

Πτυχιακή εργασία

**Μοντελοποίηση και ανάλυση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
χαμηλής αδράνειας της Κύπρου και προτεινόμενες λύσεις μέσω
μπαταριών Grid Forming με τη χρήση του λογισμικού STEPSS**

ΓΙΩΡΓΟΣ ΘΕΟΛΟΓΟΥ

Λεμεσός, Μάιος 2025



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΗΜΠ 412 - Διπλωματική Εργασία Ακαδημαϊκό έτος 2024-2025

Όνομα Φοιτητή / ΑΦΤ: Γιώργος Θεοτόκης / 22902

Βαθμός: 9.5

Τίτλος: Παραδοσιακή και σύγχρονη διατ. γλ. επεξεργασία αλφάνηδας με τη
και προτεινόμενες λύσεις μέσω ψηφιακών Ανθ. λογ. με χρήση STEP

Επιβλέπων Καθηγητής:

Παύλος Αριστείδης
Όνομα

[Signature]
Υπογραφή

29/05/2025
Ημερ.

Εξεταστής 1:

Χρήστος Λοίζου
Όνομα

[Signature]
Υπογραφή

29/05/2025
Ημερ.

Εξεταστής 2:

Χρήστος Λοίζου
Όνομα

[Signature]
Υπογραφή

29/05/2025
Ημερ.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

Μοντελοποίηση και ανάλυση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
χαμηλής αδράνειας της Κύπρου και προτεινόμενες λύσεις μέσω μπαταριών
Grid Forming με τη χρήση του λογισμικού STEPSS

ΓΙΩΡΓΟΣ ΘΕΟΛΟΓΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αριστείδου Πέτρος

Επίκουρος Καθηγητής

Λεμεσός, Μάιος 2025

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Γιώργος Θεολόγου, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου και στην κοπέλα μου για την πολύτιμη στήριξη, την κατανόηση και την ηθική ενίσχυση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερη μνεία οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Πέτρος Αριστείδου, για την καθοδήγηση, την επιστημονική υποστήριξη και τη διαρκή του διαθεσιμότητα, που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της πτυχιακής μου μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	10
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΑΤΩΝ.....	11
ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	13
ΛΙΣΤΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	15
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	16
1 Εισαγωγή	17
1.1 Συμβολή της αδράνειας στο ηλεκτρικό σύστημα.....	18
1.2 Ποιο το πρόβλημα που δημιουργείται/και γιατί λόγω των ΑΠΕ και ποια τα μειονεκτήματα	21
1.3 Τεχνολογίες Grid Forming/Grid Following.....	24
1.3.1 Που εφαρμόζονται οι τεχνολογίες Grid Forming/Grid Following	24
1.3.2 Χαρακτηριστικά, Διαφορές και Πλεονεκτήματα των Grid Forming/Grid Following Τεχνολογιών	25
1.3.3 Παραδείγματα Τεχνολογιών Grid Forming/Grid Following	26
1.4 Σκοπός της εργασίας.....	26
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	28
2.1 Μέθοδοι ανάλυσης συστημάτων χαμηλής αδράνειας	28
2.1.1 Συγχρονιστικά αντισταθμιστικά συστήματα (Synchronous Condensers)	29
2.1.2 Έλεγχος γωνίας περιστροφής ρότορα/πτερυγίων(Rotor Speed Control)	30
2.1.3 Διάφορες άλλες μέθοδοι	32
2.2 Τεχνολογίες Grid Forming/Grid Following για συστήματα χαμηλής αδράνειας 33	
2.2.1 Διαχείριση με βρόχο Droop (Droop Control).....	33

2.2.2	Συνθετική και εικονική αδράνεια	34
2.2.3	Χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας-μπαταρίες και υπερπυκνωτές	35
3	Μεθοδολογία.....	37
3.1	Ποιες αναμένεται να είναι οι θετικές αλλά και οι αρνητικές επιπτώσεις με την εγκατάσταση της τεχνολογίας Grid Forming	39
3.2	Λογισμικό STEPSS.....	40
3.3	Μελέτες που πρέπει να διεξαχθούν για την αντικατάσταση των/μέρος γεννητριών με τη τεχνολογία Grid Forming όπως μπαταρίες	41
3.4	Τι αναμένεται να επηρεαστεί στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με την εγκατάσταση των Grid Forming	42
3.5	Τι είδους σενάρια/προσομοιώσεων πρέπει να γίνουν για να επιβεβαιωθεί η σωστή μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος αλλά και η επιτυχής εγκατάσταση των Grid Forming	42
3.6	Δυναμικά δεδομένα	43
3.6.1	Μοντελοποίηση γεννητριών	44
3.6.2	Μοντελοποίηση φορτίων	45
3.6.3	Μοντελοποίηση πηνίων/πυκνωτών και ορισμός της συχνότητας	45
3.7	Στατικά δεδομένα	46
3.7.1	Μοντελοποίηση ζυγών.....	46
3.7.2	Μοντελοποίηση γραμμών.....	47
3.7.3	Μοντελοποίηση μετασχηματιστών.....	48
3.7.4	Μοντελοποίηση γεννητριών και ορισμός του slack bus.....	49
3.8	Επιπρόσθετα αρχεία που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν	50
3.9	Εφαρμογή τεχνολογίας Grid Forming στο μοντελοποιημένο σύστημα	50
3.10	Υποθέσεις Μοντελοποίησης.....	52
3.11	Διαδικασία εκτέλεσης προσομοιώσεων στο πρόγραμμα STEPSS.....	53

3.11.1 Προσθήκη αρχείων στο πρόγραμμα	53
3.11.2 Εκτέλεση προσομοιώσεων.....	55
4 Αποτελέσματα.....	57
4.1 Αντιπαραβολή μοντελοποιημένου συστήματος με το αρχικό	57
4.2 Συμπεριφορά του συστήματος με την εισχώρηση του Grid Forming	72
4.2.1 Σενάριο χαμηλού φορτίου	72
4.2.2 Σενάριο υψηλού φορτίου	75
5 Συμπεράσματα	77
6 Μελλοντική Έρευνα	79
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα χαμηλής αδράνειας αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα στις μέρες μας, καθώς είναι ένα πολυσυζητημένο θέμα. Με τον όρο αδράνεια στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, αναφερόμαστε στην κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα περιστρεφόμενα μέρη των σύγχρονων μηχανών. Πιο συγκεκριμένα, συστήματα χαμηλής αδράνειας ονομάζονται αυτά τα οποία με το καιρό απομακρύνονται από τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής ενέργειας και στρέφονται κυρίως στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Έτσι λοιπόν, λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι περισσότερες χώρες έβαλαν στόχο μέσα στα επόμενα χρόνια να κινηθούν πιο “πράσινα” και να χρησιμοποιούν όσο το λιγότερο δυνατό σύγχρονες μηχανές, οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα, όπου η χρήση τους είναι βλαβερή προς το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό όμως περιέχει προκλήσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν σημαντικά υπόψη. Η αδράνεια αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στο σύστημα αφού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν “back up” επιλογή σε περίπτωση που παρουσιαστεί μια ανωμαλία στο σύστημα. Από την άλλη πλευρά, οι ΑΠΕ οι οποίες συνδέονται στο σύστημα με ηλεκτρονικά ισχύος, έχουν σχετικά χαμηλά ποσοστά αδράνειας με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δώσει στο σύστημα την απαραίτητη ασφάλεια και αξιοπιστία. Έτσι, ειδικά στη Κύπρο το οποίο είναι ένα νησί το οποίο φημίζεται για τον ήλιο, όσο και για τον άνεμο, το ζήτημα και ο στόχος είναι οι ΑΠΕ να είναι η κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό όμως, είναι ένα σημαντικό πρόβλημα αφού αυτές οι πηγές ενέργειες αποσυνδέουν τις σύγχρονες γεννήτριες από το σύστημα, οι οποίες είναι αυτές που δίνουν και την κατάλληλη αδράνεια στο δίκτυο. Στην παρούσα εργασία θα θίξουμε το θέμα όσο αφορά το πρόβλημα της χαμηλής αδράνειας στα μελλοντικά σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς θα εστιάσουμε σε πιθανούς τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος για ολόκληρο το κόσμο και πιο συγκεκριμένα την Κύπρο. Ακολούθως, θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση με βάση διάφορες έρευνες ώστε να αναφερθούν και να συζητηθούν μερικές από τις προτεινόμενες λύσεις που δόθηκαν για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Επιπρόσθετα, θα παρθούν τα δεδομένα για το δυναμικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου από το DigSILENT PowerFactory και έπειτα θα μοντελοποιηθεί το Κυπριακό σύστημα στο λογισμικό STEPSS. Θα γίνει η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, θα ενσωματωθούν τεχνολογίες Grid Forming στο Κυπριακό σύστημα και τέλος θα εκτελεστούν και θα συγκριθούν αρκετές προσομοιώσεις

για διάφορα σενάρια, με διαφορετικά μέσα, με σκοπό να βρεθεί ο καταλληλότερος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της χαμηλής αδράνειας.

Λέξεις κλειδιά: Χαμηλή Αδράνεια, Προβλήματα, Προτεινόμενες Λύσεις, Grid Forming, Δυναμική Συμπεριφορά, STEPSS.

ABSTRACT

Low-inertia systems represent a significant issue today, as they are a widely discussed topic. In the context of electric power systems, inertia refers to the kinetic energy stored in the rotating parts of synchronous machines. More specifically, low-inertia systems are those that, over time, move away from traditional methods of energy generation and shift mainly toward renewable energy sources (RES). Due to climate change, most countries have set a goal to transition to greener practices in the coming years, aiming to minimize the use of conventional machines, which until now have been harmful to the environment. However, this transition presents challenges that must be carefully considered. Inertia plays an important role in the system, as it can serve as a backup option in case of a disturbance. On the other hand, RES connected to the grid via power electronics have relatively low levels of inertia, meaning they cannot provide the system with the necessary stability and reliability. Particularly in Cyprus, a country known for its abundance of sun and wind, the aim is for RES to become the primary source of electricity generation. However, this poses a major problem, as these energy sources lead to the disconnection of conventional generators from the system, which are the ones that provide the necessary inertia to the grid. This paper will address the issue of low inertia in future power generation systems and focus on possible solutions to the problem both globally and more specifically in Cyprus. A literature review will follow, based on various studies that present and discuss some of the proposed solutions to address this challenge. Additionally, data for Cyprus's dynamic power system will be obtained from DigSILENT PowerFactory, and the Cypriot system will be modeled in the STEPSS software. The system's dynamic behavior will be analyzed, Grid Forming technologies will be integrated into the Cypriot grid, and various simulations will be performed and compared across different scenarios using different approaches, with the goal of identifying the most effective solution for managing the issue of low inertia.

Keywords: Low Inertia, Problems, Proposed Solutions, Grid Forming, Dynamic Behavior, STEPSS.