



Προς:
τα Μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Παρακαλούμε όπως παρευρεθείτε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ο Υποψήφιος Διδάκτορας **κ. ΛΑΤΟΥΦΗΣ Κωνσταντίνος του Χρήστου**, πτυχιούχος Ηλεκτρολόγος και Ηλεκτρονικός Μηχανικός του Imperial College London.

Η υποστήριξη της Διδακτορικής Διατριβής θα πραγματοποιηθεί την Τετάρτη 11 Σεπτεμβρίου 2024 και ώρα 11:00 π.μ., στο 2^ο όροφο του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής (κτίριο ΑΝΥΜ).

Εφόσον υπάρχουν ενδιαφερόμενοι που θα ήθελαν να παρακολουθήσουν την παρουσία διαδικτυακά, παρακαλούμε όπως αποστείλουν ηλεκτρονικό μήνυμα στη διεύθυνση: spyros@fluid.mech.ntua.gr για να συμπεριληφθούν στην ανακοίνωση του συνδέσμου.

Το θέμα της Διδακτορικής της Διατριβής είναι:

Ελληνικός τίτλος: «Ηλεκτρομηχανολογικός σχεδιασμός τοπικά κατασκευασμένων μικρών ανεμογεννητριών»

Αγγλικός τίτλος: «Electromechanical design of locally manufactured small wind turbines»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ι. Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

'Ηλεκτρομηχανολογικός σχεδιασμός τοπικά κατασκευασμένων μικρών ανεμογεννητριών'

Κ Λατούφης

Οι ανοιχτές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα, μπορούν να δημιουργήσουν ένα ευνοϊκό πλαίσιο για την ηλεκτροδότηση αγροτικών και απομακρυσμένων κοινοτήτων, όπου η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να είναι περιορισμένη ή αναξιόπιστη. Οι τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες (ΤΚΜΑ) είναι μια διαδεδομένη τεχνολογία με τέτοια δυναμική.

Η παρούσα διατριβή ερευνά τις ΤΚΜΑ χρησιμοποιώντας μια διεπιστημονική προσέγγιση, ακολουθώντας τόσο τεχνολογικές όσο και κοινωνιολογικές οπτικές, ενώ υιοθετεί τη Συμμετοχική Έρευνα Δράσης (Participatory Action Research) για την απ' ευθείας σύνδεση με την παγκόσμια κοινότητα και τα δίκτυα των ΤΚΜΑ. Αυτή η προσέγγιση αποσκοπεί στην κατανόηση των δυναμικών και των αναγκών των χρηστών και των επαγγελματιών μέσα σε αυτές τις κοινότητες, και προωθεί έναν από τους κύριους στόχους της διατριβής, να αναπτυχθούν χρήσιμα εργαλεία για τις ανοιχτές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε τοπικό επίπεδο.

Εξετάζοντας την τέχνη της τοπική κατασκευής μικρών ανεμογεννητριών, η διατριβή αρχικά εξετάζει πώς οι χρήστες διαμορφώνουν την τεχνολογία μέσω της "Αυτοσχέδιας Μηχανικής" (Makeshift Engineering) - ενός όρου που δημιουργήθηκε για να περιγράψει την καινοτόμο και χειροποίητη προσέγγιση στην κατασκευή μικρών ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας τοπικά διαθέσιμα υλικά, εργαλεία και τεχνικές. Η ιστορική εξέλιξη του φαινομένου εντοπίζεται αρχικά στη δεκαετία του 1970 στο κίνημα των εναλλακτικών τεχνολογιών στο Ηνωμένο Βασίλειο, και φτάνει έως σήμερα στα σύγχρονα παγκόσμια δίκτυα διαδικτυακού σχεδιασμού και τοπικής κατασκευής μικρών ανεμογεννητριών. Η Αυτοσχέδια Μηχανική, δίνει έμφαση στην ανάμιξη της χειροτεχνίας και της μηχανικής, με τρόπους που επιτρέπουν στους τοπικούς κατασκευαστές να προσαρμόζουν την τεχνολογία σε συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες και ανάγκες.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ΤΚΜΑ εξετάζονται λεπτομερώς, ξεκινώντας με τον σχεδιασμό και τις επιδόσεις αεροτομών σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών. Διεξάγονται μετρήσεις αεροτομών σε αεροδυναμική σήραγγα για χαμηλούς αριθμούς Reynolds και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση διαφόρων εργαλείων προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη των συντελεστών άνωσης και αντίστασης αεροτομών, όπως το XFOIL και το MapFlow, ένας επιλύτης υπολογιστικής ρευστοδυναμικής εξισώσεων Navier-Stokes. Προτείνεται μια τεχνική εξαναγκασμένης μετάβασης του οριακού στρώματος για την ενίσχυση της απόδοσής τους, ενώ τα αποτελέσματα συγκρίνονται με βιβλιοθήκη αεροτομών σχεδιασμένων ειδικά για εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών, που έχουν δοκιμαστεί εκτενώς σε αεροδυναμικές σήραγγες. Αναπτύσσονται σχεδιαστικές προδιαγραφές αεροτομών για συστήματα αιολικής ενέργειας μικρής κλίμακας, σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές και με τη χρήση ΤΚΜΑ, ενώ προτείνεται μια νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία αεροτομής ειδικά προσαρμοσμένης για εφαρμογές ΤΚΜΑ.

Στη συνέχεια εξετάζονται ο σχεδιασμός και η απόδοση δρομέων ΤΚΜΑ, με τη χρήση ειδικών πειραματικών διατάξεων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής, για τη μέτρηση απόδοσης δρομέων και καμπύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών. Αναπτύσσονται διάφορες μεθοδολογίες προσομοίωσης, όπως η θεωρία στοιχείων πτερύγωσης - δίσκου ορμής και υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, και συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα και βαθμονομούνται με βάση αυτά. Στη συνέχεια διερευνάται πειραματικά η επίδραση χειροποίητων ξύλινων πτερυγίων στην απόδοση δρομέων μικρών ανεμογεννητριών, ενώ μελετάται για πρώτη φορά η επίδραση διαφορετικών αεροτομών, που χρησιμοποιούνται στην τοπική κατασκευή, στην απόδοση

χειροποίητων ξύλινων δρομέων. Τρισδιάστατα εκτυπωμένοι δρομείς μελετώνται πειραματικά ως προς την αεροδυναμική τους απόδοση, και συγκρίνονται με αντίστοιχους ξύλινους χειροποίητους δρομείς, παρέχοντας νέες γνώσεις για εναλλακτικές τεχνικές τοπικής κατασκευής. Η απόδοση ενός διαδεδομένου εμπορικά κατασκευασμένου δρομέα συγκρίνεται στην αεροδυναμική σήραγγα με ένα αντίστοιχο τοπικά κατασκευασμένο, προσφέροντας νέα γνώση για την αποτελεσματικότητα των χειροποίητων ξύλινων δρομέων. Διερευνούνται οι επιπτώσεις της απευθυγράμμισης της γωνίας περιστροφής yaw, εξ αιτίας του μηχανισμού αναδίπλωσης της ουράς furling που χρησιμοποιείται στις ΤΚΜΑ, παρέχοντας γνώσεις για την επίδραση στην απόδοση του δρομέα και στις επιδόσεις παραγωγής ισχύος της μικρής ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια αναπτύσσονται καινοτόμες τεχνικές βέλτιστου σχεδιασμού δρομέων μικρών ανεμογεννητριών, βασισμένες σε μια συλλογή αεροτομών ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογές χαμηλών αριθμών Reynolds. Συγκεκριμένα, προτείνονται αεροτομές και βέλτιστες γεωμετρίες πτερυγίων για διάφορα μεγέθη δρομέων, ενώ τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται στις ΤΚΜΑ κατατάσσονται τελικά ανάμεσα σε αυτά με τις καλύτερες επιδόσεις.

Διερευνάται ο σχεδιασμός γεννητριών για μικρές ανεμογεννήτριες, και ειδικότερα για ΤΚΜΑ, με έμφαση στη χρήση γεννητριών αξονική ροής μονίμων μαγνητών, λόγω της δυνατότητας κατασκευής τους με τη χρήση απλών τεχνικών. Παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις και τα εργαλεία προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής, που συμπεριλαμβάνουν μία διάταξη πειραματικών δοκιμών γεννητριών αξονική ροής και μία μεθοδολογία προσομοίωσης, ονομαζόμενη OpenAFPM, βασισμένη στην επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιείται μια εκτενής σύγκριση μεταξύ προσομοιώσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων για την επαλήθευση και τη βαθμονόμηση των εργαλείων προσομοίωσης. Μελετάται ο σχεδιασμός γεννητριών αξονικής ροής για ΤΚΜΑ με στόχο την ανάπτυξη κατευθυντήριων γραμμών σχεδιασμού για τέτοιες εφαρμογές. Διερευνάται ο θερμικός και ο δομικός σχεδιασμός γεννητριών αξονικής ροής, με στόχο την ενίσχυση της απαγωγής θερμότητας και τη μείωση της μάζας της γεννήτριας, με ταυτόχρονη ανάπτυξη νέων σχεδίων για το δίσκο του δρομέα μαγνητών. Διερευνάται πειραματικά η μείωση του ακουστικού θορύβου των γεννητριών αξονικής ροής που χρησιμοποιούνται στις ΤΚΜΑ, συνδέοντας τον ακουστικό θόρυβο με τις αρμονικές ρεύματος που εισάγονται από την τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα. Οι εκπομπές ακουστικού θορύβου των ΤΚΜΑ μετρώνται στο πεδίο για πρώτη φορά, ενώ προτείνονται νέες διατάξεις παθητικών φίλτρων για τη μείωση του ακουστικού θορύβου και η απόδοσή τους αξιολογείται σε πειραματικές δοκιμές. Αναπτύσσονται καινοτόμες βελτιστοποιήσεις σχεδιασμού γεννητριών αξονικής ροής για ΤΚΜΑ, εστιάζοντας στη χρήση διαφόρων μαγνητικών υλικών, όπως το Νεοδύμιο και ο Φερρίτης, και στον σχεδιασμό γεννητριών υψηλής ισχύος, που δεν καλύπτονται από τα κλασσικά εγχειρίδια κατασκευής ΤΚΜΑ. Για τις εν λόγω βελτιστοποιήσεις, προσδιορίζονται οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνητών και προτείνονται "καθολικές" γεωμετρίες μαγνητών για διάφορα εύρη δρομέων ΤΚΜΑ.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με την ανάλυση συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας μικρής κλίμακας, σε περιοχές χαμηλής ταχύτητας ανέμου, που συνήθως σχετίζονται με ΤΚΜΑ. Παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις και τα εργαλεία προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν, συγκεκριμένα η εγκατάσταση ενός πεδίου δοκιμών μικρών ανεμογεννητριών για τη μέτρηση των επιδόσεων ισχύος ΤΚΜΑ σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-12-1, και μεθοδολογίες προσομοίωσης, όπως ο συνδυασμός μοντέλων FAST/Simulink για ανεμογεννήτριες με μηχανισμό furling συνδεδεμένες σε μικρά συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας. Διεξάγεται μια λεπτομερής σύγκριση μεταξύ προσομοιώσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων, προς επαλήθευση και βαθμονόμηση, με αποτέλεσμα ένα νέο εργαλείο μοντελοποίησης για την καμπύλη ισχύος ΤΚΜΑ. Επιπλέον, αναπτύσσεται μια καινοτόμος εφαρμογή ανοικτών δεδομένων, το OpenWindLab, που αποτελείται από μια διαδικτυακή βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε ΤΚΜΑ κατά τη διάρκεια αυτής της διατριβής. Στη συνέχεια

συγκρίνονται οι καμπύλες ισχύος 14 εμπορικών και ΤΚΜΑ, όπως μετρήθηκαν από διάφορους επίσημους φορείς δοκιμών μικρών ανεμογεννητριών, με ιδιαίτερη έμφαση στην απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Αυτές με τις καλύτερες επιδόσεις συγκρίνονται ως μέρη υβριδικών συστημάτων μικρής κλίμακας, χρησιμοποιώντας το εργαλείο προσομοίωσης μικροδικτύων HOMER. Στόχος είναι να διερευνηθεί η επίδοση κάθε μικρής ανεμογεννήτριας από την οπτική του συστήματος ηλεκτροδότησης και να αναπτυχθούν έτσι καινοτόμα κριτήρια σχεδιασμού για συστήματα μικρής κλίμακας. Διερευνώνται παθητικές τεχνικές μεγιστοποίησης της απόδοσης του δρομέα ΤΚΜΑ σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές, όπως η ρύθμιση της αντίστασης του αγωγού μεταφοράς ισχύος από την ανεμογεννήτρια στους συσσωρευτές, και η ρύθμιση του διακένου της γεννήτριας αξονικής ροής. Επίσης, εξετάζονται οι επιπτώσεις της διάβρωσης της ακμής πρόσπτωσης του δρομέα ως προς την παραγωγή ισχύος και τον ακουστικό θόρυβο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία προτάσεων για διαδικασίες συντήρησης ΤΚΜΑ. Αναπτύσσονται καινοτόμες βελτιστοποιήσεις σχεδιασμού, που έχουν ως αποτέλεσμα πίνακες βέλτιστων διατομών για τη ρύθμιση της αντίστασης του αγωγού μεταφοράς ισχύος από την ΤΚΜΑ στους συσσωρευτές. Μία από τις βέλτιστες παθητικές διατάξεις συγκρίνεται για πρώτη φορά στο πεδίο με αντίστοιχη που περιλαμβάνει μετατροπέα ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking). Τέλος, πραγματοποιούνται τεχνοοικονομικές βελτιστοποιήσεις για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμέτρου δρομέα και ύψους πύργου για διάφορες ονομαστικές ισχύς ΤΚΜΑ, σε συστήματα αιολικής ενέργειας μικρής κλίμακας και σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές, με αποτέλεσμα καινοτόμες προτάσεις σχεδιασμού για την επιλογή της ονομαστικής ταχύτητας ανέμου μικρών ανεμογεννητριών.

Electromechanical design of locally manufactured small wind turbines

K. Latoufis

Open-source renewable energy technologies for small scale electricity production, can create an enabling context for energy access of rural and remote communities, where electrical grid expansion may be limited or unreliable. Locally manufactured small wind turbines (LMSWTs) are a widespread technology with such potential.

This thesis explores LMSWTs using an interdisciplinary approach, accounting for technical as well as sociological terms, while adopting Participatory Action Research, in order to engage with global LMSWT communities and networks. This approach aims at grasping the dynamics and needs of practitioners within these communities, and drives one of the main goals of the thesis, to develop useful tools for open-source renewable energy technologies at the grassroots level.

In exploring the craft of LMSWTs, the thesis initially examines how users shape technology through "Makeshift Engineering" - a term coined to describe the innovative and craft-based approach to building wind turbines using locally available materials. The historical evolution of makeshift engineering is traced back in the 1970s' and the alternative technology movement in the UK up-to recent global networks that design and manufacture small wind turbines (SWTs) locally. Makeshift Engineering emphasizes on the blend of craft and engineering that enables local manufacturers to adapt technology into specific local conditions and needs.

The technical aspects of LMSWTs are investigated in detail, starting with the design and performance of airfoils in SWT applications. Wind tunnel measurements are conducted for airfoils at low Reynolds numbers, and are utilized for the calibration of various simulation tools developed for the prediction of airfoil lift and drag coefficients, such as XFOIL and MapFlow, a computational fluid dynamics Navier-Stokes solver. A boundary layer tripping technique is proposed for enhancing their performance, while their results are compared with a library of airfoils designed particularly for SWT applications which have been extensively tested in wind tunnels. Airfoil design requirements are developed for small-scale wind energy conversion systems in direct battery coupling using LMSWTs, while a novel optimized airfoil geometry is proposed specifically tailored for LMSWTs.

Aspects of rotor design and performance for LMSWTs are investigated next, based on dedicated wind tunnel experimental setups developed for measuring rotor efficiency and SWT power curves. Various simulation methodologies, such as blade element momentum and computational fluid dynamics, are developed and are rigorously compared and calibrated with experimental results. The impact of hand-carved wooden blades on rotor efficiency is investigated experimentally while the influence of various airfoils used in local manufacturing on the efficiency of hand-carved wooden rotors is studied for the first time. 3D printed rotors are investigated experimentally for aerodynamic performance and are compared with hand-carved wooden rotors, providing new insights in alternative techniques for local manufacturing. The performance of a popular commercially manufactured rotor is compared in the wind tunnel with that of a LMSWT, providing new insight into the effectiveness of hand-carved wooden rotors. The effects of yaw misalignment imposed by the furling mechanism LMSWTs use, are investigated providing insights on their influence on rotor efficiency and power performance. Innovative design optimizations for SWT rotors are performed, based on a collection of low Reynolds number airfoils specifically designed for SWT applications. Specific airfoils and optimal rotor geometries are proposed for various rotor sizes, while airfoils used in LMSWTs are ranked among the best performing airfoils.

The generator design in SWT applications, and specifically for LMSWTs, is investigated, focusing on the use of axial flux permanent magnet generators (AFPMGs), due to their viability in local manufacturing conditions. The experimental setups and simulation tools employed are presented, including an AFPMG test bench setup and a novel simulation methodology, namely OpenAFPM, based on magnetostatic finite element analysis. A comprehensive comparison between simulation and experimental results is conducted in order to verify and calibrate the simulation tools. Specific aspects of generator design relevant to LMSWTs are studied, based on key AFPMG design parameters, with the aim of developing design guidelines for such applications. The thermal and structural design of AFPMGs is explored, for enhancing heat dissipation and reducing generator mass, with novel back iron disk designs being developed. Acoustic noise mitigation for AFPMGs used in LMSWTs is investigated experimentally, linking acoustic noise to current harmonics introduced by the diode bridge rectifier. The acoustic noise emissions of LMSWTs are measured in the field for the first time, while novel passive filter configurations are proposed for acoustic noise mitigation and their performance is evaluated in field tests. Innovative design optimizations for AFPMGs in LMSWTs are developed, focusing on the use of various magnetic materials, such as Neodymium and Ferrite, and on the design of high-power AFPMGs, which are not typically covered in LMSWT manufacturing manuals. Optimal magnet dimensions are identified and 'universal' magnet designs are proposed.

The thesis concludes with a comprehensive analysis of small-scale wind energy conversion systems (WECS) in low wind speed regions, typically associated with LMSWTs. The experimental setups and simulation tools employed are presented, specifically the installation of a SWT test site for measuring LMSWT power performance according to the IEC 61400-12-1 standard, and simulation methodologies such as combinations of FAST/Simulink models for furling SWTs in WECS. A detailed comparison between simulation and experimental results is conducted, for validation and calibration, resulting in a novel power curve modelling tool for LMSWTs. Additionally, an innovative open data application is developed, namely OpenWindLab, which consists of an online data base of all field tests conducted during this thesis on LMSWTs. The power curves of 14 commercially and LMSWTs are compared. These curves were measured by various testing bodies, and with a specific emphasis on low wind speed performance. Best performing SWTs are compared as parts of small-scale PV/Wind hybrid systems, using the HOMER microgrid simulation tool, in order to verify the performance of every SWT from a system perspective, and to develop innovative design criteria for small-scale WECS. Passive rotor power matching techniques for direct battery coupling are investigated, namely the regulation of the power transmission line resistance and the regulation of the AFPMG air gap, with the aim of developing design guidelines for low-cost rotor power matching. WECS maintenance aspects are also investigated, namely the effects of leading-edge erosion on power performance and acoustic noise, resulting in the proposition of maintenance procedures for LMSWTs. Innovative design optimizations are implemented, resulting in component lookup tables for optimal passive rotor power matching in WECS using LMSWTs, while such an optimized configuration is field tested and compared for the first time with one using a maximum power point tracking (MPPT) converter. Lastly, techno-economic optimizations are conducted for determining the optimal rotor diameter and tower height for various rated power sizes of LMSWTs in direct battery charging WECS, resulting in new design guidelines regarding the choice of rated of wind speed.