικρότερη όμως στη μέση τιμή 3.43%. Υποδηλώνει σοβαρή διαταραχή του μετατροπέα, αλλά όχι πλήρη κατάρρευση.

**Σφάλμα 15:** Παρουσιάζει μέτριες αυξήσεις σε εύρος 16.44%, τυπική απόκλιση 16.43% και ασυμμετρία 20.11%, με ελαφρά μετατόπιση της μέσης τιμής 3.17%, δηλώνοντας γενικευμένη αλλά ήπια αλλοίωση του σήματος της τάσης εξόδου.

## 5.2 Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης

Για καλύτερο έλεγχο στην αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία της μεθόδου ανεύρεσης βλαβών σε μετατροπείς ισχύος που περιγράφεται στα Κεφάλαια 3 και 4 της παρούσας εργασίας, μελετήθηκε ο εντοπισμός βλαβών και σε έναν μετατροπέα ισχύος ανύψωσης τάσης (Boost Converter). Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.



Σχήμα 5-4. Συνδεσμολογία μετατροπέα ισχύος ανύψωσης τάσης.

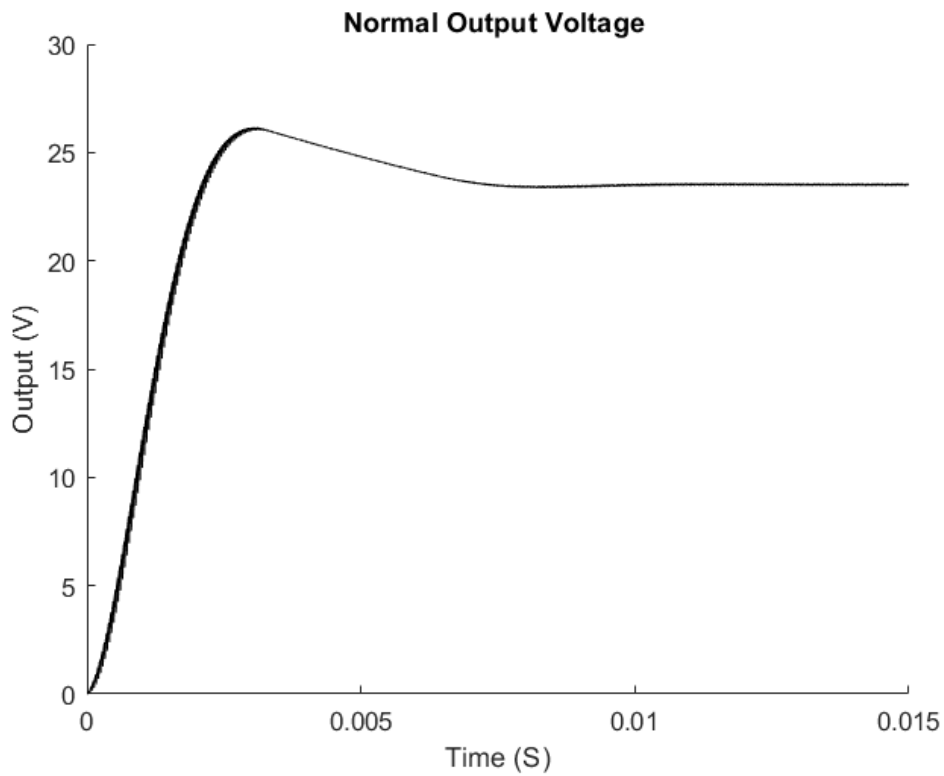
<b>Πίνακας 5-7. Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών στοιχείων μετατροπέα ισχύος ανύψωσης τάσης.</b>	
$V_{pv}$	19.91V
$C_{pv}$	1mF
Mosfet	IRF 150
$R_{on}$	0.01Ω
$R_d$	0.01Ω
L	490μH
$R_L$	0.1Ω
C	550μF
ESR/ $R_C$	0.1Ω
$R_{load}$	50Ω
Συχνότητα switching	25kHz

Η σχεδίαση του μετατροπέα υλοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου Simulink/Matlab, με χρήση βασικών ηλεκτρικών στοιχείων. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση αυτού του μετατροπέα ισχύος.

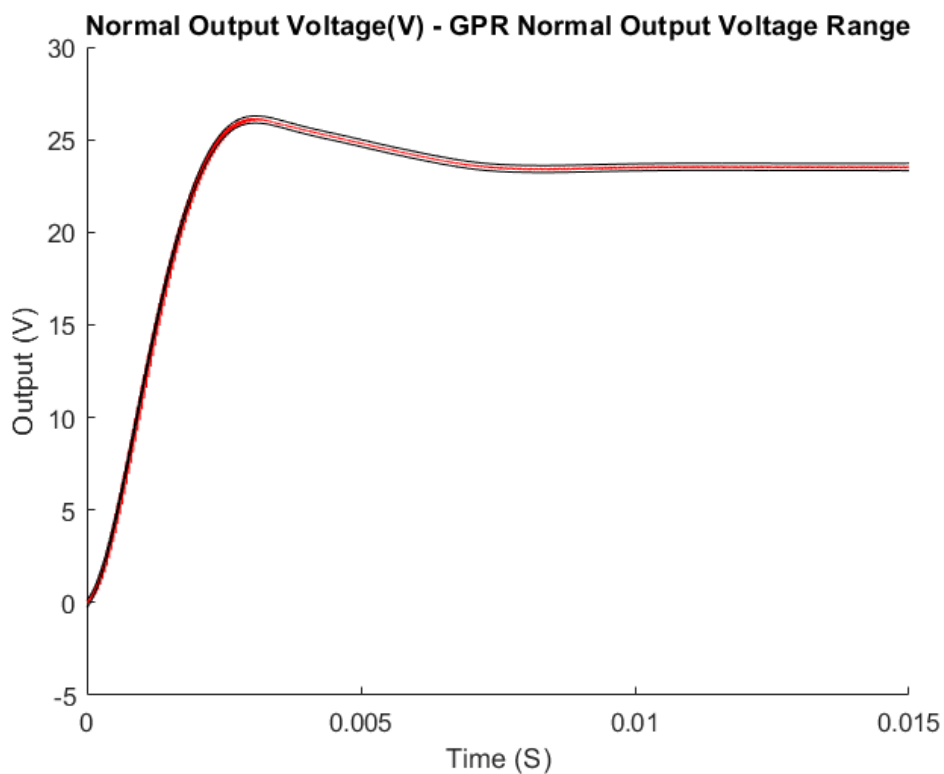
Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η πραγματική τάση εξόδου. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.5 σε σύγκριση με την εκτίμηση του εύρους κανονικής τάσης από τον αλγόριθμο GPR.

Τα lower και upper bounds του Σχήματος 5.6 είναι το μέγιστο και το ελάχιστο όριο τάσης εξόδου ώστε να λειτουργεί ο μετατροπέας κανονικά. Αν ξεπεραστεί το άνω όριο (upper bound)

της τιμής αυτής έχουμε υπέρταση, ενώ αντίστοιχα για το κάτω όριο (lower bound) έχουμε υπόταση.



*Σχήμα 5-5 Τάση εξόδου μετατροπέα ανύψωσης τάσης.*



Σχήμα 5-6. Πραγματική τάση εξόδου σε σύγκριση με το εκτιμώμενο εύρος τάσης εξόδου της μεθόδου GPR.

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι ακραίες τιμές των στατιστικών μεγεθών που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4, για τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

	Πίνακας 5-8 Ακραίες τιμές 7 στατιστικών μεγεθών						
	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ασυμμετρία	Κυρτότητα	Εντροπία	Κέντρο Βάρους
<b>min</b>	0.1257	22.9722	0.0318	1.0190	1.0036	34.1410	201.0654
<b>max</b>	0.1440	22.9859	0.0347	0.8178	1.0044	34.1771	225.6022

Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας εντοπισμού βλαβών στον μετατροπέα με χρήση ΓΑ χρησιμοποιούνται τα σφάλματα του Πίνακα 5.3. Οι επιπτώσεις της εφαρμογής των σφαλμάτων αυτών στη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι οι εξής:

**Σφάλμα 1:** Η μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή κατά 15% αυξάνει την κυμάτωση της τάσης εξόδου. Σε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης αυτό σημαίνει πως η έξοδος γίνεται πιο ασταθής, επηρεάζοντας τα φορτία που απαιτούν σταθερή τάση.

**Σφάλμα 2:** Με περαιτέρω μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή, επιδεινώνεται το φαινόμενο της αυξημένης κυμάτωσης. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο και ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο τη σταθερότητα (αυξημένη κυμάτωση τάσης που οδηγεί σε πολλαπλά σφάλματα λειτουργίας) ή την απόδοση δηλαδή την ποιότητα λειτουργίας των ευαίσθητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων όπως αναλογικοί μετατροπείς, ψηφιακοί επεξεργαστές, μνήμες ram κ.α. που συνδέονται με τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

**Σφάλμα 3:** Η αύξηση της εσωτερικής αντίστασης  $R_C$  του πυκνωτή κατά 20% αυξάνει τις απώλειες ισχύος, κάτι που μειώνει την ενεργειακή αποδοτικότητα και μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση του εξαρτήματος.

**Σφάλμα 4:** Η μείωση της αυτεπαγωγής κατά 25% προκαλεί αύξηση της κυμάτωσης του ρεύματος (current ripple) και υποβάθμιση της δυνατότητας αποθήκευσης ενέργειας του πηνίου.

**Σφάλμα 5:** Η αύξηση της αντίστασης  $R_C$  κατά 10% οδηγεί σε ενεργειακές απώλειες και μικρότερη αποτελεσματικότητα του φίλτρου, επιδρώντας αρνητικά στην απόδοση και την ποιότητα του σήματος εξόδου.

**Σφάλμα 6:** Η αύξηση της αντίστασης  $R_{on}$  του MOSFET κατά 35% προκαλεί μεγαλύτερες απώλειες ισχύος στον διακόπτη και άνοδο της θερμοκρασίας, οδηγώντας σε μείωση της συνολικής απόδοσης.

**Σφάλμα 7:** Η ταυτόχρονη αύξηση της αυτεπαγωγής κατά 10% και της αντίστασης  $R_L$  κατά 7% προκαλεί καθυστερημένη απόκριση του συστήματος και αυξημένες απώλειες ενέργειας, επηρεάζοντας την ταχύτητα μετάβασης στην επιθυμητή τάση εξόδου.

**Σφάλμα 8:** Ένα συνδυαστικό σφάλμα με μείωση χωρητικότητας και αύξηση  $R_C$  και  $R_{on}$ , προκαλεί έντονη αστάθεια στο κύκλωμα, με αυξημένη κυμάτωση, μειωμένη αποδοτικότητα και πιθανή πρόωρη φθορά των εξαρτημάτων.

**Σφάλμα 9:** Η περαιτέρω μείωση της χωρητικότητας και οι ταυτόχρονες αυξήσεις σε  $R_C$ ,  $L$  και  $R_L$  δημιουργούν ένα σύστημα με πολλαπλά υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά, μειώνοντας σημαντικά την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας στην έξοδο.



**Σφάλμα 10:** Συνδυασμός αλλαγών σε όλα τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος, οδηγεί σε συσσώρευση απωλειών, μεγάλη αστάθεια και έντονη υποβάθμιση της απόδοσης, καθιστώντας τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης αναξιόπιστο σε κανονική λειτουργία.

**Σφάλμα 11:** Το πιο σύνθετο σφάλμα με αλλαγές σε όλους τους παραμέτρους, προκαλεί ταυτόχρονα αυξημένες απώλειες ενέργειας, μεγιστοποιώντας την κυμάτωση και μειώνοντας δραματικά την απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος.

**Σφάλμα 12:** Η αποσύνδεση του πηνίου (L open-circuit fault) εμποδίζει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, άρα η έξοδος του μετατροπέα ανύψωσης τάσης καταρρέει, αναιρώντας τη δυνατότητα ανύψωσης της τάσης και καθιστώντας το κύκλωμα πρακτικά ανενεργό.

**Σφάλμα 13:** Η βραχυκύκλωση του πυκνωτή οδηγεί σε αιφνίδια αύξηση του ρεύματος στο κύκλωμα, με κίνδυνο υπερθέρμανσης και καταστροφής του MOSFET ή άλλων στοιχείων, αποτελώντας σοβαρό λειτουργικό σφάλμα.

**Σφάλμα 14:** Η αύξηση της αντίστασης φορτίου κατά 10% μειώνει το ρεύμα εξόδου με αποτέλεσμα τη μείωση της παρεχόμενης ισχύος του μετατροπέα σε εξωτερικά φορτία και μπορεί να οδηγήσει σε απότομες αυξήσεις της τάσης εξόδου, ειδικά σε συστήματα χωρίς έλεγχο της τάσης εξόδου με ανάδραση, επηρεάζοντας την ακρίβεια ελέγχου.

**Σφάλμα 15:** Η μείωση της αντίστασης φορτίου κατά 8% αυξάνει το ρεύμα που απαιτείται από τον μετατροπέα ισχύος. Αν ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης δεν έχει επαρκή δυνατότητα παροχής ρεύματος, αυτό μπορεί να προκαλέσει πτώση τάσης και υπερφόρτωση στα εξαρτήματα του.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης της εκτίμησης των ακραίων τιμών των 7 στατιστικών μεγεθών με τις πραγματικές τιμές για το κάθε σφάλμα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.9, 5.10 και 5.11, αντίστοιχα.

**Πίνακας 5-9 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 1-5.**

	Σφάλμα 1	Σφάλμα2	Σφάλμα 3	Σφάλμα 4	Σφάλμα 5
Εύρος	12.00%	29.36%	20.66%	58.80%	10.49%
Μέση τιμή	0.45%	0.71%	0.02%	0.16%	0.01%
Τυπική απόκλιση	9.55%	24.42%	21.57%	47.76%	10.85%
Ασυμμετρία	33.13%	56.96%	1.12%	46.47%	0.35%
Κυρτότητα	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Εντροπία	0.06%	0.18%	0.19%	0.44%	0.10%
Κεντροειδές	0.01%	0.03%	0.01%	0.05%	0.13%

**Πίνακας 5-10 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 6-10.**

	Σφάλμα 6	Σφάλμα 7	Σφάλμα 8	Σφάλμα 9	Σφάλμα10
Εύρος	0.96%	8.87%	8.09%	10.63%	14.99%
Μέση τιμή	0.01%	0.35%	0.23%	0.77%	0.51%
Τυπική απόκλιση	0.65%	6.73%	7.92%	3.55%	17.68%
Ασυμμετρία	0.99%	2.35%	9.02%	25.76%	11.35%
Κυρτότητα	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%
Εντροπία	0.01%	0.19%	0.05%	0.04%	0.22%
Κέντρο Βάρους	0.00%	0.41%	0.01%	0.02%	0.00%

**Πίνακας 5-11 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 11-15.**

	Σφάλμα 11	Σφάλμα 12	Σφάλμα 13	Σφάλμα 14	Σφάλμα 15
Εύρος	47.25%	100%	100%	2.72%	1.98%
Μέση τιμή	0.94%	100%	100%	0.53%	0.51%
Τυπική απόκλιση	45.31%	100%	100%	4.42%	3.87%
Ασυμμετρία	1.13%	100.00%	100.00%	10.97%	5.69%
Κυρτότητα	0.06%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%
Εντροπία	0.47%	1.38%	1.12%	0.04%	0.03%
Κέντρο Βάρους	0.03%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, η μέθοδος ΓΑ εντοπίζει τα σφάλματα αποτελεσματικά καθώς ένα ή παραπάνω μεγέθη είναι εκτός των ορίων της εκτίμησης των ακραίων τιμών. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή ανά σφάλμα με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα:

**Σφάλμα 1:** Μέτριες αποκλίσεις σε εύρος 12% και τυπική απόκλιση 9.6%. Μεγαλύτερη στην ασυμμετρία 33%, δείχνουν ότι το σφάλμα έχει περιορισμένη επίδραση στη διακύμανση και προκαλεί ασυμμετρία στη μορφή του σήματος. Τα υπόλοιπα μεγέθη δεν αποκλίνουν.

**Σφάλμα 2:** Εμφανίζει μέτριες μεταβολές στο εύρος 29.36%, τυπική απόκλιση 24.42% και ασυμμετρία 56.96% υποδεικνύοντας υψηλή δυσλειτουργία στον μετατροπέα, με μηδενική επίδραση του σφάλματος στα υπόλοιπα στατιστικά μεγέθη.

**Σφάλμα 3:** Σημαντική αύξηση εύρους 20.66% και τυπικής απόκλισης 21.57% δηλώνουν υψηλή διασπορά. Η εντροπία επίσης αυξάνεται 0.19%, υποδεικνύοντας ακόμα μεγαλύτερο θόρυβο στην έξοδο.

**Σφάλμα 4:** Υψηλές αποκλίσεις σε εύρος 58.8%, τυπική απόκλιση 47.76% και ασυμμετρία 46.47% δείχνουν μετατόπιση της κατανομής και ένδειξη μη-συμμετρικής εξόδου. Η εντροπία και το κέντρο βάρους παραμένουν εντός ορίων.

**Σφάλμα 5:** Εύρος και τυπική απόκλιση παρουσιάζουν μέτρια αύξηση 10.49%, 10.85%, με σχεδόν μηδενική ασυμμετρία και εντροπία 0.10%, γεγονός που φανερώνει αύξηση της μεταβλητότητας του σήματος εξόδου χωρίς σημαντική παραμόρφωση της κατανομής των δεδομένων εξόδου τάσης.

**Σφάλμα 6:** Σχεδόν αμελητέες αποκλίσεις σε όλα τα μεγέθη, με μέση τιμή μόλις 0.01% και ασυμμετρία 0.99%. Το σφάλμα έχει ελάχιστη επίδραση στη μορφή ή στο εύρος του σήματος εξόδου καθώς το σήμα σύμφωνα με τις αποκλίσεις των στατιστικών μεγεθών παρουσιάζει σχεδόν μηδενική κυμάτωση και είναι σχεδόν ίδιο με την κανονική έξοδο.

**Σφάλμα 7:** Μεσαία επίδραση σε εύρος 8,87% και μέση τιμή 0.35%, αλλά παρατηρείται μετατόπιση του κέντρου βάρους 0.41%, που μπορεί να είναι δείκτης ενεργειακής μεταβολής στο κύκλωμα. Η μετατόπιση του κέντρου βάρους δείχνει ότι το σήμα της τάσης εξόδου είναι χρονικά μετατοπισμένο και αυτό μπορεί να οδηγήσει το κύκλωμα σε πιο αργή απόκριση ή αστάθεια.

**Σφάλμα 8:** Μέτριες αποκλίσεις σε εύρος 8.09% και τυπική απόκλιση 7.92% δείχνουν με την έξοδο να παρουσιάζει αυξημένο θόρυβο και κυμάτωση από το φυσιολογικό, με μηδενική ασυμμετρία και κέντρο βάρους αμετάβλητο.

**Σφάλμα 9:** Παρόμοια συμπεριφορά με το σφάλμα 8, με εύρος 10.63% και τυπική απόκλιση 3.55%. Η εντροπία αυξάνεται 0.04%, ενώ δεν παρατηρείται μετατόπιση στο κέντρο βάρους.

**Σφάλμα 10:** Μέτριες αποκλίσεις σε εύρος 14.99% και τυπική απόκλιση 17.68%, με ελαφρά αύξηση στη μέση τιμή 0.51%. Αυξημένη εντροπία 0.22% υποδηλώνει σημαντική διαταραχή της εξόδου, ενώ το κέντρο βάρους παραμένει σταθερό.

**Σφάλμα 11:** Μεγάλες αυξήσεις σε εύρος 47.25% και τυπική απόκλιση 45.31% χωρίς μεταβολή στη μορφή κατανομής, αλλά το σφάλμα είναι σαφώς ανιχνεύσιμο.

**Σφάλμα 12:** Ακραίες μεταβολές – 100% σε όλα τα μεγέθη και εντροπία 1.38%, δηλώνουν πλήρη κατάρρευση της εξόδου και σημαντική διαταραχή στη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος.

**Σφάλμα 13:** Παρόμοια συμπεριφορά του μετατροπέα με το σφάλμα 12, με 100% αποκλίσεις στατιστικών μεγεθών και εντροπία 1.12%. Το σύστημα βρίσκεται εκτός φυσιολογικής λειτουργίας.

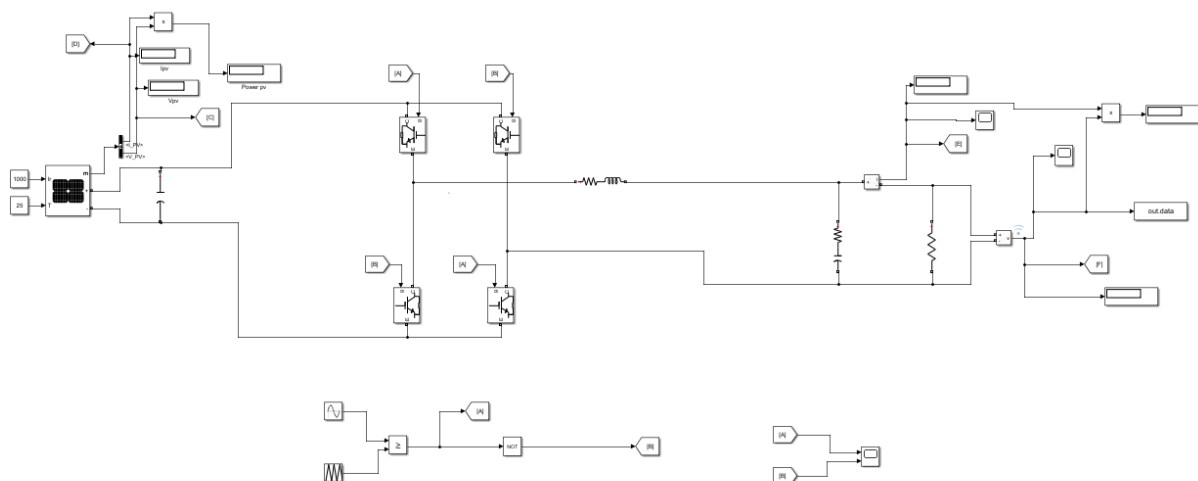
**Σφάλμα 14:** Μικρή αύξηση σε εύρος 2.72% και τυπική απόκλιση 4.42%, αλλά η μορφή κατανομής έχει μέτρια ασυμμετρία 10.97%, χωρίς μεταβολή στο κέντρο βάρους, κάτι που

καθιστά το σφάλμα ανιχνεύσιμο. Η παράλληλη μεταβολή στη μέση τιμή δίνει μια συνολική παραμόρφωση της κυματομορφής εξόδου τάσης.

**Σφάλμα 15:** Παρόμοια με το σφάλμα 14 – μικρές αποκλίσεις σε εύρος 1.98% , τυπική απόκλιση 3.87% και μικρή μεταβολή στην ασυμμετρία 5.69%, χωρίς μεταβολή στα άλλα στατιστικά μεγέθη και με τα ίδια αποτελέσματα ως προς την συμπεριφορά της εξόδου.

### 5.3 Μετατροπέας DC-AC πλήρους γέφυρας

Για τον αποτελεσματικό έλεγχο λειτουργίας του αλγορίθμου εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση GPR και ΓΑ που περιγράφεται στα Κεφάλαια 3 και 4 της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε επίσης ένας αντιστροφέας DC-AC πλήρους γέφυρας (full-bridge inverter). Η παραπάνω εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού σφαλμάτων λειτουργίας και σε συστήματα εναλλασσόμενης τάσης (AC). Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του αντιστροφέα.



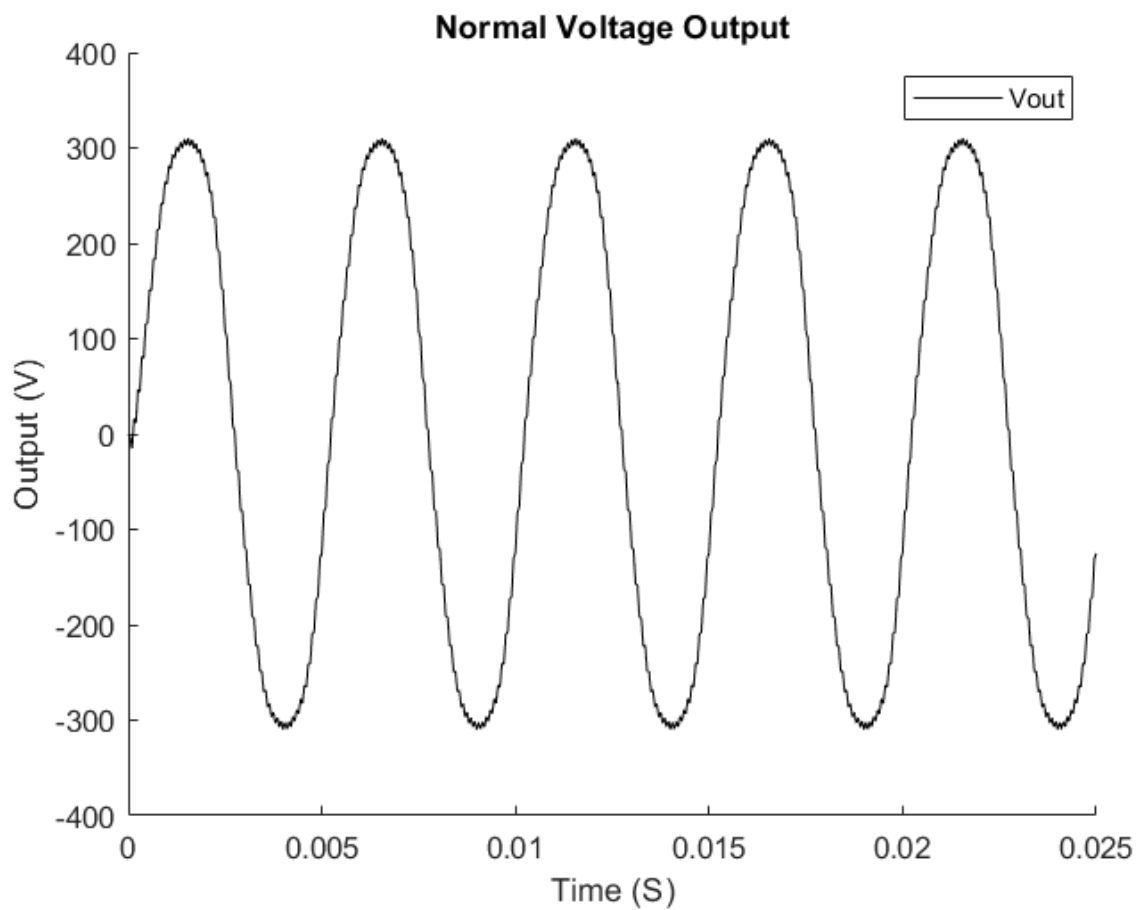
Σχήμα 5-7 Συνδεσμολογία αντιστροφέα DC-AC πλήρους γέφυρας.

Η σχεδίαση του αντιστροφέα τάσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου Simulink/Matlab. Στον πίνακα 5.12 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών στοιχείων του.

<b>Πίνακας 5-12. Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών στοιχείων του αντιστροφέα DC-AC πλήρους γέφυρας.</b>	
$V_{pv}$	400V
$C_{pv}$	1mF
$R_{on}$	0.001 $\Omega$
$L$	0.98 mF
$R_L$	0.1 $\Omega$
$C$	10.2 $\mu$ F
ESR/ $R_C$	0.1 $\Omega$
$R_{load}$	100 $\Omega$
Συχνότητα switching	10kHz

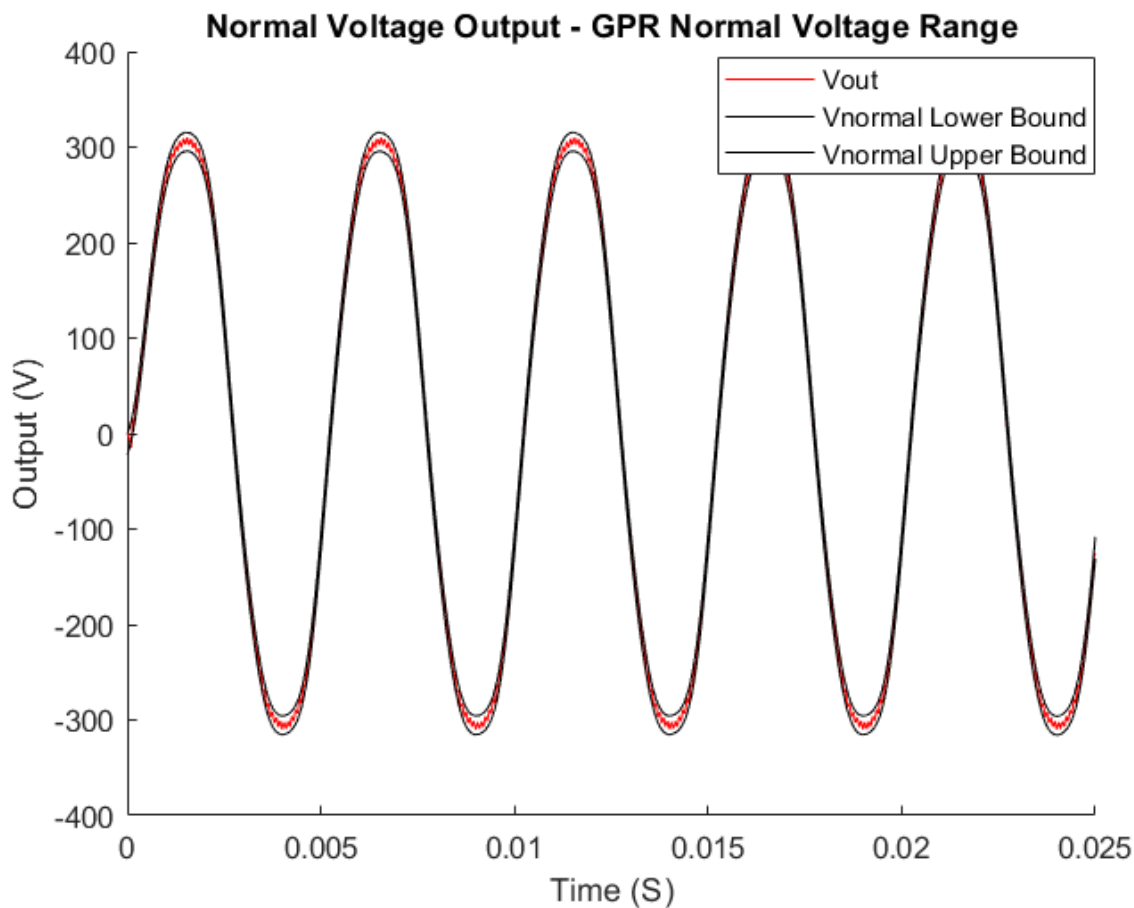
Η εκτίμηση του εύρους της τάσης εξόδου του αντιστροφέα δίνεται μέσω της χρήσης του αλγορίθμου GPR που τα βήματα εκτέλεσης του περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα έτσι και στην περίπτωση του αντιστροφέα παρατηρείται η υψηλή αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου GPR με το εύρος τάση εξόδου να εμπεριέχει εντός των ορίων του την πραγματική τάση εξόδου του αντιστροφέα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κανονικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα.



Σχήμα 5-8. Τάση εξόδου του αντιστροφέα.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης εύρους από τη μέθοδο GPR και η κανονική τάση εξόδου του αντιστροφέα.



Σχήμα 5-9. Εύρος τάσης εξόδου GPR-Πραγματική τάση εξόδου.

Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης των ακραίων τιμών των 7 στατιστικών μεγεθών για τον αντιστροφέα του Σχήματος 5.7 με χρήση ΓΑ με τα βήματα εκτέλεσης που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.

	Πίνακας 5-13 Ακραίες τιμές 7 στατιστικών μεγεθών						
	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ασσυμετρία	Κυρτότητα	Εντροπία	Κέντρο Βάρους
<b>min</b>	47.1082	63.6690	12.7152	0.5272	0.8858	0.1381	174.3123
<b>max</b>	67.5358	74.3664	16.2295	0.1088	0.9391	2.1450	202.5168



Ο Πίνακας 5.14 παρουσιάζει τα σφάλματα λειτουργίας που εντάσσονται στον αντιστροφέα του Σχήματος 5.7, ώστε αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας εντοπισμού βλαβών με χρήση ΓΑ.

**Σφάλμα 1:** Η μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή κατά (20% μειώνει την ικανότητα φιλτραρίσματος των υψηλών συχνοτήτων από την έξοδο του αντιστροφέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο κυματισμό τάσης (ripple, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει παραμορφώσεις στην κυματομορφή της εξόδου AC και να επηρεάσει αρνητικά φορτία ευαίσθητα στην ποιότητα της τάσης.

**Σφάλμα 2:** Με μείωση 10% της χωρητικότητας, οι επιπτώσεις είναι παρόμοιες με το Σφάλμα 1, αλλά σε μικρότερη κλίμακα. Παρουσιάζεται ήπια αύξηση της κυμάτωσης εξόδου.

**Σφάλμα 3:** Η μείωση της αυτεπαγωγής κατά 20% μειώνει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας στο πηνίο, με αποτέλεσμα ταχύτερες μεταβολές ρεύματος και παραμόρφωση της ημιτονοειδούς κυματομορφής εξόδου.

**Σφάλμα 4:** Η αύξηση της αντίστασης  $R_C$  του πυκνωτή κατά 20% αυξάνει τις εσωτερικές απώλειες θερμότητας στο φίλτρο εξόδου, μειώνοντας την αποδοτικότητα του αντιστροφέα και προκαλώντας θερμική καταπόνηση στον πυκνωτή.

**Σφάλμα 5:** Η μείωση της αυτεπαγωγής κατά 10% προκαλεί αντίστοιχες, αν και ηπιότερες, συνέπειες με το Σφάλμα 3, οδηγώντας σε αυξημένη κυμάτωση στην τάση εξόδου και αλλοίωση της φασματικής ποιότητας της εξόδου.

**Σφάλμα 6:** Η αύξηση της αντίστασης αγωγιμότητας του MOSFET ( $R_{on}$ ) κατά 35% οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες κατά την αγωγή φάση των διακοπών, με αποτέλεσμα αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας και μείωση της ενεργειακής απόδοσης.

**Σφάλμα 7:** Η αύξηση κατά 10% της αυτεπαγωγής και 7% της εσωτερικής αντίστασης του πηνίου  $R_L$  αυξάνει τις απώλειες αγωγής και την καθυστέρηση στην απόκριση, επηρεάζοντας τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος κατά τις εναλλαγές φορτίου.

**Σφάλμα 8:** Ο συνδυασμός μείωσης χωρητικότητας κατά 5%, αύξησης  $R_C$  κατά 6% και  $R_{on}$  κατά 10% επιφέρει πολλαπλές επιπτώσεις: αυξημένη κυμάτωση, μειωμένη αποδοτικότητα και μεγαλύτερη θερμική επιβάρυνση στα ενεργά και παθητικά εξαρτήματα.

**Σφάλμα 9:** Με ταυτόχρονη μείωση C κατά 10%, αύξηση  $R_C$  κατά 7%, L κατά 11% και  $R_L$  κατά 11%, το σύστημα παρουσιάζει σημαντικές καθυστερήσεις απόκρισης, αυξημένη κυμάτωση και

αυξημένη θερμότητα στα εξαρτήματα του κυκλώματος που επηρεάζουν την σταθερότητα της εξόδου.

**Σφάλμα 10:** Η περαιτέρω μεταβολή όλων των παραμέτρων ( $C$  κατά  $-6\%$ ,  $R_C$  κατά  $+12\%$ ,  $L$  κατά  $+11\%$ ,  $R_L$  κατά  $+23\%$ ) αυξάνει τη συνολική παραμόρφωση (THD) και επηρεάζει την ποιότητα ισχύος.

**Σφάλμα 11:** Πρόκειται για το πιο πολύπλοκο σφάλμα, με ταυτόχρονη μεταβολή σε όλες τις βασικές παραμέτρους ( $C$  κατά  $-9\%$ ,  $R_C$  κατά  $+13\%$ ,  $L$  κατά  $+22\%$ ,  $R_L$  κατά  $+14\%$ ,  $R_{on}$  κατά  $+11\%$ ). Ο αντιστροφέας παρουσιάζει έντονη παραμόρφωση εξόδου, σημαντικές απώλειες ισχύος και ενδεχόμενη αποτυχία τροφοδοσίας απαιτητικών φορτίων. Με τον όρο αποτυχία τροφοδοσίας προσδιορίζεται η δυνατότητα του αντιστροφέα να παρέχει επαρκή και σταθερή ισχύ σε φορτία που έχουν υψηλές απαιτήσεις σε τάση και ρεύμα, και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε παραμορφώσεις ή διακυμάνσεις της παροχής.

**Σφάλμα 12:** Η αποσύνδεση του πηνίου ( $L$  open circuit fault) αναιρεί τη λειτουργία του φίλτρου, οδηγώντας σε έντονη παραμόρφωση της εξόδου.

**Σφάλμα 13:** Η βραχυκύκλωση του πυκνωτή καταργεί τη δυνατότητα φιλτραρίσματος, δημιουργώντας πολύ υψηλή κυμάτωση ripple και υπερφόρτιση των διακοπών, με σοβαρό κίνδυνο βλάβης.

**Σφάλμα 14:** Η αύξηση της αντίστασης φορτίου κατά  $10\%$  μειώνει την κατανάλωση ρεύματος, οδηγώντας πιθανόν σε υπερτάσεις στην έξοδο, ειδικά αν δεν υπάρχει ρύθμιση τάσης, και επηρεάζοντας τη σταθερότητα σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου.

**Σφάλμα 15:** Η μείωση του φορτίου κατά  $8\%$  αυξάνει τη ζήτηση ρεύματος. Αν ο αντιστροφέας δεν μπορεί να το υποστηρίξει, οδηγείται σε πτώση τάσης, με πιθανότητα υπερφόρτωσης ή ενεργοποίησης εσωτερικών μηχανισμών προστασίας.

<b>Πίνακας 5-14 Σφάλματα λειτουργίας αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.</b>	
Σφάλμα 1	$-10\% \times C$
Σφάλμα 2	$-15\% \times C$
Σφάλμα 3	$+20\% \times R_C$
Σφάλμα 4	$-25\% \times L$
Σφάλμα 5	$+10\% \times R_C$
Σφάλμα 6	$+35\% \times R_{on}$
Σφάλμα 7	$+10\% \times L \ \&+ \ 7\% \times R_L$
Σφάλμα 8	$-5\% \times C \ \&+ \ 6\% \times R_C \ \&+ \ 10\% \times R_{on}$
Σφάλμα 9	$-10\% \times C \ \&+ \ 7\% \times R_C \ \&+ \ 11\% \times L \ \&+ \ 11\% \times R_L$
Σφάλμα 10	$-6\% \times C \ \&+ \ 12\% \times R_C \ \&+ \ 11\% \times L \ \&+ \ 23\% \times R_L$
Σφάλμα 11	$-9\% \times C \ \&+ \ 13\% \times R_C \ \&+ \ 22\% \times L \ \&+ \ 14\% \times R_L \ \&+ \ 11\% \times R_{on}$
Σφάλμα 12	L Open circuit fault
Σφάλμα 13	C Short circuit fault
Σφάλμα 14	$R_{load} +10\%$
Σφάλμα 15	$R_{load} -8\%$

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των 7 στατιστικών μεγεθών του μετατροπέα με λειτουργία σφάλματος με τις ακραίες τιμές που εκτιμούνται με χρήση ΓΑ.

**Πίνακας 5-15 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 1-5.**

	Σφάλμα 1	Σφάλμα 2	Σφάλμα 3	Σφάλμα 4	Σφάλμα 5
Εύρος	9.44%	6.05%	13.65%	0.40%	6.31%
Μέση τιμή	3.89%	2.54%	4.16%	0.02%	2.12%
Τυπική απόκλιση	8.18%	5.26%	12.67%	0.02%	5.88%
Ασυνμμετρία	2.40%	6.41%	5.97%	0.11%	2.77%
Κυρτότητα	3.22%	2.02%	2.40%	0.02%	0.00%
Εντροπία	9.78%	6.49%	13.53%	0.20%	6.74%
Κέντρο βάρους	1.66%	1.07%	1.21%	0.01%	0.55%

**Πίνακας 5-16 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 6-10.**

	Σφάλμα 6	Σφάλμα 7	Σφάλμα 8	Σφάλμα 9	Σφάλμα 10
Εύρος	0.35%	6.02%	3.03%	0.00%	0.37%
Μέση τιμή	0.24%	1.78%	1.25%	4.49%	4.24%
Τυπική απόκλιση	0.33%	4.94%	2.55%	0.50%	1.04%
Ασυμμετρία	0.00%	3.69%	3.30%	11.55%	10.84%
Κυρτότητα	0.00%	0.38%	0.96%	0.98%	0.77%
Εντροπία	0.00%	10.88%	3.28%	0.00%	0.00%
Κέντρο βάρους	0.01%	0.25%	0.52%	0.56%	0.45%

**Πίνακας 5-17 Ποσοστά απόκλισης στατιστικών μεγεθών μεταξύ κανονικών εξόδων και εξόδων με σφάλμα, για τις περιπτώσεις σφαλμάτων 11-15.**

	Σφάλμα 11	Σφάλμα 12	Σφάλμα 13	Σφάλμα 14	Σφάλμα 15
Εύρος	6.27%	100.00%	100.00%	1.06%	0.93%
Μέση τιμή	6.25%	100.00%	100.00%	4.54%	4.44%
Τυπική απόκλιση	6.02%	100.00%	100.00%	1.53%	1.32%
Ασυμμετρία	14.63%	100.00%	100.00%	1.19%	9.33%
Κυρτότητα	0.00%	100.00%	100.00%	0.42%	0.75%
Εντροπία	9.52%	1465.76%	465.76%	1.02%	0.00%
Κέντρο βάρους	0.00%	100.00%	100.00%	0.33%	0.43%

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους παραπάνω στους Πίνακες 5.15, 5.16 και 5.17 είναι εμφανές ότι όλα τα σφάλματα εντοπίζονται και στην περίπτωση του αντιστροφέα τάσης. Πιο αναλυτικά:

**Σφάλμα 1:** Αύξηση εύρους κατά 9.44% και τυπικής απόκλισης κατά 8.18%, με σημαντική αύξηση στην εντροπία 9.52%, υποδεικνύουν σημαντική αυξομείωση των τιμών της τάσης εξόδου στιγμιαία. Η μέση τιμή και οι υπόλοιποι δείκτες παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις, άρα η κύρια επίδραση του σφάλματος είναι η αύξηση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου.

**Σφάλμα 2:** Παρουσιάζει μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με το Σφάλμα 1 εύρος 6.05%, τυπική απόκλιση 5.26%, ωστόσο επιβεβαιώνεται η αύξηση της κυμάτωσης τάσης. Η κατανομή παραμένει συμμετρική, χωρίς μετατόπιση της μέσης τιμής.

**Σφάλμα 3:** Μέτριες και ήπιες μεταβολές σε όλα τα στατιστικά υποδηλώνουν ήπια μεταβολή της τάσης εξόδου λόγω μεταβολής της αυτεπαγωγής.

**Σφάλμα 4:** Πολύ μικρή αύξηση εύρους 0.40% χωρίς σημαντικές μεταβολές σε άλλα μεγέθη, υποδεικνύει χαμηλή ευαισθησία του αντιστροφέα σε αυτό το σφάλμα.

**Σφάλμα 5:** Μέτρια απόκλιση σε εύρος 6.31% και τυπική απόκλιση 5.88%, χωρίς μεταβολή μορφής κατανομής. Το σφάλμα έχει περιορισμένη αλλά ανιχνεύσιμη επίδραση.

**Σφάλμα 6:** Πολύ μικρές αποκλίσεις σε όλα τα μεγέθη βάρους δείχνουν μικρή απόκλιση της τάσης εξόδου από την κανονική. Το σφάλμα δεν έχει ουσιαστική επίδραση στη λειτουργία του μετατροπέα και είναι μη ανιχνεύσιμο από κοινές μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων όπως η απλή σύγκριση σημάτων.

**Σφάλμα 7:** Μέτριες αυξήσεις σε εύρος 6%, τυπική απόκλιση 4.9%, ασυμμετρία 3.6% και υψηλή εντροπία 10%. Το σφάλμα επηρεάζει την κυμάτωση και τη δομή του σήματος, χωρίς όμως να προκαλεί ακραίες διαταραχές στη λειτουργία του μετατροπέα.

**Σφάλμα 8:** Παρόμοιες μεταβολές με το Σφάλμα 7 αύξηση σε εύρος 3%, τυπική απόκλιση 2.5%, ασυμμετρία 3.3% και εντροπία 3.2%. Υποδεικνύει ήπια επίδραση με ενίσχυση των διακυμάνσεων.

**Σφάλμα 9:** Ελαφρώς μικρότερες αποκλίσεις σε εύρος 2.8% και τυπική απόκλιση 0.5%. Μεγαλύτερη απόκλιση σε ασυμμετρία 11.5%. Η κύρια διαταραχή αφορά την ασυμμετρία, δηλώνοντας μικρού βαθμού διαταραχή στην ισορροπία του σήματος.

**Σφάλμα 10:** Μικρές έως μέτριες αποκλίσεις σε εύρος 0.3%, τυπική απόκλιση 1% και ασυμμετρία 10.8%. Υποδηλώνει ήπια αλλαγή στη μορφή του σήματος εξόδου, χωρίς ουσιαστική επίπτωση στη συνολική λειτουργία του μετατροπέα.

**Σφάλμα 11:** Μέτρια επίδραση με εύρος 6.27%, τυπική απόκλιση 6.02%, μέση τιμή 6.25% και εντροπία 9.52%. Μεγαλύτερη επίδραση στην ασυμμετρία 14.63%. Παρότι δεν είναι καταστροφικό, δείχνει αξιοσημείωτη διαφοροποίηση της εξόδου. Αν και το σφάλμα δεν οδηγεί σε πλήρη αστοχία του συστήματος, η παραμορφωμένη και ασταθής έξοδος μπορεί να επηρεάσει τη σωστή λειτουργία του φορτίου ή να μειώσει τη συνολική απόδοση του μετατροπέα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια ή ευαισθησία στην ποιότητα ισχύος.

**Σφάλμα 12:** Το πιο ακραίο σφάλμα με 100% απόκλιση σε εύρος, 100% σε μέση τιμή, 100% σε ασυμμετρία και 100% σε κυρτότητα, δείχνει πλήρη κατάρρευση της λειτουργίας του κυκλώματος του αντιστροφέα ισχύος.

**Σφάλμα 13:** Παρόμοια ακραία συμπεριφορά με το Σφάλμα 12, με μεγάλα ποσοστά απόκλισης από τις ακραίες τιμές των 7 στατιστικών μεγεθών του αντιστροφέα. Το κύκλωμα του

αντιστροφέα δίνει μια εντελώς διαφορετική έξοδο τάσης από την κανονική και είναι εντελώς διαφοροποιημένο από τις προδιαγραφές του.

**Σφάλμα 14:** Μηδενική απόκλιση σε εύρος και τυπική απόκλιση, ασυμμετρία 1.19% και κυρτότητα 1.02%. Το σφάλμα έχει περιορισμένη επίδραση και εντοπίζεται κυρίως με λεπτομερή ανάλυση.

**Σφάλμα 15:** Ανεπαίσθητες μεταβολές σε εύρος 0.9%, τυπική απόκλιση 1.3% και ασυμμετρία 5.6%. Πρόκειται για πολύ ήπιο σφάλμα, με ελάχιστη επίδραση στη συμπεριφορά του μετατροπέα.



## 6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη χρησιμότητα των μεθόδων Gaussian Process Regression (GPR) και Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ) στην ανίχνευση σφαλμάτων σε μετατροπείς ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η GPR χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός προφίλ κανονικής λειτουργίας μέσω της εκτίμησης εύρους των εξόδων του μετατροπέα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις αναμενόμενες τιμές όσο και τα όρια αβεβαιότητας. Από την άλλη, ο ΓΑ εφαρμόστηκε για τη βελτιστοποίηση στατιστικών χαρακτηριστικών, όπως το εύρος, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, προκειμένου να εντοπιστούν οι ακραίες τιμές που περιγράφουν τη φυσιολογική συμπεριφορά του συστήματος και στη συνέχεια η σύγκρισή τους με τις τιμές των παραπάνω στατιστικών μεγεθών για τις εξόδους με σφάλμα για τον εντοπισμό σφαλμάτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η μέθοδος GPR επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια στις εκτιμήσεις, ενώ παράλληλα παρέχει και εκτιμήσεις αβεβαιότητας.
- Ο ΓΑ προσφέρει μια εύελικτη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση στον υπολογισμό παραμέτρων, αποδεικνύοντας την ικανότητά του να εντοπίζει βέλτιστες τιμές που ελαχιστοποιούν την απόκλιση από το προφίλ κανονικής λειτουργίας και εντοπίζουν οποιοδήποτε σφάλμα.
- Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διάγνωσης σφαλμάτων, ικανό να εντοπίζει ανωμαλίες, τόσο μέσω στατιστικών αποκλίσεων όσο και μέσω των αβεβαιοτήτων των προβλέψεων.

Η εφαρμογή τους σε έναν μετατροπέα τύπου Buck, σε έναν μετατροπέα τύπου Boost και έναν αντιστροφέα ισχύος πλήρους γέφυρας, έδειξε ότι οι μέθοδοι αυτές μπορούν να ανιχνεύσουν με επιτυχία σφάλματα με μικρές αποκλίσεις από τις κανονικές τιμές. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των μετατροπέων ισχύος, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους

βλάβης και εξασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία τους. Η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την ανίχνευση σφαλμάτων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της διάγνωσης βλαβών και στη μείωση του κόστους συντήρησης.

## 1. Περιορισμοί της Μεθόδου

Παρά τη συνολική επιτυχία των εφαρμοζόμενων μεθόδων, αναδείχθηκαν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εφαρμογή τους για την ανίχνευση σφαλμάτων σε μετατροπείς ισχύος, και σχετίζονται κυρίως με τη φύση των μεθόδων, τις απαιτήσεις τους σε δεδομένα και υπολογιστικούς πόρους, καθώς και τις παραδοχές των μοντέλων που χρησιμοποιούνται.

Αρχικά, υπάρχει ανάγκη για υψηλής ποιότητας δεδομένα καθώς και οι δύο μέθοδοι, το GPR και οι ΓΑ, βασίζονται σε δεδομένα υψηλής ποιότητας για να παράγουν ακριβή αποτελέσματα. Σφάλματα μέτρησης, θόρυβος ή ελλιπή δεδομένα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Ειδικά για τη GPR, η παρουσία ακραίων τιμών ή η έλλειψη επαρκούς δείγματος από τις φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας ενδέχεται να οδηγήσει σε ανακριβείς εκτιμήσεις, αυξάνοντας τον κίνδυνο ψευδών συναγερμών ή μη ανίχνευσης ανωμαλιών.

Δεύτερον, υπάρχουν υπολογιστικές απαιτήσεις σε σχέση με την εκπαίδευση του μοντέλου GPR και την εκτέλεση του ΓΑ, που απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλα σύνολα δεδομένων ή για βελτιστοποίηση πολλών παραμέτρων. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις αυξάνονται για τη GPR καθώς το μέγεθος του συνόλου δεδομένων αυξάνεται, ενώ για τον ΓΑ η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών μπορεί να απαιτήσει σημαντικό χρόνο εκτέλεσης, αποτελώντας εμπόδιο για την εφαρμογή των μεθόδων σε πραγματικό χρόνο ή σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους.

Τρίτον, η αποτελεσματικότητα των μεθόδων να εξαρτάται από την εγκυρότητα των υποθέσεων που γίνονται κατά την εφαρμογή τους. Για παράδειγμα:

1. Στη GPR, η επιλογή του πυρήνα (kernel) ίσως δεν αντικατοπτρίζει επαρκώς τη δυναμική του συστήματος, οδηγώντας σε ανεπαρκή προσαρμογή.
2. Στον ΓΑ, η απόδοση επηρεάζεται από την αρχικοποίηση του πληθυσμού, την επιλογή της συνάρτησης κόστους, και τις ρυθμίσεις των παραμέτρων, όπως ο ρυθμός διασταύρωσης και μετάλλαξης. Εάν αυτές οι παράμετροι δεν ρυθμιστούν σωστά, ο ΓΑ μπορεί να συγκλίνει σε τοπικά ελάχιστα αντί να βρει τη βέλτιστη λύση.

Τέλος, παρουσιάζουν ευαισθησία σε αρχικές ρυθμίσεις με τις παραμετροποιήσεις που απαιτούνται, όπως τα όρια των μεταβλητών στον ΓΑ ή οι αρχικές εκτιμήσεις στη GPR, να παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική απόδοση, ενώ εσφαλμένες αρχικές ρυθμίσεις πιθανόν καθυστερούν τη σύγκλιση ή οδηγούν σε υποδεέστερα αποτελέσματα.

Ένας βασικός τομέας βελτίωσης είναι η αυτοματοποίηση των παραμετρικών ρυθμίσεων. Η χρήση τεχνικών όπως η βελτιστοποίηση Bayes (Bayesian Optimization) διευκολύνει την επιλογή κατάλληλων τιμών για τα όρια των παραμέτρων ή τους πυρήνες της GPR, μειώνοντας την εξάρτηση από την ανθρώπινη παρέμβαση. Παράλληλα, η μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων μέσω πιο αποδοτικών αλγορίθμων ή παράλληλης επεξεργασίας μπορεί να επιτρέψει τη χρήση αυτών των μεθόδων σε πραγματικό χρόνο, ενώ η ενσωμάτωση τεχνικών εξομάλυνσης (regularization) ενισχύει την ακρίβεια των προβλέψεων σε θορυβώδη δεδομένα.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες κατηγορίες μετατροπέων, όπως οι τριφασικοί ή οι πολυεπίπεδοι (multilevel converters), οι οποίοι παρουσιάζουν πιο σύνθετη δυναμική λειτουργία. Επίσης, η δυναμική παρακολούθηση κατά τις μεταβατικές συνθήκες, όπως οι εκκινήσεις ή οι αλλαγές φορτίου, παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον. Παράλληλα, η εφαρμογή της μεθόδου σε μετατροπείς που συνδέονται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες, συμβάλλει στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των συστημάτων αυτών, που είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Στο πεδίο της μελλοντικής έρευνας, προτείνεται η διεξαγωγή μελετών που θα εστιάζουν στην αντοχή των προτεινόμενων μεθόδων σε διαφορετικά είδη σφαλμάτων, όπως σφάλματα αισθητήρων ή δομικά σφάλματα, υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

Με τις παραπάνω προοπτικές, οι μέθοδοι που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία μπορούν να εξελιχθούν περαιτέρω και να προσφέρουν πιο ολοκληρωμένες λύσεις για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των συστημάτων μετατροπής ισχύος.

---

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Raman R., Gunasekar S., Kaliyaperumal D., Nedungadi P. Navigating the Nexus of Artificial Intelligence and Renewable Energy for the Advancement of Sustainable Development Goals. *Sustainability* 2024, 16, 9144.
- [2] Thakfan A., Bin Salamah Y., Artificial-Intelligence-Based Detection of Defects and Faults in Photovoltaic Systems: A Survey. *Energies* 2024, 17, 4807.
- [3] Abdel-Aziz A., Elgenedy M.A., Williams B., A Comparative Review of Three Different Power Inverters for DC–AC Applications. *Energies* 2023, 16, 7254.
- [4] Al-Katheri A.A., Al-Ammar E.A., Alotaibi M.A., Ko W., Park S., Choi H.-J., Application of Artificial Intelligence in PV Fault Detection. *Sustainability* 2022, 14, 13815.
- [5] Gao X., Feng H., AI-Driven Productivity Gains: Artificial Intelligence and Firm Productivity. *Sustainability* 2023, 15, 8934.
- [6] Abdel-Aziz A., Elgenedy M.A., Williams B., A Comparative Review of Three Different Power Inverters for DC–AC Applications. *Energies* 2023, 16, 7254.
- [7] Kumar A., Sivagami P., Pushpavalli M., Meet M., Abirami P., Srideviponmalar P., "Analysis of Converters for Photovoltaic System," *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, 2022.
- [8] Zelba M., Deveikis T., Barakauskas J., Baronas A., Gudžius S., Jonaitis A., Giannakis A., A Grid-Tied Inverter with Renewable Energy Source Integration in an Off-Grid System with a Functional Experimental Prototype. *Sustainability* 2022, 14, 13110.

- [9] Khalid W., Awais Q., Jamil M., Khan A.A., Dynamic Simulation and Optimization of Off-Grid Hybrid Power Systems for Sustainable Rural Development. *Electronics* 2024, 13, 2487.
- [10] Afshari H., Husev O., Matiushkin O., Vinnikov D., A Review of Hybrid Converter Topologies. *Energies* 2022, 15, 9341.
- [11] Lim S.-C., Kim B.-G., Kim J.-C., Analysis of Inverter Efficiency Using Photovoltaic Power Generation Element Parameters. *Sensors* 2024, 24, 6390.
- [12] Seifi K., Moallem M., Synchronization and Control of a Single-Phase Grid-Tied Inverter under Harmonic Distortion. *Electronics* 2023, 12, 860.
- [13] Villanueva I., Vázquez N., Vaquero J., Hernández C., López-Tapia H., Osorio-Sánchez R., Photovoltaic Inverter Reliability Study through SiC Switches Redundant Structures. *Technologies* 2023, 11, 59.
- [14] Tranco E., Ibarra E., Prieto P., Arias A., Lis A., Pai A.P., Novel Thermal Management Strategy for Improved Inverter Reliability in Electric Vehicles. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8024.
- [15] Hidalgo H., Orosco R., Huerta H., Vázquez N., Hernández C., Pinto S., A High-Voltage-Gain DC–DC Boost Converter with Zero-Ripple Input Current for Renewable Applications. *Energies* 2023, 16, 4860.
- [16] Corti F., Meshram V.S., Casaucao I., Triviño-Cabrera A., Reatti A., López-Alcolea F.J., Educational Workshop on STM32 Digital Control in Buck Converters: Design, Development, and Online Resources. *Electronics* 2024, 13, 3207.
- [17] Andrade P., Alcaso A.N., Bento F., Marques Cardoso A.J., Buck-Boost DC-DC Converters for Fuel Cell Applications in DC Microgrids—State-of-the-Art. *Electronics* 2022, 11, 3941.
- [18] Abramushkina E., Zhaksylyk A., Geury T., El Baghdadi M., Hegazy O., A Thorough Review of Cooling Concepts and Thermal Management Techniques for Automotive WBG Inverters: Topology, Technology and Integration Level. *Energies* 2021, 14, 4981.
- [19] Kathe M.L., Makokha A.B., Zachary S.O., Adaramola M.S., A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems. *Energies* 2023, 16, 2206.

- [20] Gil-Velasco A., Aguilar-Castillo C., A Modification of the Perturb and Observe Method to Improve the Energy Harvesting of PV Systems under Partial Shading Conditions. *Energies* 2021, 14, 2521.
- [21] Li C., Chen Y., Zhou D., Liu J., Zeng J., A High-Performance Adaptive Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Energies* 2016, 9, 288.
- [22] Ortiz A., Mendez E., Macias I., Molina A., Earthquake Algorithm-Based Voltage Referenced MPPT Implementation through a Standardized Validation Frame. *Energies* 2022, 15, 8971.
- [23] Prokopenya A., Minglibayev M., Ibraimova A., Perturbation Methods in Solving the Problem of Two Bodies of Variable Masses with Application of Computer Algebra. *Appl. Sci.* 2024, 14, 11669.
- [24] Sayed E.T., Olabi A.G., Alami A.H., Radwan A., Mdallal A., Rezk A., Abdelkareem M.A., Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies* 2023, 16, 1415.
- [25] Hasan M.A., Vemula N.K., Devarapalli R., Knypiński Ł., Investigation into PV Inverter Topologies from the Standards Compliance Viewpoint. *Energies* 2024, 17, 3879.
- [26] Ji Y., Giangrande P., Madonna V., Zhao W., Galea M., Reliability-Oriented Design of Inverter-Fed Low-Voltage Electrical Machines: Potential Solutions. *Energies* 2021, 14, 4144.
- [27] Dimitrijević M., Petronijević M., Klimenta D., Evaluation of Photovoltaic Inverters According to Output Current Distortion in a Steady-State and Maximum Power Point Tracking. *Appl. Sci.* 2025, 15, 1110.
- [28] Chmielowiec K., Topolski Ł., Dutka M., Piszczek A., Hanzelka Z., Rodziewicz T., Technical Requirements of Photovoltaic Inverters for Low Voltage Distribution Networks. *Inventions* 2024, 9, 91.
- [29] Sujeeth A., Di Cataldo A., Tornello L.D., Pulvirenti M., Salvo L., Sciacca A.G., Scelba G., Cacciato M., Power Loss Modelling and Performance Comparison of Three-Level GaN-Based Inverters Used for Electric Traction. *Energies* 2024, 17, 595.
- [30] Beshir A.H., Wan L., Grassi F., Crovetto P.S., Liu X., Wu X., El Sayed W., Spadacini G., Pignari S.A., Electromagnetic Interference of Power Converter with Random Modulation on the Power Line Communication System. *Electronics* 2021, 10, 297.

- [31] Ajra Y., Hoblos G., Al Sheikh H., Moubayed N., A Literature Review of Fault Detection and Diagnostic Methods in Three-Phase Voltage-Source Inverters. *Machines* 2024, 12, 631.
- [32] Pannawan A., Kaewchum T., Saeseiw C., Pachanapan P., Hinkkanen M., Somkun S., Design and Implementation of Single-Phase Grid-Connected Low-Voltage Battery Inverter for Residential Applications. *Electronics* 2024, 13, 1014.
- [33] Cai C., Zaghloul M., Li B., Data Clustering in Urban Computational Modeling by Integrated Geometry and Imagery Features for Probabilistic Navigation. *Appl. Sci.* 2022, 12, 12704.
- [34] Rastogi A.K., Taterh S., Kumar B.S., Dimensionality Reduction Algorithms in Machine Learning: A Theoretical and Experimental Comparison. *Eng. Proc.* 2023, 59, 82.
- [35] Tao Y., Jia Z., Ma R., Xu S., TRIG: Transformer-Based Text Recognizer with Initial Embedding Guidance. *Electronics* 2021, 10, 2780.
- [36] Hu X., Sun Y., A Deep Reinforcement Learning-Based Power Resource Management for Fuel Cell Powered Data Centers. *Electronics* 2020, 9, 2054.
- [37] Mienye I.D., Swart T.G., A Comprehensive Review of Deep Learning: Architectures, Recent Advances, and Applications. *Information* 2024, 15, 755.
- [38] Teso-Fz-Betoño A., Zulueta E., Cabezas-Olivenza M., Teso-Fz-Betoño D., Fernandez-Gamiz U., A Study of Learning Issues in Feedforward Neural Networks. *Mathematics* 2022, 10, 3206.
- [39] Mienye, I.D., Swart T.G., Obaido G., Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications. *Information* 2024, 15, 517.
- [40] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Genetic\\_algorithm.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Genetic_algorithm.png)
- [41] Venetis J.C., An Explicit Form of Ramp Function. *AppliedMath* 2024, 4, 442-451.
- [42] Majidzadeh Gorjani O., Byrtus R., Dohnal J., Bilik P., Koziorek J., Martinek R. Human, Activity Classification Using Multilayer Perceptron. *Sensors* 2021, 21, 6207.
- [43] Ding H., Hou H., Wang L., Cui X., Yu W., Wilson D.I., Application of Convolutional Neural Networks and Recurrent Neural Networks in Food Safety. *Foods* 2025, 14, 247.
- [44] Lalapura V.S., Bhimavarapu V.R., Amudha J., Satheesh H.S., A Systematic Evaluation of Recurrent Neural Network Models for Edge Intelligence and Human Activity Recognition Applications. *Algorithms* 2024, 17, 104.

- [45] Malashin I., Tynchenko V., Gantimurov A., Nelyub V., Borodulin A., Applications of Long Short-Term Memory (LSTM) Networks in Polymeric Sciences: A Review. *Polymers* 2024, 16, 2607.
- [46] Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber, Long Short-Term Memory. *Neural Comput* 1997; 9 (8): 1735–1780.
- [47] Bi L., Hu G., Raza M.M., Kandel Y., Leandro L., Mueller D., A Gated Recurrent Units (GRU)-Based Model for Early Detection of Soybean Sudden Death Syndrome through Time-Series Satellite Imagery. *Remote Sens.* 2020, 12, 3621.
- [48] Kochan D., Yang X., Gaussian Process Regression with Soft Equality Constraints. *Mathematics* 2025, 13, 353.
- [49] Kotyrba M., Volna E., Habiballa H., Czyz J., The Influence of Genetic Algorithms on Learning Possibilities of Artificial Neural Networks. *Computers* 2022, 11, 70.
- [50] <https://arka360.com/ros/grid-tied-grid-interactive-inverters-difference/> .
- [51] <https://www.ttenergy.com/product/off-grid-solar-hybrid-inverter-48vdc-7000w/> .
- [52] <https://www.oupot.com/hybrid-inverter-installation/> .
- [53] <https://www.devobox.com/el/dc-to-dc-gr/685-dc-dc-step-up-boost-converter-3v-to-5v-1a-gr.html> .
- [54] <https://www.hellasdigital.gr/electronics/boost-and-buck-converters/dc-dc-buck-converter-step-down-lm2596-1.23v-30v/?sl=en> .
- [55] <https://www.amazon.sa/-/en/LM2596-Converter-Step-Down-Up/dp/B0129HYAW0> .
- [56] <https://www.sunpower-uk.com/industries/on-board-ev-vehicle-power/> .
- [57] <https://www.victronenergy.gr/solar-charge-controllers/mppt7510> .
- [58] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuron3.svg>
- [59] <https://diceus.com/ai-for-image-recognition/>
- [60] <https://pub.towardsai.net/overview-of-vision-transformers-is-all-you-need-88727438ff8d>
- [61] <https://huggingface.co/papers/2410.01201>
- [62] <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/3/432>
- [63] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X21000401>



