



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ &  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη διάταξης ασαφούς ελέγχου βελτιστοποίησης της απόδοσης φωτοβολταϊκής  
γεννήτριας στο Simulink του Matlab**

**Φοιτητής: Μανούχος Ευάγγελος, 40676**

**Επιβλέπων: Δρ. Παπαγέωργας Παναγιώτης, Καθηγητής**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020**

Ανάπτυξη διάταξης ασαφούς ελέγχου βελτιστοποίησης της απόδοσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας  
στο Simulink του Matlab



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS  
ENGINEERING

**DEGREE THESIS**

**Development of Fuzzy Logic Controller to optimize photovoltaic generator performance in  
Matlab Simulink**

**Undergraduate: Manouchos Evangelos, 40676**

**Supervisor: Dr. Papageorgas Panagiotis, Professor**

**EGALEO, FEBRUARY 2020**

**Copyright © Μανούχος Ευάγγελος, 17/02/2020**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ &  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη διάταξης ασαφούς ελέγχου βελτιστοποίησης της  
απόδοσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο Simulink του  
Matlab**

**Πτυχιακή Εργασία**

**Μανούχος Ευάγγελος, 40676**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**ΔΡ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΑΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ**

**ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Παπαγεώργας Παναγιώτης

**Εξεταστής  
(Καθηγητής)**

Βόκας Γεώργιος

**Εξεταστής  
(Καθηγητής)**

Μετάφας Δημήτριος

**Εξεταστής  
(Επίκουρος Καθηγητής)**

## Περίληψη

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταϊκών (PV) κυττάρων είναι η καλύτερη εναλλακτική λύση για τη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, καθώς αποτελεί μία ανανεώσιμη πράσινη ενέργεια, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη διαχείριση της από πλευράς ζήτησης. Η ηλιακή ενέργεια συμβάλει στην αειφόρο ανάπτυξη του πλανήτη, το οποίο το οφείλει στη μη γραμμική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης της. Πάραυτα, η χαρακτηριστική της αποτελεί και τον λόγο που είναι δύσκολο να εντοπιστεί η μέγιστη παραγωγή ισχύος από τη φωτοβολταϊκή μονάδα υπό ποικίλες συνθήκες. Η ισχύς εξόδου μιας φωτοβολταϊκής μονάδας εξαρτάται κυρίως από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία οπότε, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν ελεγκτές ανίχνευσης των μέγιστων σημείων ισχύος (MPPT) ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις των κλιματικών συνθηκών. Από τις πιο εύκολες στην εφαρμογή και οικονομικές λύσεις, όσον αφορά τους ελεγκτές MPPT, είναι ο αλγόριθμος διαταραχής και παρατήρησης (P&O) που συναντάμε συχνά σε εμπορικές εφαρμογές, παρόλο που παρουσιάζει έντονα προβλήματα ταλάντωσης γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) και συνεπώς απόδοσης. Η βελτίωση των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται χάρη στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, αποτελεί ένα σημαντικό στόχο προς επίτευξη για τους ερευνητές. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει το σχεδιασμό ενός ασαφούς ελεγκτή για την ανίχνευση και παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Το εργαλείο προσομοίωσης Simulink, που παρέχεται από το λογισμικό Matlab, χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και την αναπαράσταση μοντέλων των διατάξεων ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος της τάξης των 0,3 W. Αναλυτικά απαρτίζεται από τη φωτοβολταϊκή μονάδα, τον DC-DC μετατροπέα τοπολογίας Cuk και τον ασαφή ελεγκτή MPPT. Έμφαση δόθηκε στη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου για τη φωτοβολταϊκή μονάδα που να υπολογίζει μόνο την παράμετρο ελέγχου της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης. Επιπροσθέτως, σχεδιάστηκε ένας ελεγκτής P&O για την ανάλυσή και σύγκρισή του με τον ασαφή ελεγκτή σε θέματα όπως ο χρόνος απόκρισης, η απώλεια ισχύος και οι ταλαντώσεις στο σημείο ισορροπίας.

## Λέξεις – κλειδιά

Ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκή γεννήτρια, σημείο μέγιστης ισχύος, ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος, ασαφής λογική, ασαφής ελεγκτής, ελεγκτής P&O, μετατροπέας ισχύος τοπολογίας Cuk, προσέγγιση βασισμένη στη σχεδίαση μοντέλων, Matlab

## **Abstract**

Generating electric power using photovoltaic (PV) cells is the best alternative for reducing fossil fuel consumption, as it is a renewable green energy, thus contributing to energy saving and management in terms of demand. Solar energy contributes to the sustainable development of the planet, which is possible due to its non-linear current-voltage curve. However, the characteristic curve is also the reason why it is difficult to detect the maximum power output from the photovoltaic system under varying conditions. The output power of a photovoltaic module depends mainly on the falling solar radiation and temperature, to implement MPPT trackers to achieve the maximum power tracking of a photovoltaic system regardless the regardless of the variations in weather conditions. One of the easiest to implement and economical solutions for MPPT controllers is the Perturb and Observation algorithm (P&O) that is often used for commercial applications, although it has intense oscillation problems around the maximum power point (MPP) and hence the performance. Improving the results obtained with this algorithm is an important goal for researchers. This paper presents the design of a fuzzy logic controller for tracking the maximum power point of a photovoltaic system. Simulink, a simulation tool provided by Matlab software, was used to model a 0.3 W hybrid photovoltaic system. Specifically, it consists of the photovoltaic module, the Ćuk power converter and the fuzzy MPPT controller. Emphasis was placed on using a mathematical model for the photovoltaic module to calculate only the control parameter of the power-voltage curve. In addition, a P&O controller was designed for the analysis compared to the fuzzy controller, for the response time, power loss and oscillations in the operating point.

## **Keywords**

Solar energy, photovoltaic generator, MPP, MPPT, fuzzy logic, fuzzy logic controller (FLC), P&O controller, Ćuk power converter, model-based design, Matlab

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Μεθοδολογία.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>Δομή.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....</b>	<b>12</b>
2.1.1	Το ενεργειακό ζήτημα .....	12
2.1.2	Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	13
<b>2.2</b>	<b>Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....</b>	<b>14</b>
2.2.1	Ο ημιαγωγός.....	14
2.2.2	Η διαδικασία της πρόσμειξης.....	15
2.2.3	Η ένωση p-n .....	16
<b>2.3</b>	<b>Φωτοβολταϊκή τεχνολογία .....</b>	<b>17</b>
2.3.1	Το ηλιακό κύτταρο .....	17
2.3.2	Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια .....	18
2.3.3	Οι τύποι των ηλιακών κυττάρων.....	18
<b>2.4</b>	<b>Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά .....</b>	<b>21</b>
2.4.1	Το ισοδύναμο κύκλωμα του ηλιακού κυττάρου .....	21
2.4.2	Το ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας .....	22
2.4.3	Η χαρακτηριστική I-V .....	22
2.4.4	Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου.....	24
2.4.5	Η συμπεριφορά του συστήματος σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.....	25
<b>2.5</b>	<b>Φωτοβολταϊκό σύστημα .....</b>	<b>27</b>
2.5.1	Οι τύποι των φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	27
2.5.2	Η δομή του φωτοβολταϊκού συστήματος.....	29
<b>3</b>	<b>Ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Συστήματα MPPT.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Διάταξη ελέγχου.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Τεχνικές MPPT.....</b>	<b>32</b>
3.3.1	Κατηγοριοποίηση και αξιολόγηση των τεχνικών .....	32
3.3.2	Οι συμβατικές τεχνικές .....	34
3.3.3	Οι ευφυείς τεχνικές .....	40
<b>3.4</b>	<b>Διάταξη Ισχύος .....</b>	<b>41</b>
3.4.1	Η αρχή λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος .....	41
3.4.2	Οι βασικές τοπολογίες μετατροπέων ισχύων για τα συστήματα MPPT.....	42

<b>4</b>	<b>Ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος με τη βοήθεια της Ασαφούς Λογικής .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Εισαγωγή στην ασαφή λογική.....</b>	<b>45</b>
4.1.1	Τα ασαφή σύνολα.....	45
4.1.2	Οι συναρτήσεις συμμετοχής .....	46
4.1.3	Οι ασαφείς τελεστές.....	48
4.1.4	Οι σαφείς κανόνες.....	49
4.1.5	Ο ασαφής συλλογισμός.....	49
4.1.6	Το σύστημα ασαφούς συμπερασμού (FIS) .....	51
4.1.7	Οι μηχανισμοί συμπερασμού Mamdani-Sugeno .....	52
<b>4.2</b>	<b>Σχεδιασμός του φωτοβολταϊκού πλαισίου .....</b>	<b>53</b>
4.2.1	Προσδιορισμός του φωτορεύματος $I_{ph}$ .....	53
4.2.2	Προσδιορισμός του ρεύματος της διόδου $I_D$ .....	54
4.2.3	Προσδιορισμός του ρεύματος διαρροής $I_{sh}$ .....	55
4.2.4	Προσδιορισμός του ρεύματος του πλαισίου $I_{pv}$ .....	55
4.2.5	Προσδιορισμός των πέντε φωτοβολταϊκών παραμέτρων $m_D$ , $I_{ph,n}$ , $I_{0,n}$ , $R_s$ και $R_{sh}$ .....	55
<b>4.3</b>	<b>Σχεδιασμός του μετατροπέα ισχύος τοπολογίας <math>\Sigma_{uk}</math>.....</b>	<b>56</b>
4.3.1	Η αρχή λειτουργίας της τοπολογίας της προσομοίωσης.....	56
4.3.2	Προσδιορισμός των παθητικών στοιχείων.....	58
4.3.3	Τα κριτήρια επιλογής της τοπολογίας της προσομοίωσης.....	58
<b>4.4</b>	<b>Σχεδιασμός του ασαφούς ελεγκτή MPPT .....</b>	<b>58</b>
4.4.1	Η ασαφοποίηση.....	59
4.4.2	Ο μηχανισμός του ασαφούς συμπερασμού.....	59
4.4.3	Η αποασαφοποίηση.....	62
<b>4.5</b>	<b>Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού συστήματος .....</b>	<b>62</b>
4.5.1	Περιορισμοί του συστήματος.....	62
4.5.2	Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου .....	62
4.5.3	Το μοντέλο της διάταξης ισχύος .....	64
4.5.4	Το μοντέλο της διάταξης ελέγχου .....	65
<b>4.6</b>	<b>Αποτελέσματα.....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>Επίλογος .....</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Αναφορές / Links .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Κατάλογος Πινάκων.....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Κατάλογος Σχημάτων .....</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>Αλφαβητικό Ευρετήριο .....</b>	<b>80</b>
<b>11</b>	<b>Παραρτήματα .....</b>	<b>84</b>



Ανάπτυξη διάταξης ασαφούς ελέγχου βελτιστοποίησης της απόδοσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας  
στο Simulink του Matlab

<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>84</b>
<b>Παράρτημα Β.....</b>	<b>87</b>
<b>Παράρτημα Γ.....</b>	<b>90</b>
<b>Παράρτημα Δ.....</b>	<b>91</b>
<b>Παράρτημα Ε.....</b>	<b>97</b>