



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ***

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Ντούκα Μιχαήλ

Επιβλέπων

Ριζιώτης Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Αθήνα, Ιούνιος 2019

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	1
Σύνοψη	3
Περίληψη.....	3
Abstract	5
Summary	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Δειγματοληψία.....	7
1.2.1 Τεχνικές Δειγματοληψίας	7
1.2.2 Μέγεθος του δείγματος.....	8
1.2.3 Latin Hypercube Sampling (LHS).....	8
1.3 Υποκατάστατα Μοντέλα	9
1.4 Response Surface Methodology (RSM)	10
1.4.1 Περιγραφή της RSM.....	10
1.4.2 Εφαρμογή στην παρούσα εργασία.....	11
1.5 Τεχνική Ελέγχου μέσω Υποκατάστατων Μοντέλων (SMCT).....	11
1.6 Πολυεπίπεδη SMCT	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.2 Τεχνολογίες ελέγχου ανεμογεννητριών.....	14
2.3 Έλεγχος ισχύος στροφών.....	15
2.4 Ανεξάρτητος έλεγχος βήματος	16
2.4.1 Εισαγωγή	16
2.4.2 Κύριες τεχνικές ελέγχου	17
2.4.3 Περιγραφή του ελέγχου	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ SMCT	20
3.1 Σύνοψη του συστήματος.....	20
3.2 Αναλυτική περιγραφή του συστήματος.....	21
3.3 Περιγραφή της διαδικασίας	22
3.4 Αποτελέσματα και εφαρμογή της RSM	26
3.4.1 Επίπεδο 1	26

3.4.2 Επίπεδο 2	31
3.4.3 Επίπεδο 3	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	44
4.1 Baseline Control Technique	44
4.2 SMCT Control Technique	45
4.3 Σύγκριση των μεθόδων ελέγχου	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	Βελτιστοποίηση παραμέτρων ελέγχου ανεμογεννητριών με χρήση υποκατάστατων μοντέλων
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Ντούκας Μιχαήλ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Ριζιώτης Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2018-19

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του ελέγχου της γωνίας βήματος πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας σε διαφορετικές τιμές κερδών, προκειμένου να κατασκευαστεί μια νέα τεχνική προσαρμοστικού ελέγχου που θα στοχεύει στην ταχύτερη απόκριση και την αύξηση της ευστάθειας του συστήματος. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται τόσο με τον κλασικό τρόπο της ίδιας γωνίας βήματος σε όλα τα πτερύγια, όσο και με τη χρήση της τεχνικής του ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων που στοχεύει στην μείωση των φορτίων. Συνεπώς υπάρχει εξάρτηση από πολλές μεταβλητές, οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και επηρεάζουν το σύστημα με τρόπους πολλές φορές απρόβλεπτους. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση αναλυτικών σχέσεων για την περιγραφή του συστήματος είναι ανακριβής, λόγω των μη γραμμικών παραγόντων που οδηγούν σε απρόοπτες συμπεριφορές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των υποκατάστατων μοντέλων, η οποία πραγματοποιεί προσέγγιση του συστήματος μέσω δειγματοληψίας. Με τη χρήση της τεχνικής RSM, γίνεται η μελέτη του υποκατάστατου μοντέλου και καταλήγουμε στην τελική εξαγωγή του βέλτιστου, μέσω προσέγγισης με δευτεροβάθμιες συναρτήσεις πολλών μεταβλητών. Η βελτιστοποίηση για διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου οδηγεί στην κατασκευή της τελικής μεθόδου ελέγχου, η οποία ορίζει τις βέλτιστες τιμές κερδών συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος, επιβεβαιώνεται η ορθότητα της νέας μεθόδου μέσω προσομοιώσεων και σύγκρισης των αποτελεσμάτων με άλλες τεχνικές προσαρμοστικού ελέγχου, αποδεικνύοντας ότι έχει πράγματι επιτευχθεί βελτίωση της συμπεριφοράς έναντι των άλλων μεθόδων, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η νέα τεχνική ελέγχου επιτυγχάνει τους στόχους της.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία βασίζεται και αποτελεί επέκταση της εργασίας του Τατούλη Πέτρου με τίτλο “Parameter Optimization for Linear Power – Speed Control of Onshore and Offshore Wind Turbines” [1], όπου και εισάγεται για πρώτη φορά η χρήση της Response Surface Methodology (RSM) για τη ρύθμιση των κερδών ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων σε ανεμογεννήτριες. Αυτή η προσέγγιση πήρε καθολικά το όνομα Surrogate Modeling Control Technique (SMCT) ή στα ελληνικά «Τεχνική Ελέγχου με Υποκατάστατα Μοντέλα» και αποτελεί μια offline μέθοδο βελτιστοποίησης. Η πρωτοπορία της εργασίας [1] σε σχέση με άλλες εφαρμογές της RSM, πέρα από το ότι χρησιμοποιείται για τον έλεγχο γωνίας βήματος, είναι ότι χρησιμοποιεί τρία επίπεδα βελτιστοποίησης έναντι του ενός που χρησιμοποιεί η κλασική μέθοδος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αναλύεται περαιτέρω και θεμελιώνεται και στα Κεφάλαια 1 και 3 της παρούσας εργασίας. Η διαφοροποίηση που εισάγεται στην παρούσα εργασία σε σχέση με την [1], είναι ότι χρησιμοποιείται μια επιπλέον μεταβλητή για τον έλεγχο, και συγκεκριμένα το ολοκληρωτικό κέρδος του ανεξαρτήτου ελέγχου πτερυγίων. Αυτό έχει μια σειρά επιδράσεων στην SMCT, με σημαντικότερο το γεγονός ότι η αλληλεπίδραση των τριών μεταβλητών αλλάζει τα αποτελέσματα σε σχέση με το αν είχαμε δεδομένη τη βελτιστοποίηση που προέκυψε από την [1] και επιδιώκαμε να κάνουμε βελτιστοποίηση μίας μεταβλητής. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα που μοντελοποιείται είναι πολυσύνθετο και κάθε αλλαγή το επηρεάζει εξ’ ολοκλήρου, όπως θα φανεί και από

τα αποτελέσματα, και όταν θα γίνει και σύγκριση με τα αποτελέσματα του [1]. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση είναι η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων από την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Αυτό θα οδηγήσει στη δημιουργία μιας νέας συνάρτησης ελέγχου για το σύστημα, με τη χρήση της SMCT τριών επιπέδων. Στόχος του κριτηρίου είναι να οδηγηθεί το σύστημα σε ομαλότερη συμπεριφορά και να αποκτήσει μεγαλύτερη ευρωστία. Να σημειωθεί ότι η παρούσα εργασία ασχολείται μόνο με την περίπτωση των επίγειων ανεμογεννητριών. Η περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης.

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται θεμελίωση των βασικών χαρακτηριστικών που απαρτίζουν την διαδικασία βελτιστοποίησης. Δίνονται οι ορισμοί των δειγματοληπτικών μεθόδων και αναφέρονται οι σημαντικότερες κατηγορίες τους. Εισάγεται η μέθοδος της Latin Hypercube Sampling που αποτελεί την τεχνική δειγματοληψίας της διαδικασίας και αναλύονται τα πλεονεκτήματά της. Εξηγούνται οι έννοιες των υποκατάστατων μοντέλων και θεμελιώνεται η μαθηματική διατύπωση της RSM, αποδεικνύοντας τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνει την επιθυμητή βελτιστοποίηση. Τέλος, τα παραπάνω επιμέρους στοιχεία χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της Τεχνικής Ελέγχου με Υποκατάστατα Μοντέλα (SMCT), περιγράφονται τα βασικά της χαρακτηριστικά, ενώ δίνονται και τα πλεονεκτήματα της πολυεπίπεδης SMCT έναντι της SMCT ενός επιπέδου.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των βασικών τεχνικών ελέγχου των ανεμογεννητριών. Οι δύο βασικότερες είναι η γωνία βήματος πτερυγίου και η απώλεια στήριξης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται αποκλειστικά η πρώτη. Οι βασικές αρχές λειτουργίας του ελέγχου περιγράφονται στην συνέχεια και δίνεται σχηματικά ο τρόπος ελέγχου. Έπειτα εισάγεται η λογική του ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων, που βασίζεται στην ξεχωριστή κίνηση των πτερυγίων κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής. Θεμελιώνονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, οι στόχοι του και δίνεται σχηματικά το πλήρες διάγραμμα του ελέγχου.

Στο τρίτο Κεφάλαιο δίνονται λεπτομερώς τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας και των προσομοιώσεων. Αναφέρονται οι λεπτομέρειες των βημάτων που θα ακολουθηθούν, οι ταχύτητες ανέμου, ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας, τα κριτήρια ορθότητας της μεθόδου κ.α. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, εξάγονται τα αποτελέσματα και γίνεται σχολιασμός τους.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του προηγούμενου Κεφαλαίου για την τελική κατασκευή του ελέγχου που προκύπτει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Περιγράφονται επίσης οι αντίστοιχες προϋπάρχουσες τεχνικές ελέγχου, όπως η αποκαλούμενη baseline μέθοδος και η μέθοδος δύο μεταβλητών της εργασίας [1], και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Θεμελιώνεται με αυτό τον τρόπο ότι η νέα μέθοδος ελέγχου επιτυγχάνει τους στόχους της και υπερिशύει των υφιστάμενων τεχνικών προσαρμοστικού ελέγχου.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο, εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα της μεθοδολογίας, γίνεται σχολιασμός σχετικά με την επιτυχία ή μη της μεθόδου και πραγματοποιούνται τελικές προτάσεις για πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

POST-GRADUATE THESIS: **Optimization of wind turbine control parameters using surrogate models**

STUDENT: **Ntoukas Michail**

SUPERVISOR: **Riziotis Vasileios, Assistant Professor,
Department of Mechanical Engineering**

ACADEMIC YEAR: **2018-19**

Abstract

The purpose of the present thesis is to study the pitch control of a wind turbine at different gains, in order to construct a new adaptive control technique that aims to improve the response speed and increase the stability of the system. The control scheme utilizes both the typical technique of collective pitch control and the technique of independent pitch control, which aims at reducing the loads of the blades. Therefore, the response depends on many variables that interact with each other and affect the system in ways often unpredictable. This means that the use of analytical expressions to describe the system can be inaccurate, due to non-linear factors that lead to unexpected behaviors. Therefore, we use a surrogate model, which approximates the system via a sampling technique. By using the response surface methodology (RSM), the surrogate model is studied and by using second-degree multivariable functions, the optimal points are approximated. Optimization for different sets of wind speed leads us to the construction of the final control scheme, which defines the optimal gain values as a function of wind speed. Finally, simulations and comparisons of the results with other adaptive control techniques, deem the new method successful, demonstrating that the behavior of the system has improved compared to the other schemes, which also confirms that the new control technique achieves its objectives.

Summary

The present postgraduate diploma thesis is based on an extension of Tatoulis Petros' thesis titled "Parameter Optimization for Linear Power - Speed Control of Onshore and Offshore Wind Turbines" [1], where the Response Surface Methodology (RSM) is used for tuning the gains of the pitch control on wind turbines. This approach has been universally called the Surrogate Modeling Control Technique (SMCT) and is an offline optimization method. The forefront of the thesis [1] compared to other RSM applications, apart from being used for pitch control, is that it uses three levels of optimization instead of one level used by the typical method. This approach is further analyzed and established in chapters 1 and 3 of the current thesis. The variation introduced in this work compared to [1], is that an additional variable is used in the control scheme, namely the integral gain of the independent pitch control. This choice has a series of effects on SMCT, with the most important being the fact that the interaction of the three variables alters the results compared to what they would be in case we performed a single variable optimization of the integral gain of the independent pitch control, while considering the optimization of [1] as fixed. This occurs because the system being modeled is complex, meaning that every change affects its entirety. This fact shall be observed in both the results, and the comparisons performed. The criterion used for the optimization is to minimize deviations from the nominal rotational speed. This will

lead to the construction of a new control scheme for the system, using the three-level SMCT. The objective is to lead the system to smoother behavior and increase robustness. Note that this thesis considers only the case of onshore wind turbines. The case of offshore wind turbines could be the subject of a future investigation.

In the first chapter, the basic features that make up the optimization process are based. The definition of sampling techniques is given and their most important categories are mentioned. We also introduce the Latin Hypercube Sampling method, which is the sampling technique that will be used, and we analyze its advantages. The concept of surrogate models is explained and the mathematical formulation of RSM is established, demonstrating how it achieves the desired optimization. Finally, all these elements are utilized to construct the SMCT; its basic features are described, and the advantages of multi-level SMCT vs. single-level SMCT are given.

The second chapter describes the basic techniques for wind turbines' blade control. The two most common are pitch control and stall control. Only pitch control is used in this thesis. The basic operating principles of the control technique are given, and the control mode is schematically described. Then, the scheme of the independent pitch control is introduced, which is based on the separate movement of the blades during a rotation. The basic principles of operation, the control objectives and the schematic diagram of the technique are established.

The third chapter gives details of the wind turbine and the simulation parameters. The details of the steps to be followed, the wind speeds, the number of sampling points, the verification criteria, etc. are given. The simulations are then performed and the results are extracted and interpreted.

The fourth chapter uses the results of the previous chapter for the final construction of the control scheme resulting from the optimization process. We also describe the corresponding pre-existing control techniques, such as the so-called baseline method and the two-variable method of [1], and a comparison is performed. This establishes that the new control method achieves its objectives and prevails over existing adaptive control techniques.

In the fifth chapter, we describe the conclusions of the new technique, comment on whether the method is successful, and make proposals for possible future extensions of the present work.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται θεωρητική θεμελίωση της στατιστικής μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα Κεφάλαια. Ξεκινώντας από τους βασικούς ορισμούς, κατασκευάζουμε σταδιακά την διαδικασία, καταλήγοντας στη σύνθετη αλλά κομψή μεθοδολογία ελέγχου μέσω υποκατάστατων μοντέλων. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται πιο αναλυτικά στο [1] αλλά στο Κεφάλαιο αυτό κρίνεται απαραίτητο να γίνει μια σύντομη επισκόπηση, ξεκινώντας από τα θεμελιώδη και καταλήγοντας στα πιο σημαντικά, με εξειδίκευση στο σενάριο της παρούσας διπλωματικής, χωρίς όμως να χαθεί η γενικότητα.

1.2 Δειγματοληψία

1.2.1 Τεχνικές Δειγματοληψίας

Δείγμα ονομάζεται μια συλλογή δεδομένων που επιλέγεται από το σύνολο όλων των πιθανών σημείων που είναι δυνατό να επιλεγθούν. Η σωστή επιλογή του δείγματος είναι το πρώτο βήμα για να έχουμε αποτελέσματα που ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα. Το σκοπό αυτό εξυπηρετούν οι διάφορες *τεχνικές δειγματοληψίας*. Δειγματοληψία είναι η διαδικασία επιλογής του δείγματος. Μερικές κατηγορίες τεχνικών δειγματοληψίας είναι οι εξής:

- Τυχαία δειγματοληψία: Το δείγμα επιλέγεται τυχαία, π.χ. με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.
- Συστηματική δειγματοληψία: Το δείγμα επιλέγεται με τρόπο που κάθε επόμενο σημείο στηρίζεται στην επιλογή των προηγούμενων, χωρίς όμως να χάνεται κατά το δυνατόν η αμεροληψία.
- Στρωματοποιημένη δειγματοληψία (stratified sampling): Το δείγμα χωρίζεται σε ομάδες με αμοιβαίως αποκλειόμενα κοινά χαρακτηριστικά και από κάθε ομάδα επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός δειγμάτων.
- Δειγματοληψία συστάδων (cluster sampling): Το δείγμα χωρίζεται σε ομάδες με ανάμικτα χαρακτηριστικά που έχουν όμως ένα κοινό στοιχείο που τις διαχωρίζει από τις υπόλοιπες, το οποίο όμως δεν επηρεάζει την αμεροληψία. Ποσοστό των ομάδων επιλέγονται εξ ολοκλήρου ως δείγμα.

1.2.2 Μέγεθος του δείγματος

Η επιλογή του μεγέθους του δείγματος είναι ένα επιπλέον στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Υπερβολικά μεγάλο δείγμα μας δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα, όμως απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο και χρόνο. Από την άλλη, όσο μειώνεται το δείγμα τόσο χάνεται πληροφορία, οπότε αφενός η διαδικασία απλοποιείται, αφετέρου όμως δεν είμαστε σίγουροι αν τα στοιχεία είναι επαρκή για να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα.

Στόχος μιας στατιστικής μεθόδου είναι να βρει το βέλτιστο σημείο ανάμεσα στα δύο αυτά ακραία σενάρια, ελαχιστοποιώντας τον υπολογιστικό φόρτο, καταφέροντας όμως να μην αλλοιώσει τα αποτελέσματα που θα έδινε μια αναλυτική μέθοδος ή μια ρητή υπολογιστική μέθοδος.

1.2.3 Latin Hypercube Sampling (LHS)

Πρόκειται για μια μέθοδο συστηματικής δειγματοληψίας που ακολουθεί την εξής λογική:

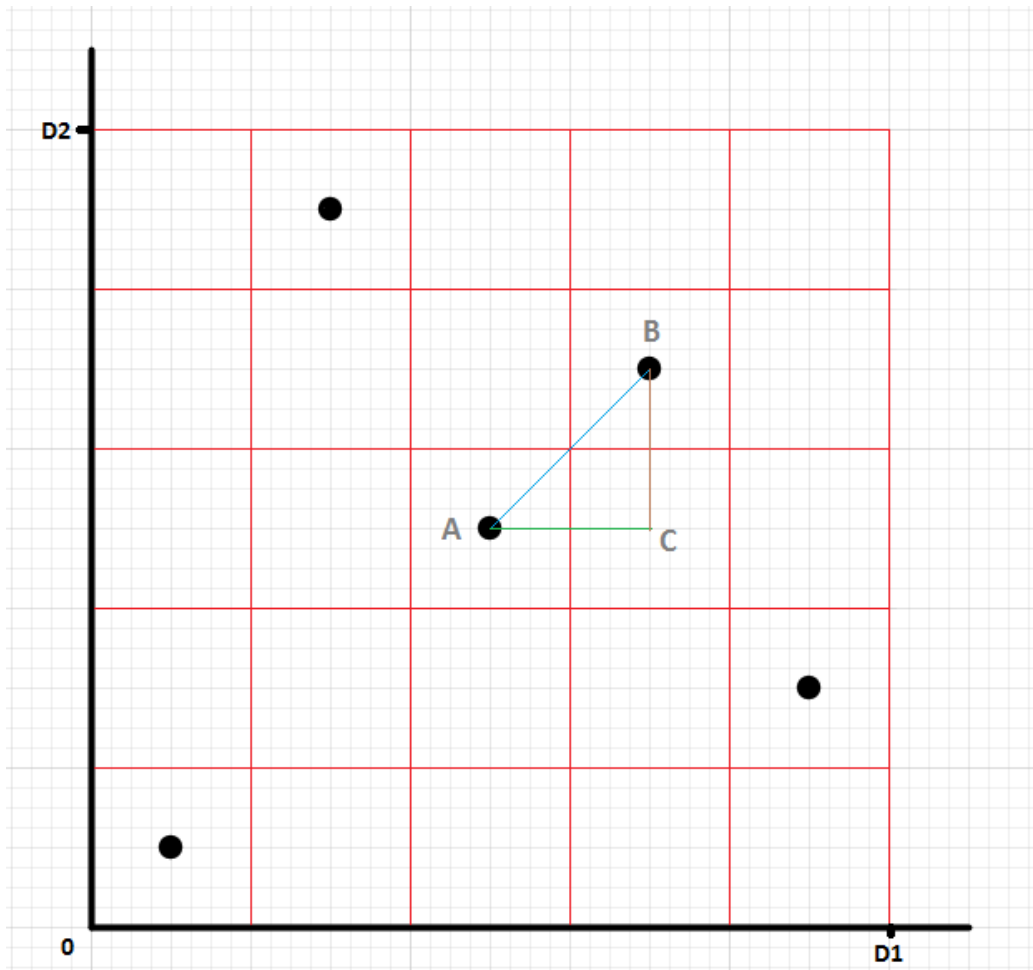
Έστω οι μεταβλητές σχεδιασμού $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, που παίρνουν τιμές εντός κλειστών διαστημάτων D_1, D_2, \dots, D_n . Επιλέγοντας έναν αριθμό k , χωρίζουμε το κάθε διάστημα σε υποδιαστήματα ίδιου μήκους $\frac{D_i}{k}$ και επιλέγουμε το κέντρο τους. Προκύπτουν έτσι σημεία a_1, b_1, c_1, \dots της μεταβλητής x_1 , σημεία a_2, b_2, c_2, \dots της μεταβλητής x_2 , κ.ο.κ. Από αυτά τα σημεία σχηματίζουμε ένα σύνολο k συντεταγμένων, που βρίσκονται εντός n -διάστατου υπερκύβου (hypercube) διατηρώντας την εξής χαρακτηριστική της μεθόδου ιδιότητα: *Κάθε σημείο πρέπει να περιέχεται ακριβώς μία φορά στα σχηματιζόμενα σύνολα.*

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιλέγουμε k σημεία από τον n -διάστατο χώρο δειγματοληψίας, διασφαλίζοντας ότι θα απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον $\frac{1}{k} \sqrt{\sum D_i^2}$, καθώς και ότι δεν υπάρχει άλλο σημείο σε ένα χώρο $\frac{D_i}{k}$ γύρω από τις ευθείες που καλύπτει η κάθε συντεταγμένη προς την κατεύθυνση κάθε διάστασης. Συνεπώς έχουμε επαρκής κάλυψη του δείγματος και αποφεύγεται πιθανή ομαδοποίηση των σημείων σε περιοχές, όπως μπορεί να προκύψει από την πραγματικά τυχαία δειγματοληψία.

Η μέθοδος αυτή μπορεί φυσικά να χρησιμοποιηθεί και με παραλλαγές, όπως για διαφορετικό μήκος διαστημάτων σε κάθε διάσταση, να επιλέγεται τυχαίο αντί για το κεντρικό σημείο κάθε διαστήματος, κ.α. Είναι όμως απαραίτητο να μην αλλοιώνεται η βασική αρχή της μεθόδου, δηλαδή ότι κανένα σημείο δεν πρέπει να περιέχεται στην ίδια στήλη ή σειρά κάθε υποδιαστήματος.

Ένα γραφικό παράδειγμα για επιλογή 5 σημείων με τη μέθοδο Latin Hypercube Sampling από δισδιάστατο δειγματοληπτικό χώρο φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Οι δύο διαστάσεις μήκους D_1 και D_2 χωρίζονται σε 5 υποδιαστήματα και επιλέγονται 5 σημεία με τρόπο ώστε να μην υπάρχει άλλο σημείο στην ίδια στήλη ή σειρά. Επιπλέον, με την επιλογή του κεντρικού αντί για τυχαίου

σημείου, διατηρείται και η δευτερεύουσα ιδιότητα, ότι δύο τυχαία σημεία απέχουν τουλάχιστον $\frac{1}{5}\sqrt{D1^2 + D2^2}$ μεταξύ τους.



Σχήμα 1.1. Παράδειγμα LHS για 5 σημεία στις 2 διαστάσεις και η απόσταση των κοντινότερων σημείων δειγματοληψίας.

1.3 Υποκατάστατα Μοντέλα

Τα υποκατάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα εφαρμογών της μηχανικής. Η ανάγκη που οδήγησε στη χρήση τους σε πολλαπλά πεδία της επιστήμης είναι η πολυπλοκότητα, η δυσκολία ή ακόμα και η αδυναμία χρήσης αναλυτικών μοντέλων για την περιγραφή ενός φαινομένου. Τα υποκατάστατα μοντέλα συγκροτούν έναν τρόπο προσέγγισης μιας αντικειμενικής συνάρτησης με τη χρήση διασκορπισμένων δειγμάτων που επιλέγονται τυχαία από το πεδίο ορισμού των μεταβλητών που περιγράφουν την αντικειμενική συνάρτηση. Στον κλάδο της βελτιστοποίησης, η αντικειμενική συνάρτηση πρόκειται για την εξίσωση την οποία προσπαθούμε να μεγιστοποιήσουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε. Συνεπώς, μέσω πεπερασμένου αριθμού δοκιμών, μπορούμε να την προσεγγίσουμε επαρκώς χωρίς να χρειάζεται να εξαντλήσουμε το πεδίο ορισμού, καθώς αυτό θα ήταν αδύνατον. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί το υποκατάστατο μοντέλο.

1.4 Response Surface Methodology (RSM)

1.4.1 Περιγραφή της RSM

Η μέθοδος RSM είναι ο συνδυαστικός κρίκος ανάμεσα στις μεταβλητές – δείγματα και στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος με τις προαναφερθείσες μεταβλητές. Στόχος είναι η κατασκευή του υποκατάστατου μοντέλου, δηλαδή της προσεγγιστικής αντικειμενικής συνάρτησης, και εντέλει η εύρεση του ελαχίστου της. Οι εμπνευστές της μεθόδου George E. P. Box και K. B. Wilson προτείνουν τη χρήση ενός δευτεροβάθμιου πολυωνύμου για την προσέγγιση αυτή και την περιγραφή του μέσω τετραγωνικών πινάκων. Η τετραγωνική μορφή είναι η βέλτιστου βαθμού προσέγγιση, καθώς μικρότερες είναι πολύ απλοϊκές, πόσο μάλλον για μη γραμμικά φαινόμενα, ενώ για βαθμό πάνω από 3 δεν αυξάνει ιδιαίτερα την ακρίβεια στα αποτελέσματα, ενώ δυσκολεύει την εύρεση του ελαχίστου. Συνεπώς η μέθοδος έχει δύο βασικά στοιχεία:

Το πρώτο βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας είναι η τετραγωνική παλινδρόμηση, δηλαδή η κατασκευή μιας συνάρτησης δευτέρου βαθμού με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος.

Το δεύτερο βασικό στοιχείο είναι η εύρεση του ελαχίστου αυτής της προσεγγιστικής αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό επιτυγχάνεται με εντοπισμό βέλτιστου για συνάρτηση δευτέρου βαθμού.

Η αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζεται από n μεταβλητές είναι της μορφής:

$$\hat{y}(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 \quad (1.1)$$

Κατασκευάζουμε τον πίνακα U ,

$$U = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1n} & x_{11}x_{12} & \dots & x_{1(n-1)}x_{1n} & x_{11}^2 & \dots & x_{1n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{k1} & \dots & x_{kn} & x_{k1}x_{k2} & \dots & x_{k(n-1)}x_{kn} & x_{k1}^2 & \dots & x_{kn}^2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

όπου x_{ij} είναι η i -οστή μεταβλητή δειγματοληψίας της j διάστασης.

Κατασκευάζουμε επίσης τον πίνακα

$$y_s = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_k]^T \quad (1.3)$$

που περιέχει τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τις k διαστάσεις.

Αποδεικνύεται ότι ο πίνακας

$$a = U^{-1} \cdot y_s \quad (1.4)$$

αποτελεί τον πίνακα των σταθερών στη συνάρτηση ελαχίστων τετραγώνων (1.1) και είναι της μορφής

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

όπου m ο αριθμός των σταθερών του πολυωνύμου, που αποδεικνύεται [1] ίσος με

$$m = 1 + n + \frac{1}{2}n(n-1) + n = \frac{1}{2}(n+1)(n+2) \quad (1.6)$$

Όσον αφορά την εύρεση του ελαχίστου, δεν απαιτεί πλέον τίποτα παραπάνω από την εύρεση του τοπικού ελαχίστου της πολυμεταβλητής συνάρτησης $\hat{y}(x)$, που μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε αναλυτικά, είτε αριθμητικά με μια απλή επαναληπτική διαδικασία της επιλογής μας.

1.4.2 Εφαρμογή στην παρούσα εργασία

Η διαφορά που υπάρχει στην εφαρμογή της RSM στην παρούσα εργασία από την κλασική RSM είναι ότι δεν χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος δειγμάτων για την εξαγωγή μοναδικής αντικειμενικής συνάρτησης. Αντ' αυτού γίνεται εφαρμογή πολλών επιπέδων όπου κάθε φορά προσεγγίζεται η αντικειμενική συνάρτηση όλο και καλύτερα. Βρέθηκε [1] ότι ο βέλτιστος αριθμός επιπέδων για την εφαρμογή αυτής της παραλλαγής της RSM είναι 3. Λεπτομέρειες σχετικά με αυτή την παραλλαγή περιγράφονται στην ενότητα 1.6.

1.5 Τεχνική Ελέγχου μέσω Υποκατάστατων Μοντέλων (SMCT)

Στην παρούσα ενότητα, θα συνδυάσουμε τα στοιχεία θεωρίας που αναλύθηκαν παραπάνω για να περιγράψουμε την τεχνική ελέγχου μέσω υποκατάστατων μοντέλων (surrogate modeling control technique – SMCT), με έμφαση στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας.

Πρώτο σημαντικό βήμα για την μέθοδο είναι η επιλογή του αριθμού των μεταβλητών και τα διαστήματα στα οποία ορίζεται η καθεμία. Στη συγκεκριμένη εργασία οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι τρεις:

- Το αναλογικό κέρδος του ελέγχου βήματος πτερυγίων (k_p)
- Το ολοκληρωτικό κέρδος του ελέγχου βήματος πτερυγίων (k_i)
- Το ολοκληρωτικό κέρδος του ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων (k_{iipc})

Είναι κρίσιμη η σωστή επιλογή του διαστήματος σχεδιασμού της κάθε μεταβλητής. Λανθασμένη επιλογή ορίων των διαστημάτων μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε συμπεριφορά που δεν είναι αποδεκτή. Για παράδειγμα, αν τα όρια σχεδιασμού είναι υψηλά, ίσως το σύστημα οδηγηθεί σε αστάθεια λόγω της μεγάλης ταχύτητας αντίδρασης. Αντιθέτως, αν είναι χαμηλά, τότε υπάρχει πιθανότητα να μην αποκρίνεται ο ελεγκτής έγκαιρα, καθιστώντας όλη την ανωτέρω ανάλυση άστοχη. Συνεπώς πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το σημείο. Τα όρια σχεδιασμού στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναλύονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

Το δεύτερο σημαντικό βήμα είναι η επιλογή του αριθμού k των δειγμάτων που θα ληφθούν για την εφαρμογή της μεθόδου. Ο αριθμός αυτός θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος του αριθμού m (Σχέση 1.6). Όπως αναφέρθηκε όμως, ο αριθμός αυτός αυξάνει την πολυπλοκότητα της μεθόδου όσο μεγαλώνει. Δεδομένου του περιορισμού χρόνου και πόρων, ο βέλτιστος αριθμός δειγμάτων πρέπει να βρεθεί. Από ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στο [1], το μέγεθος του δείγματος ενδείκνυται να είναι 5 σημεία για κάθε διάσταση. Άρα για δύο διαστάσεις τα σημεία πρέπει να είναι 10, για τρεις διαστάσεις τα σημεία πρέπει να είναι 15 κ.ο.κ. Χρησιμοποιήθηκαν συνεπώς 15 σημεία δειγματοληψίας για την παρούσα διπλωματική, μέσω της μεθόδου Latin Hypercube Sampling. Η επιλογή των σημείων αιτιολογείται στο Κεφάλαιο 3.

Τρίτο βήμα είναι η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται η τυπική απόκλιση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων. Φυσικά, ως αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί οτιδήποτε έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης βελτιστοποίησης του συστήματος, ανάλογα με τους στόχους της μεθόδου. Η επιλογή της συνάρτησης αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.

Επόμενο βήμα είναι η κατασκευή του μοντέλου με βάση τα προηγούμενα στοιχεία και η προσομοίωσή του. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το πρόγραμμα hGAST του ΕΜΠ. Αυτό είναι και το πιο ενεργοβόρο βήμα της μεθόδου. Η προσομοίωση αφενός απαιτεί πόρους, αφετέρου απαιτεί μεγάλες χρονικές διάρκειες. Με το πέρας της προσομοίωσης λαμβάνονται τα απαραίτητα αποτελέσματα που χρειάζονται για την τελική επεξεργασία.

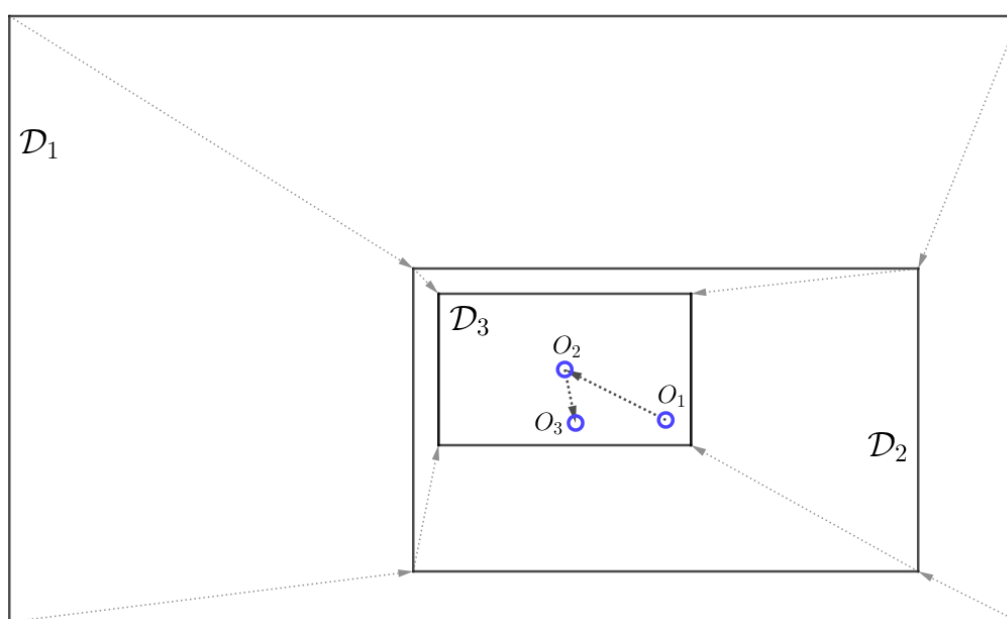
Τελευταίο βήμα είναι η εφαρμογή της RSM για την εύρεση του ελαχίστου. Το ελάχιστο αυτό χρησιμοποιείται για τον επαναπροσδιορισμό των ορίων σχεδιασμού και την επανάληψη της μεθόδου, μέχρι να έχουμε επιθυμητή σύγκλιση. Τότε σταματάει η διαδικασία και πλέον έχουμε προσδιορίσει πλήρως το τελικό αποτέλεσμα.

1.6 Πολυεπίπεδη SMCT

Όπως προαναφέρθηκε, η ιδιαιτερότητα της προσέγγισης που γίνεται στο [1] και ακολουθείται και στην παρούσα διπλωματική, είναι η επανάληψη της μεθόδου σε πολλά επίπεδα με λιγότερα δείγματα, έναντι της απευθείας χρήσης ενός επιπέδου με περισσότερα δείγματα. Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση είναι πιο αποτελεσματική και ακριβής, καθώς το κάθε επίπεδο είναι ευαίσθητο σε θόρυβο λόγω της τυχαιότητας των δειγμάτων. Με την αύξηση των επιπέδων του SMCT, ο

θόρυβος αυτός μειώνεται. Συνεπώς το τελικό αποτέλεσμα είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα απ' ό τι στην κλασική προσέγγιση, όπου μια πιθανή κακή επιλογή δείγματος μπορεί να μας οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Στο πρώτο επίπεδο βελτιστοποίησης, η μέθοδος δειγματοληψίας εφαρμόζεται στον αρχικό χώρο δειγματοληψίας, ο οποίος είναι σχετικά ευρύς. Ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία, έχουμε εξάγει ένα πρώτο ελάχιστο, καθώς και τα σημεία για το οποία αυτό λαμβάνεται. Υπάρχει συνεπώς ένα νέο «κέντρο» για κάθε μεταβλητή, γύρω από το οποίο εστιάζεται ο δειγματοληπτικός χώρος. Σε αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται η δειγματοληψία για τον νέο δειγματοληπτικό χώρο, ο οποίος είναι στενότερος από τον αρχικό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κριθεί ικανοποιητική η ακρίβεια του αποτελέσματος. Μια τυπική περίπτωση μείωσης του μεγέθους των διαστημάτων καθώς αυξάνεται το επίπεδο, φαίνεται για δύο μεταβλητές στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2. Γραφικό παράδειγμα εφαρμογής της πολυεπίπεδης SMCT δύο μεταβλητών.

Έστω D_1 ο αρχικός δειγματοληπτικός χώρος σχεδιασμού. Από το πρώτο επίπεδο της SMCT προκύπτει ένα ελάχιστο στο σημείο O_1 . Στη συνέχεια ο χώρος δειγματοληψίας μικραίνει, εστιάζομενος γύρω από το O_1 και γίνεται μεγέθους D_2 . Κατά συνέπεια το δεύτερο επίπεδο δειγματοληψίας εφαρμόζεται και το ελάχιστο εντοπίζεται στο σημείο O_2 . Θεωρώντας το τρίτο επίπεδο ως το τελικό, το προκύπτον ελάχιστο O_3 θεωρείται και το οριστικό ελάχιστο του συστήματος.

Παρόμοια λογική ακολουθείται και για τις τρεις διαστάσεις, όπως συμβαίνει στην παρούσα διπλωματική. Θα χρησιμοποιηθεί επίσης η λογική των τριών επιπέδων, καθώς αποδεικνύεται [1] ότι είναι ο βέλτιστος αριθμός. Αυτό σημαίνει ότι για παραπάνω επίπεδα δεν αυξάνεται σημαντικά η ακρίβεια του αποτελέσματος. Λεπτομέρειες σχετικά με την εφαρμογή της SMCT στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ανεμογεννητριών. Το Κεφάλαιο επικεντρώνεται στον έλεγχο βήματος που στοχεύει στη διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής για υψηλές ταχύτητες ανέμου, και όχι στις ηλεκτρικές μεθόδους μεγιστοποίησης της ισχύος που χρησιμοποιούνται για ταχύτητες ανέμου υπό της ονομαστικής. Εξετάζονται επίσης οι δευτερεύουσες τεχνικές ελέγχου, οι οποίες εξυπηρετούν εναλλακτικούς σκοπούς, διερευνάται η επιρροή τους στο σύστημα, και γίνεται η αναλυτική περιγραφή τους.

2.2 Τεχνολογίες ελέγχου ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες έχουν ως στόχο την βέλτιστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής σε ετήσια βάση. Θεωρητικά αυτό σημαίνει ότι πρέπει ο εξοπλισμός να κατασκευάζεται ώστε να μπορεί να παράγει ως και στη μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα ανέμου. Πρακτικά όμως αυτό δεν συμβαίνει, καθώς πολύ ισχυροί άνεμοι σπανίζουν, γεγονός που θα οδηγούσε σε υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος, το οποίο είναι τεχνοοικονομικά ασύμφορο.

Αυτό που συμβαίνει στην πράξη είναι να σχεδιάζονται ανεμογεννήτριες ώστε να αποδίδουν την μέγιστη ενέργεια για ταχύτητες ανέμου ανάμεσα στα 12 – 15 m/s, η οποία αποτελεί και την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Η αιτία είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ταχυτήτων ανέμου συνήθως βρίσκεται σε αυτή την περιοχή. Η εφαρμοζόμενη τακτική είναι να θυσιάζεται η παραπάνω ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί όταν ο άνεμος είναι μεγαλύτερος ώστε να αποφευχθεί υπερβολική φόρτιση του εξοπλισμού, κλπ.

Με αυτή την λογική έχουν εισαχθεί οι τεχνολογίες μηχανικού περιορισμού της επίδρασης της ταχύτητας ανέμου στην παραγωγή ισχύος. Οι δύο πιο σημαντικές είναι:

- απώλεια στήριξης (stall control)
- γωνία βήματος πτερυγίου (pitch control)

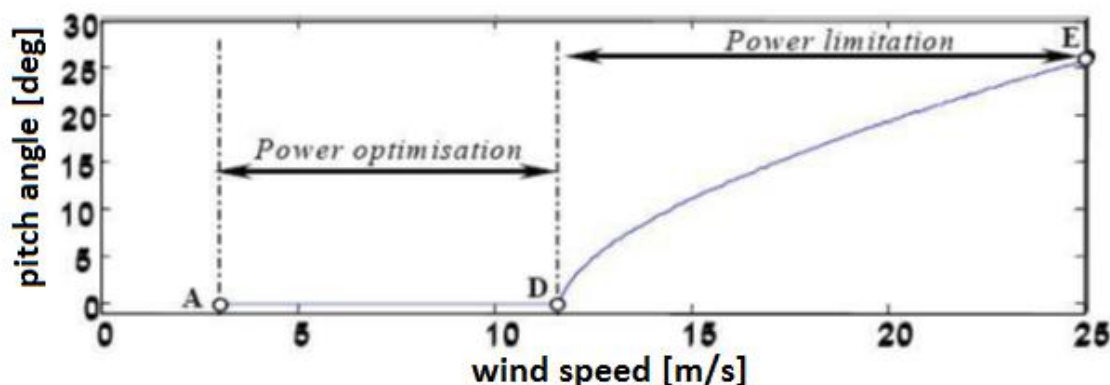
Η πρώτη τεχνολογία είναι παθητική και εγγενής των πτερυγίων, δηλαδή στηρίζεται στην κατασκευή και τη γεωμετρία τους. Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα και τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, ώστε για μεγάλες ταχύτητες ανέμου να δημιουργείται αποκόλληση της ροής που οδηγεί σε απώλεια στήριξης (stall).

Η δεύτερη τεχνολογία αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίου (pitch control) είναι μια ενεργητική μέθοδος μεταβολής της ενέργειας που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια. Ο τρόπος που αυτό συμβαίνει είναι μέσω στροφής των πτερυγίων είτε προς τη διεύθυνση του ανέμου, είτε εναντίον της, με σκοπό να αυξήσουν ή να μειώσουν αντίστοιχα την επιφάνεια επαφής τους με τον εισερχόμενο άνεμο, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της παραγόμενης ισχύος.

2.3 Έλεγχος ισχύος στροφών

Ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίου με ίδια τιμή σε όλα τα πτερύγια (collective pitch control) αποτελεί την κλασική μέθοδο που χρησιμοποιείται για το pitch control. Πρωταρχικός στόχος είναι ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής και η ρύθμιση ισχύος της ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή, η γωνία βήματος λαμβάνεται ως μοναδική για όλο το σύστημα και όλα τα πτερύγια ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με βάση τη συμπεριφορά του συστήματος ως σύνολο.

Η βέλτιστη γωνία βήματος για ταχύτητες μικρότερες της ονομαστικής είναι οι κοντά στις 0°. Σκοπός του ελέγχου σε αυτές τις ταχύτητες είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Όταν όμως οι ταχύτητες αυξάνονται, σκοπός του ελέγχου είναι η διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής και της ισχύος στην ονομαστική τους τιμή. Συνεπώς η γωνία ελέγχου αυξάνεται, μειώνοντας την επιφάνεια επαφής και κατ' επέκταση αποτρέποντας την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της παραγόμενης ισχύος. Μια τυπική σχέση της καμπύλης ταχύτητας ανέμου – απαίτησης γωνίας ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Καμπύλη γωνίας βήματος πτερυγίου συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου.

Ο έλεγχος του συστήματος για την διατήρηση της ονομαστικής ταχύτητας, γίνεται μέσω υπολογισμού της απαίτησης γωνίας ελέγχου κατά τη διάρκεια λειτουργίας, με χρήση της διαφοράς της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων από την ονομαστική. Συνεπώς η εξίσωση ελέγχου εκφράζεται από τη σχέση:

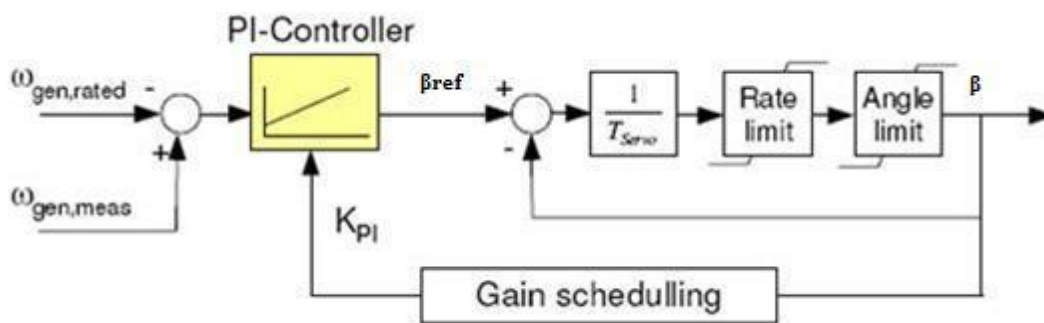
$$\beta_{ref} = k_p(\Omega_R - \Omega_{ref}) + k_i \int_0^t (\Omega_R - \Omega_{ref}) dt \quad (2.1)$$

όπου Ω_R η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων και Ω_{ref} η ταχύτητα αναφοράς, δηλαδή η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής.

Προκειμένου να είναι πιο ρεαλιστική η απόκριση στο σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος, χρησιμοποιείται σταθερά χρόνου T_{servo} για την προσομοίωση της ταχύτητας απόκρισης του σερβομηχανισμού και περιοριστές για τη γωνία βήματος ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$) και τον ρυθμό μεταβολής της ($10^\circ/s$). Η αναφορά της γωνίας βήματος που υπολογίστηκε συγκρίνεται με την πραγματική και στη συνέχεια το σφάλμα διορθώνεται μέσω του σερβομηχανισμού.

Τέλος, λόγω της αεροδυναμικής ευαισθησίας της γωνίας όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη, είναι σημαντικό να υπάρχει μέριμνα ώστε τα κέρδη να μην είναι σταθερά για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου. Συνεπώς η παραπάνω διαδικασία μπορεί να εμπλουτιστεί με σύστημα gain scheduling, με στόχο την κατάλληλη μεταβολή των κερδών k_p , k_i για την προσαρμογή τους με βάση την ταχύτητα ανέμου.

Η τελική μορφή του ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίου δίνεται στο Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2. Σύνοψη του ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίου.

2.4 Ανεξάρτητος έλεγχος βήματος

2.4.1 Εισαγωγή

Ο ανεξάρτητος έλεγχος πτερυγίων (independent ή individual pitch control – IPC) είναι μια τεχνική σύμφωνα με την οποία κάθε πτερύγιο έχει ξεχωριστή γωνία βήματος η οποία ελέγχεται συμπληρωματικά του κλασικού ελέγχου βήματος. Η ανάγκη για τον ανεξάρτητο έλεγχο πτερυγίων προκύπτει από τα μεταβαλλόμενα φορτία που ασκούνται στα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής. Οι σημαντικότεροι λόγοι για την εμφάνιση φορτίων που διαφοροποιούνται από πτερύγιο σε πτερύγιο είναι η τύρβη, η σκίαση της ροής του ανέμου από τον πύργο και την άτρακτο και οι ασυμμετρίες, με σημαντικότερες τη γωνία απόκλισης του ανέμου και το οριακό στρώμα εδάφους. Η ύπαρξη των παραγόντων αυτών επηρεάζει όχι μόνο τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στα πτερύγια, αλλά κατ' επέκταση και την μέση ταχύτητα, την παραγωγή ισχύος, κλπ.

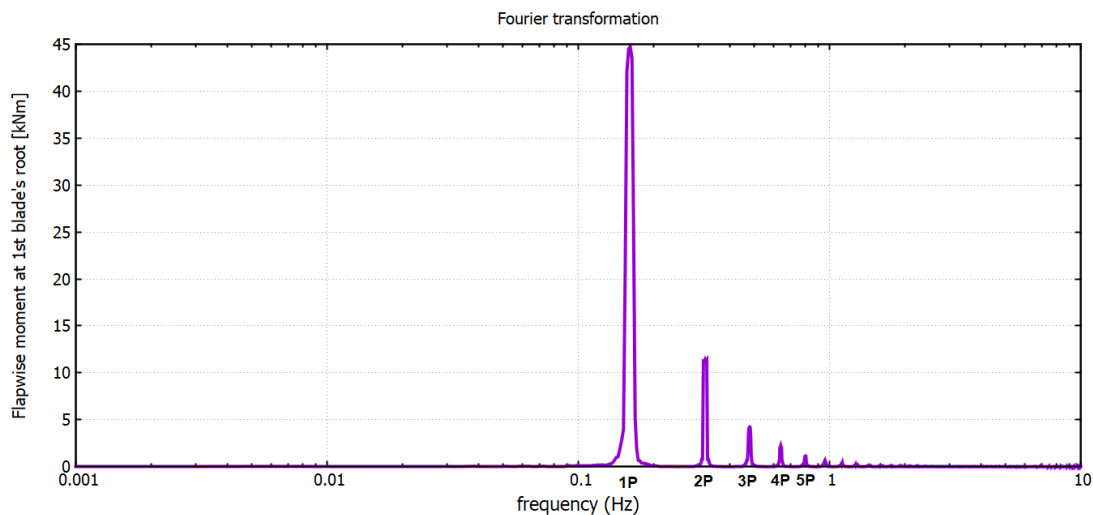
Λόγω της περιστροφικής κίνησης της ανεμογεννήτριας, οι δυνάμεις και οι ροπές που δημιουργούνται στα πτερύγια εμφανίζουν περιοδικότητα. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται σε πολλαπλάσια της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής. Μπορεί συνεπώς να χρησιμοποιηθεί ανάλυση Fourier για την έκφραση των ροπών που ασκούνται προς την κατεύθυνση του πτερυγίου, οι οποίες συμβολίζονται M_{flap} , ως άθροισμα συνημιτονοειδών συναρτήσεων:

$$M_{flap} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n \cdot \psi + \varphi_n) \quad (2.2)$$

όπου n είναι η n -οστή συχνότητα, ψ η αξιμουθιακή γωνία περιστροφής, C το αντίστοιχο πλάτος της ροπής και φ η αντίστοιχη γωνία της ροπής.

Συνεπώς για $n=1$ εκφράζονται τα φαινόμενα που συμβαίνουν 1 φορά ανά περιστροφή, ή once-per-revolution, ή 1P, για $n=2$ εκφράζονται τα φαινόμενα που συμβαίνουν 2 φορές ανά περιστροφή, ή twice-per-revolution, ή 2P κ.ο.κ. Συνηθίζεται οι επιμέρους ροπές να προσδιορίζονται και να εκφράζονται με την προαναφερθείσα δομή, δηλαδή 1P για τη βασική συχνότητα, 2P για τη δεύτερη αρμονική, 3P για την τρίτη αρμονική κλπ. Σημειώνεται ότι για $n=0$ εκφράζεται η σταθερή ροπή του ανέμου που δίνεται καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου.

Αποδεικνύεται ότι η πιο σημαντική αρμονική είναι η 1P και ότι έχει την μεγαλύτερη επιρροή στα φορτία των πτερυγίων. Μια τυπική περίπτωση ροπών υπό ανάλυση Fourier σε ένα πτερύγιο φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3. Πλάτη αρμονικών που προκύπτουν από ανάλυση Fourier της M_{flap} στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής $\Omega = 9.6$ rpm.

2.4.2 Κύριες τεχνικές ελέγχου

Η βασική μέθοδος αντιμετώπισης των παραπάνω φορτίων είναι είτε η περιστροφή ολόκληρου του πτερυγίου, είτε η περιστροφή ενός κομματιού του πτερυγίου. Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για IPC. Στην δεύτερη περίπτωση, μιλάμε για την ενσωμάτωση ενός μεταπτερυγίου (flap) το οποίο

κινείται ξεχωριστά από την υπόλοιπη κατασκευή και το οποίο αποτελεί τον Independent Flap Control (IFC). Οι δύο μέθοδοι βέβαια στη βάση τους είναι ίδιες, συνεπώς δεν χρίζει ιδιαίτερης ανάλυσης κάποια από τις δύο, ενώ διάκριση ανάμεσα στον IPC και στον IFC δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Όμως για λόγους πληρότητας θα αναφέρουμε τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Το πλεονέκτημα του IFC είναι ότι έχουμε κίνηση μόνο σε ένα μικρό μέρος του πτερυγίου. Αυτό σημαίνει μεταξύ άλλων ευκολία στην ενεργοποίηση της μεθόδου, μείωση της απαιτούμενης ενέργειας και ταχύτερες αποκρίσεις. Όμως πρόκειται για μια μέθοδο που δεν είναι επαρκώς δοκιμασμένη και αποφεύγεται καθώς δεν υπάρχει κοινώς αποδεκτή μορφή των απαιτούμενων flaps. Από την άλλη, ο IPC είναι μια πιο ώριμη και πιο εύκολα υλοποιήσιμη τεχνολογία, καθώς δεν επιβάλλει σημαντικές αλλαγές στην ήδη υπάρχουσα μορφή των πτερυγίων. Αυτό είναι και το βασικό του πλεονέκτημα.

Στην παρούσα εργασία, ως μέθοδος ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων επιλέγεται ο IPC.

2.4.3 Περιγραφή του ελέγχου

Το πρώτο βήμα για την εφαρμογή του ελέγχου είναι ο μετασχηματισμός των κάθετων και παράλληλων του πτερυγίου δυνάμεων M_{flap} και M_{edge} σε στρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων που κινείται με την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων αλλά είναι παράλληλο της ατράκτου. Αυτό έχει στόχο να αποσυνδέσει την επιρροή του κλασικού pitch control που στρέφει τα πτερύγια, από τον IPC. Οι ροπές που προκύπτουν ονομάζονται out-of-plane moments.

$$M_{out} = M_{flap} \cos(pitch) + M_{edge} \sin(pitch) \quad (2.3)$$

Στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός Coleman, που δεν είναι τίποτα άλλο από έναν πίνακα στροφής που μετασχηματίζει το στρεφόμενο σύστημα των M_{out} στο σταθερό σύστημα των κάθετων στην άτρακτο ροπών M_{tilt} και M_{yaw} .

$$\begin{Bmatrix} M_{tilt} \\ M_{yaw} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \cos(\psi_1) & \frac{2}{3} \cos(\psi_2) & \frac{2}{3} \cos(\psi_3) \\ \frac{2}{3} \sin(\psi_1) & \frac{2}{3} \sin(\psi_2) & \frac{2}{3} \sin(\psi_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{out_1} \\ M_{out_2} \\ M_{out_3} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

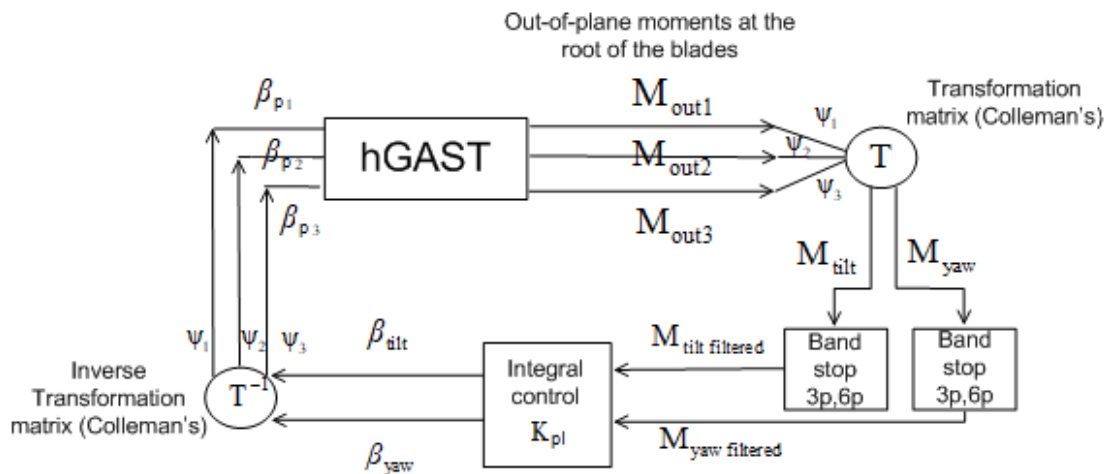
Στη συνέχεια οι M_{tilt} και M_{yaw} περνάνε από κάποια φίλτρα για την αποκοπή των ανεπιθύμητων συχνοτήτων και μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι για τον έλεγχο του συστήματος, που είναι δύο συναρτήσεις της μορφής

$$y = k_{p_{ipc}} u + k_{i_{ipc}} \int_0^t u dt \quad (2.5)$$

όπου u είναι οι φιλτραρισμένες ροπές M_{tilt} και M_{yaw} και y είναι δύο σταθερές γωνίες β_{tilt} και β_{yaw} αντίστοιχα.

Με τον αντίστροφο μετασχηματισμό, οι γωνίες β μεταφράζονται εντέλει σε γωνίες στροφής των πτερυγίων.

Η επιτυχία της συγκεκριμένης προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι καταφέρνει, εκμεταλλευόμενης της συμμετρίας, να περιγράψει ένα σύνθετο σύστημα πολλαπλών εισόδων με ένα απλό σετ δύο τιμών, τις M_{yaw} και M_{tilt} , οι οποίες δεν είναι τίποτα άλλο παρά δύο πραγματικοί αριθμοί. Η μέθοδος IPC συνοψίζεται τελικά στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Σύνοψη του ανεξάρτητου ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ SMCT

3.1 Σύνοψη του συστήματος

Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε στην επίγεια έκδοση της πρότυπης ανεμογεννήτριας DTU 10 MW [5]. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το αερο-σερβο-ελαστικό μοντέλο hGAST του ΕΜΠ. Τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις φαίνονται στον πίνακα:

Ισχύς	10638.3 kW
Ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής	5.0 rpm
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	9.6 rpm
Μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή	15.6 MNm
Μέγιστη γωνία βήματος	90°
Μέγιστος ρυθμός μεταβολής γωνίας βήματος	10°/sec
Αριθμός αρμονικών για τον IPC	1P
Μέγιστη γωνία βήματος για τον IPC	5°
Ύψος πύργου	118.38 m
Μήκος πτερυγίων	89.165 m

Πίνακας 3.1. Βασικά χαρακτηριστικά της A/G.

Δίνονται επίσης τα βασικά ανεμολογικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις:

Ταχύτητες ανέμου	13 – 25 m/s
Πυκνότητα αέρα	1.225 kg/m ³
Μοντέλο ανέμου	NTM
Ταχύτητα αναφοράς	42.5 m/s
Ένταση τύρβης για την εφαρμογή της SMCT	5%
Ένταση τύρβης για την επαλήθευση της SMCT	16%
Χρόνος προσομοίωσης	650 sec
Βήμα προσομοίωσης	0.05 sec

Πίνακας 3.2. Βασικά χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων.

3.2 Αναλυτική περιγραφή του συστήματος

Η πρότυπη ανεμογεννήτρια των 10MW, της οποίας τα βασικά στοιχεία δόθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της SMCT. Η μέθοδος έχει ως στόχο την από κοινού βελτιστοποίηση των μεταβλητών που αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 1 και περιγράψαμε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2, συγκεκριμένα τα k_p , k_i του pitch control και το k_{ipc} του independent pitch control.

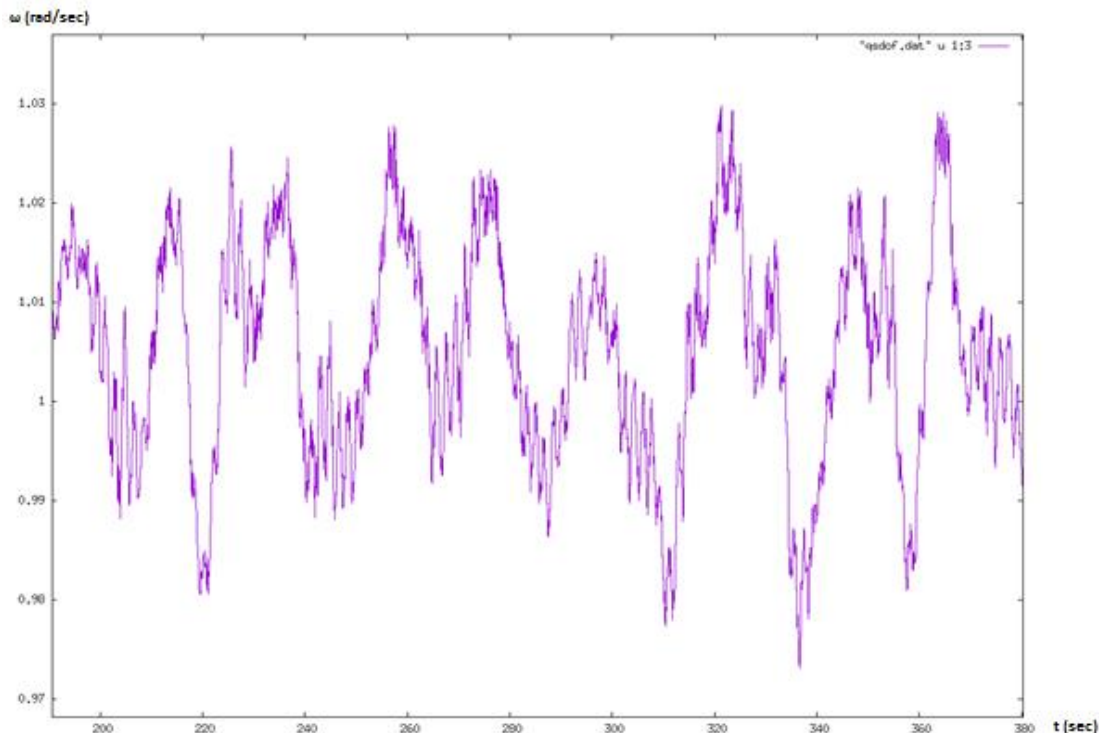
Ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται η δειγματοληπτική τυπική απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$y_s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Omega_i - \bar{\Omega})^2} \quad (3.1)$$

όπου N αριθμός των διακριτών σημείων της προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση, Ω_i οι στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας περιστροφής και $\bar{\Omega}$ η μέση ταχύτητα περιστροφής που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Omega_i \quad (3.2)$$

Μια τυπική μορφή της ταχύτητας περιστροφής σε rad/sec για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Σημειώνεται η μετατροπή $\omega_{rad/sec} = \omega_{rpm} \cdot \frac{\pi}{30}$



Σχήμα 3.1. Ταχύτητα περιστροφής συναρτήσει του χρόνου.

Ο χρόνος προσομοίωσης του συστήματος είναι 650 δευτερόλεπτα, εκ των οποίων τα πρώτα 50 «απορρίπτονται», ώστε να μην ληφθούν υπόψιν τα μεταβατικά φαινόμενα που υπάρχουν στην αρχή της απόκρισης. Σίγουρα ο χρόνος των 50 sec είναι παραπάνω από την τυπική μεταβατική διάρκεια, όμως επιλέχθηκε τόσος για λόγους ασφαλείας.

Το βήμα προσομοίωσης είναι τα 0.05 δευτερόλεπτα, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε δευτερόλεπτο του συστήματος διακριτοποιείται σε 20 υποδιαστήματα. Δεδομένου ότι ο χρόνος προσομοίωσης είναι 650sec, με τα πρώτα 50sec να μην λαμβάνονται υπόψιν στην τελική ανάλυση, αυτό σημαίνει ότι έχουμε $N=12000$ σημεία για τον υπολογισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης σύμφωνα με τις Σχέσεις (3.1) και (3.2).

Κατά τη φάση της εφαρμογής της SMCT, ο άνεμος που εισάγεται στο σύστημα βασίζεται στο φάσμα Kaimal με ένταση τύρβης στο 5%. Η χαμηλή τύρβη είναι απαραίτητη κατά τη φάση του σχεδιασμού προκειμένου να αποφεύγονται μεγάλες ριπές ανέμου, οι οποίες λειτουργούν σαν θόρυβος για την ανάλυση. Αυτό συμβαίνει επειδή στόχος της μεθόδου είναι ο σχεδιασμός των βέλτιστων γύρω από περιοχές ταχυτήτων ανέμου. Όταν ο άνεμος έχει μεγάλες αποκλίσεις, δεν υπάρχει συγκέντρωση των σημείων γύρω από την επιθυμητή περιοχή, οπότε το αποτέλεσμα δεν είναι αντιπροσωπευτικό.

Κατά τη φάση της επαλήθευσης αντιθέτως, είναι σημαντικό να υπάρχει σχετικά υψηλή τύρβη και επιλέγεται το επίπεδο του 16%. Ο λόγος είναι η απόδειξη της ικανότητας του καινούριου συστήματος ελέγχου να επιτυγχάνει τη μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης περισσότερο από τις εναλλακτικές μεθόδους ελέγχου με τις οποίες συγκρίνεται. Η επαλήθευση της μεθόδου αποτελεί αντικείμενο του Κεφαλαίου 4.

3.3 Περιγραφή της διαδικασίας

Τα βήματα που περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 1 για την SMCT εφαρμόζονται για 7 ταχύτητες ανέμου:

- 13 m/s
- 15 m/s
- 17 m/s
- 19 m/s
- 21 m/s
- 23 m/s
- 25 m/s

Για κάθε ταχύτητα ανέμου εφαρμόζονται 3 επίπεδα, ακολουθώντας τη λογική της μείωσης του δειγματοληπτικού χώρου σε κάθε επίπεδο. Για κάθε ταχύτητα η διαδικασία είναι ανεξάρτητη και δεν σχετίζεται με τις υπόλοιπες ταχύτητες.

Ο αριθμός δειγμάτων για την LHS είναι 15, γεγονός που σημαίνει ότι σε κάθε επίπεδο και για κάθε ταχύτητα ανέμου, γίνεται δειγματοληψία 15 σημείων από το χώρο σχεδιασμού των μεταβλητών, και για κάθε δείγμα πραγματοποιείται μία προσομοίωση του συστήματος και καταγράφεται η συμπεριφορά του.

Επιπλέον, η μέση ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων χρησιμοποιείται ως παράμετρος για την ορθότητα της προσομοίωσης για κάθε σημείο δειγματοληψίας. Αυτό είναι λογικό, καθώς δύναται η τυπική απόκλιση να είναι σε λογικά πλαίσια, όμως η μέση ταχύτητα περιστροφής να μην είναι. Αν η μέση ταχύτητα περιστροφής αποκλίνει πολύ από την ονομαστική, αυτό καταδεικνύει πιθανότητα ο ελεγκτής να μην ακολουθεί σωστά την τιμή αναφοράς, συνεπώς η προσομοίωση για το συγκεκριμένο σύνολο μεταβλητών είναι άστοχη. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για διάφορους λόγους, με σημαντικότερους τον κακό συνδυασμό κερδών από τη δειγματοληψία, μερική μείωση της περιστροφής κάτω από την ονομαστική για παροδικές ταχύτητες ανέμου που βρίσκονται κάτω της ονομαστικής, κ.α.

Η σκέψη αυτή ποσοτικοποιείται με ένα όριο στην ονομαστική ταχύτητα εντός του οποίου πρέπει να βρίσκονται τα αποτελέσματα. Αυτό το όριο επιλέγεται ίσο με $\pm 5\%$, δηλαδή για την συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια όπου $\Omega_R = 9.6 \text{ rpm} = 1.0053 \text{ rad/sec}$, πρέπει να ισχύει η σχέση

$$0.9550 \leq \bar{\Omega} \leq 1.0556 \quad (3.3)$$

Οποιοδήποτε αποτέλεσμα δεν ικανοποιεί την παραπάνω προδιαγραφή απορρίπτεται από τη συνέχεια της διαδικασίας. Πρέπει να δοθεί όμως προσοχή στο γεγονός ότι αν απορριφθούν πολλά αποτελέσματα, σημαίνει ότι δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την εφαρμογή της RSM, συνεπώς το συγκεκριμένο επίπεδο αποτυγχάνει εξ' ολοκλήρου. Η μόνη λύση για αυτό το πρόβλημα είναι η αλλαγή των σημείων δειγματοληψίας και επανάληψη του συγκεκριμένου επιπέδου.

Αυτό το πρόβλημα παρατηρήθηκε και στην πράξη με την επιλογή των σημείων για την εφαρμογή της LHS. Στις πρώτες δοκιμές σημείων δειγματοληψίας, άρχισε να παρατηρείται ότι κάποια επίπεδα για κάποιες ταχύτητες ανέμου άρχιζαν να εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις από την ονομαστική ταχύτητα. Αυτό μπορούσε να σημαίνει μόνο ότι η εφαρμογή της LHS ήταν αποτυχημένη. Οδηγηθήκαμε λοιπόν στον επαναπροσδιορισμό των σημείων.

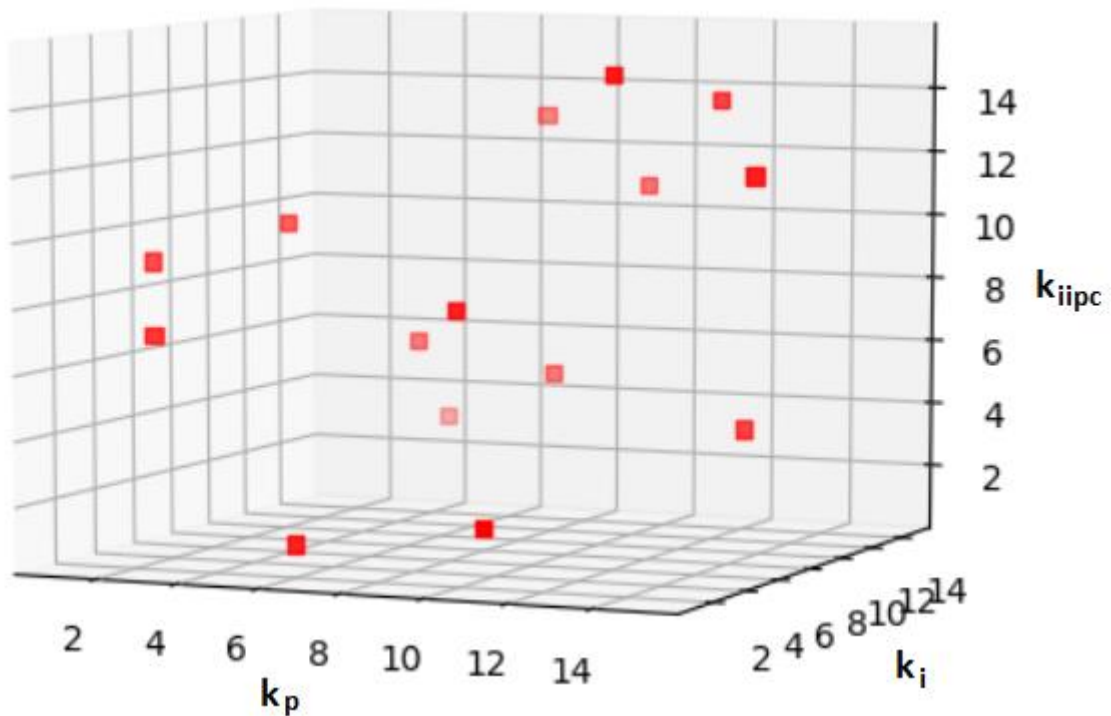
Αυτό είναι και το σημαντικό μειονέκτημα της δειγματοληψίας LHS. Η διαδικασία επιλογής των σημείων μπορεί να είναι επίπονη και υπάρχει περίπτωση να επαναπροσαρμοστεί πολλές φορές μέχρι να επιτευχθεί το ορθότερο αποτέλεσμα. Όμως εντέλει το αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό και σίγουρα εμφανίζει καλύτερες επιδόσεις από την τυχαία δειγματοληψία.

Το τελικό σύνολο 15 σημείων που καταλήξαμε στην παρούσα εργασία, που δεν εμφανίζει πρόβλημα απόρριψης επιπέδου κατά την εφαρμογή της RSM για καμία ταχύτητα ανέμου, είναι:

$$(k_p, k_i, k_{iipc}) =$$

- (1, 5, 9)
- (2, 3, 7)
- (3, 8, 10)
- (4, 15, 3)
- (5, 11, 6)
- (6, 2, 1)
- (7, 14, 13)
- (8, 12, 5)
- (9, 4, 8)
- (10, 13, 11)
- (11, 1, 2)
- (12, 6, 15)
- (13, 10, 14)
- (14, 9, 4)
- (15, 7, 12)

Γραφικά απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Επιλογή του δείγματος μέσω της μεθόδου LHS.

Ο τρόπος που δουλεύει η επιλογή των σημείων περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1. Ένα σύντομο πρακτικό παράδειγμα δίνεται παρακάτω:

Έστω ότι ο χώρος δειγματοληψίας και για τις τρεις μεταβλητές είναι:

$$0 \leq x \leq 1.5$$

Χωρίζουμε κάθε διάσταση σε 15 σημεία και επιλέγεται το κέντρο κάθε υποδιαστήματος ως πιθανό δείγμα. Συνεπώς για τη διάταξη π.χ. (1, 5, 9) το επιλεγμένο δείγμα μεταβλητών είναι το (0.05, 0.45, 0.85), για τη διάταξη (2, 3, 7) είναι το (0.15, 0.25, 0.65) κ.ο.κ. Με αυτό τον τρόπο εφαρμόζεται η δειγματοληψία.

Είναι εξίσου σημαντικό στοιχείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης η σωστή επιλογή του χώρου σχεδιασμού και δειγματοληψίας. Παρατηρήθηκε [1] ότι τιμές του k_p σημαντικά μεγαλύτερες του 1 και τιμές του k_i σημαντικά μεγαλύτερες του 0.3 προκαλούν εν γένει ασταθή συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Αντίστοιχα για τον IPC οι τιμές που προκαλούν συστηματική αστάθεια είναι για κέρδη μεγαλύτερα της τάξης του $1 \cdot 10^{-8}$. Η διαφορά στην τάξη μεγέθους εξηγείται από το γεγονός ότι οι πρώτες δύο μεταβλητές πολλαπλασιάζονται με γωνίες που είναι της τάξης της μονάδας, ενώ για τον IPC τα κέρδη πολλαπλασιάζονται με ροπές, που είναι της τάξης των μερικών MNm, δηλαδή $10^6 - 10^7$ Nm. Χάριν απλότητας, ο σχεδιασμός κανονικοποιείται ως προς τις άλλες δύο μεταβλητές. Συνεπώς από εδώ και πέρα ο σχεδιασμός θα γίνεται ως προς τη μοναδιαία τιμή, και για την εξαγωγή της πραγματικής τιμής κέρδους k_{ipc} θα πρέπει να γίνεται πολλαπλασιασμός της τιμής σχεδιασμού με συντελεστή 10^{-8} .

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο πόσο πρέπει να μειώνονται τα όρια όταν περνάμε από το ένα επίπεδο στο άλλο. Αν ο συντελεστής μεγέθυνσης είναι μικρός, τότε είναι πιθανόν τα τρία επίπεδα να μην οδηγήσουν σε πολύ ακριβές αποτέλεσμα, δεδομένου ότι το ελάχιστο προσεγγίζεται από ένα συγκριτικά μεγάλο εύρος τιμών. Αυτό σημαίνει ότι δεν προσφέρει ιδιαίτερο πλεονέκτημα έναντι της μονοεπίπεδης προσέγγισης. Από την άλλη, μεγάλος συντελεστής μεγέθυνσης μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια πληροφορίας, με σημαντικότερη την περίπτωση να προσπεραστεί το πραγματικό βέλτιστο όταν βρίσκεται κοντά στο όριο.

Πρέπει συνεπώς να επιλεγθεί ο συντελεστής με ιδιαίτερη προσοχή. Γενικά είναι πολύ δύσκολο να επιλεγθεί κοινός συντελεστής για όλες τις ταχύτητες ανέμου, με τρόπο που να οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Με βάση όμως μερικές δοκιμές καταλήξαμε σε μια κοινά αποδεκτή λύση, όπου χάριν απλότητας θα εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία.

Με αυτά τα δεδομένα, ο αρχικός χώρος σχεδιασμού / δειγματοληπτικός χώρος των τριών μεταβλητών είναι:

$$D_1 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq k_p \leq 1 \\ 0 \leq k_i \leq 0.3 \\ 0 \leq k_{ipc} \leq 1 \end{array} \right\}$$

Ο χώρος αυτός χρησιμοποιείται για το πρώτο επίπεδο της μεθόδου για όλες τις ταχύτητες ανέμου. Για το επόμενο επίπεδο αποφασίστηκε η μείωση του χώρου στο μισό για κάθε μεταβλητή. Συνεπώς για περιοχή γύρω από το πρώτο βέλτιστο πρέπει να ισχύει:

$$D_2 = \left\{ \begin{array}{l} |k_p - k_{p_{opt1}}| \leq 0.25 \\ |k_i - k_{i_{opt1}}| \leq 0.075 \\ |k_{i_{ipc}} - k_{i_{ipc_{opt1}}}| \leq 0.25 \end{array} \right\}$$

Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση όπου για κάποια μεταβλητή το κατώτερο όριο προκύπτει αρνητικό. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κέρδη ελεγκτών δεν επιτρέπεται να λάβουν αρνητική τιμή. Στην περίπτωση αυτή προσαρμόζουμε το άνω όριο για ίδιο εύρος με κατώτερο όριο το μηδέν. Συγκεκριμένα:

$$\begin{aligned} 0 \leq k_p, k_{i_{ipc}} \leq 0.5 \\ 0 \leq k_i \leq 0.15 \end{aligned}$$

Για το τρίτο επίπεδο επιλέγεται επίσης μείωση στο μισό για το δειγματοληπτικό χώρο. Για τη μεταβλητή k_i γίνεται στρογγυλοποίηση προς τα πάνω. Η νέα περιοχή επιλέγεται με βάση τον κανόνα:

$$D_3 = \left\{ \begin{array}{l} |k_p - k_{p_{opt2}}| \leq 0.125 \\ |k_i - k_{i_{opt2}}| \leq 0.04 \\ |k_{i_{ipc}} - k_{i_{ipc_{opt2}}}| \leq 0.125 \end{array} \right\}$$

Ομοίως, αν το κατώτατο όριο προκύψει αρνητικό, ο χώρος γίνεται:

$$\begin{aligned} 0 \leq k_p, k_{i_{ipc}} \leq 0.25 \\ 0 \leq k_i \leq 0.08 \end{aligned}$$

Το βέλτιστο σημείο που θα προκύψει από το τελικό επίπεδο θα αποτελεί και το τελικό βέλτιστο για τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.

3.4 Αποτελέσματα και εφαρμογή της RSM

3.4.1 Επίπεδο 1

Τα αποτελέσματα του πρώτου επιπέδου βελτιστοποίησης φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Υπενθυμίζουμε ότι για την πραγματική τιμή του $k_{i_{ipc}}$ πρέπει να γίνει πολλαπλασιασμός της τιμής των πινάκων με το συντελεστή 10^{-8} :

- 13 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.026205	1.0046	0.11040
0.100000	0.05	0.433330	0.027715	1.0046	0.11078
0.166670	0.15	0.633330	0.019310	1.0047	0.11052
0.233330	0.29	0.166670	0.008844	1.0049	0.11997
0.300000	0.21	0.366670	0.015554	1.0048	0.11071
0.366670	0.03	0.033333	0.018544	1.0058	0.12012
0.433330	0.27	0.833330	0.012095	1.0049	0.11055
0.500000	0.23	0.300000	0.011794	1.0048	0.11164
0.566670	0.07	0.500000	0.013707	1.0050	0.11107
0.633330	0.25	0.700000	0.010221	1.0050	0.11095
0.700000	0.01	0.100000	0.013431	1.0065	0.12002
0.766670	0.11	0.966670	0.011168	1.0050	0.11084
0.833330	0.19	0.900000	0.009040	1.0050	0.11099
0.900000	0.17	0.233330	0.006410	1.0050	0.12004
0.966670	0.13	0.766670	0.008292	1.0050	0.11123

- 15 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.024584	1.0049	0.18231
0.100000	0.05	0.433330	0.023061	1.0047	0.18243
0.166670	0.15	0.633330	0.017461	1.0049	0.18216
0.233330	0.29	0.166670	0.008739	1.0049	0.18670
0.300000	0.21	0.366670	0.015083	1.0049	0.18283
0.366670	0.03	0.033333	0.014883	1.0054	0.18673
0.433330	0.27	0.833330	0.010088	1.0048	0.18252
0.500000	0.23	0.300000	0.011839	1.0049	0.18309
0.566670	0.07	0.500000	0.011377	1.0051	0.18263
0.633330	0.25	0.700000	0.008051	1.0049	0.18242
0.700000	0.01	0.100000	0.010831	1.0056	0.18661
0.766670	0.11	0.966670	0.009444	1.0050	0.18248
0.833330	0.19	0.900000	0.007978	1.0050	0.18252
0.900000	0.17	0.233330	0.005826	1.0050	0.18672
0.966670	0.13	0.766670	0.008058	1.0049	0.18258

- 17 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.025277	1.0050	0.23569
0.100000	0.05	0.433330	0.021638	1.0048	0.23578
0.166670	0.15	0.633330	0.016572	1.0049	0.23582
0.233330	0.29	0.166670	0.008884	1.0049	0.23872
0.300000	0.21	0.366670	0.014056	1.0049	0.23607
0.366670	0.03	0.033333	0.013718	1.0053	0.23871
0.433330	0.27	0.833330	0.009966	1.0050	0.23582
0.500000	0.23	0.300000	0.011414	1.0049	0.23629
0.566670	0.07	0.500000	0.011237	1.0050	0.23602
0.633330	0.25	0.700000	0.008470	1.0050	0.23581
0.700000	0.01	0.100000	0.010096	1.0054	0.23861
0.766670	0.11	0.966670	0.008963	1.0049	0.23582
0.833330	0.19	0.900000	0.007850	1.0049	0.23574
0.900000	0.17	0.233330	0.005884	1.0050	0.23872
0.966670	0.13	0.766670	0.007860	1.0050	0.23614

- 19 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.021920	1.0048	0.28173
0.100000	0.05	0.433330	0.021957	1.0049	0.28206
0.166670	0.15	0.633330	0.015418	1.0050	0.28175
0.233330	0.29	0.166670	0.008945	1.0050	0.28416
0.300000	0.21	0.366670	0.012964	1.0049	0.28221
0.366670	0.03	0.033333	0.013258	1.0054	0.28411
0.433330	0.27	0.833330	0.009380	1.0050	0.28200
0.500000	0.23	0.300000	0.010986	1.0049	0.28234
0.566670	0.07	0.500000	0.010941	1.0050	0.28209
0.633330	0.25	0.700000	0.009027	1.0050	0.28211
0.700000	0.01	0.100000	0.010065	1.0064	0.28390
0.766670	0.11	0.966670	0.009387	1.0050	0.28196
0.833330	0.19	0.900000	0.008298	1.0049	0.28193
0.900000	0.17	0.233330	0.006150	1.0050	0.28414
0.966670	0.13	0.766670	0.008818	1.0050	0.28209

- 21 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.0228890	1.0048	0.32367
0.100000	0.05	0.433330	0.0203550	1.0049	0.32390
0.166670	0.15	0.633330	0.0159010	1.0050	0.32386
0.233330	0.29	0.166670	0.0091377	1.0050	0.32560
0.300000	0.21	0.366670	0.0134660	1.0049	0.32393
0.366670	0.03	0.033333	0.0131220	1.0054	0.32554
0.433330	0.27	0.833330	0.0099992	1.0050	0.32388
0.500000	0.23	0.300000	0.0109490	1.0049	0.32401
0.566670	0.07	0.500000	0.0110270	1.0050	0.32381
0.633330	0.25	0.700000	0.0092659	1.0050	0.32380
0.700000	0.01	0.100000	0.0101920	1.0071	0.32503
0.766670	0.11	0.966670	0.0095810	1.0051	0.32379
0.833330	0.19	0.900000	0.0096880	1.0049	0.32382
0.900000	0.17	0.233330	0.0065270	1.0050	0.32557
0.966670	0.13	0.766670	0.1046100	1.0067	0.31752

- 23 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.0200880	1.0048	0.36258
0.100000	0.05	0.433330	0.0203720	1.0049	0.36266
0.166670	0.15	0.633330	0.0156520	1.0050	0.36270
0.233330	0.29	0.166670	0.0094532	1.0050	0.36423
0.300000	0.21	0.366670	0.0136660	1.0049	0.36286
0.366670	0.03	0.033333	0.0129820	1.0052	0.36413
0.433330	0.27	0.833330	0.0106230	1.0050	0.36272
0.500000	0.23	0.300000	0.0122310	1.0049	0.36276
0.566670	0.07	0.500000	0.0120870	1.0050	0.36281
0.633330	0.25	0.700000	0.0105430	1.0050	0.36268
0.700000	0.01	0.100000	0.0100430	1.0038	0.36457
0.766670	0.11	0.966670	0.0106080	1.0050	0.36273
0.833330	0.19	0.900000	0.1169400	1.0083	0.36045
0.900000	0.17	0.233330	0.0069809	1.0050	0.36421
0.966670	0.13	0.766670	0.1171400	1.0024	0.36066

- 25 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.033333	0.09	0.566670	0.0203610	1.0049	0.39945
0.100000	0.05	0.433330	0.0206080	1.0049	0.39947
0.166670	0.15	0.633330	0.0156740	1.0050	0.39933
0.233330	0.29	0.166670	0.0098325	1.0050	0.40066
0.300000	0.21	0.366670	0.0143770	1.0050	0.39960
0.366670	0.03	0.033333	0.0128940	1.0049	0.40067
0.433330	0.27	0.833330	0.0117460	1.0050	0.39945
0.500000	0.23	0.300000	0.0136070	1.0049	0.39932
0.566670	0.07	0.500000	0.0120790	1.0050	0.39937
0.633330	0.25	0.700000	0.0123060	1.0050	0.39934
0.700000	0.01	0.100000	0.0117810	1.0002	0.40204
0.766670	0.11	0.966670	0.0702320	1.0069	0.39694
0.833330	0.19	0.900000	0.1223500	1.0087	0.39678
0.900000	0.17	0.233330	0.0073553	1.0050	0.40061
0.966670	0.13	0.766670	0.1247800	1.0031	0.40076

Μια παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα είναι ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται και η μέση τιμή του pitch. Αυτό είναι λογικό, καθώς είναι δύο μεταβλητές άμεσα εξαρτημένες μεταξύ τους. Αντιθέτως, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο σχετικά μεγάλο εύρος τιμών του πρώτου επιπέδου, το οποίο δεν είναι ικανό να φανερώσει τις μεταβολές ανάμεσα στις διάφορες ταχύτητες.

Εφαρμόζοντας την RSM, εξάγουμε την πρώτη προσέγγιση για το βέλτιστο του συστήματος για κάθε ταχύτητα ανέμου. Αυτό εκφράζεται από το ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης και τις μεταβλητές k_p , k_i και k_{iipc} για τις οποίες λαμβάνεται. Για όλα τα αποτελέσματα πληρούνται τα κριτήρια μέσης ταχύτητας περιστροφής, συνεπώς καμία τιμή δεν απορρίπτεται από τους υπολογισμούς. Επιπλέον υπολογίζεται και η μέση τιμή του pitch, ως η μέση τιμή του pitch των αποτελεσμάτων. Αυτό αποτελεί σχετικά αντικειμενικό κριτήριο, λόγω της εγγύτητας των τιμών της γωνίας βήματος κάθε δειγματοληψίας για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Συνεπώς για τις επτά ταχύτητες ανέμου, έχουμε:

Wind speed (m/s)	k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	$F_{obj} =$ Local min (rad/sec)	Mean pitch (rad)
13	1.00000	0.300000	0.00000	0.0024558	0.113322
15	1.00000	0.300000	0.00000	-0.0004063	0.183649
17	0.91391	0.300000	0.00000	0.0026919	0.236651
19	1.00000	0.098498	0.00000	0.0038614	0.282572
21	0.00000	0.000000	1.00000	-0.1659700	0.323849
23	0.00000	0.000000	1.00000	-0.2505500	0.362850
25	0.00000	0.000000	1.00000	-0.1375800	0.399586

Μια πρώτη παρατήρηση κοιτώντας τα αποτελέσματα του πρώτου επιπέδου είναι ότι σχεδόν σε καμία περίπτωση οι συντεταγμένες του ελαχίστου δεν εντοπίστηκαν εντός των ορίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μέθοδος «χτύπησε» άνω ή κάτω φράγμα, υπονοώντας πιθανή αστοχία επιλογής του δειγματοληπτικού χώρου ή των σημείων δειγματοληψίας. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν συμβαίνει. Στο πρώτο επίπεδο το αποτέλεσμα είναι πιο γενικό και αποτελεί απλώς έναν δείκτη για το προς ποια κατεύθυνση πρέπει να μειωθεί το διάστημα για το επόμενο επίπεδο. Αν σταματούσαμε σε αυτό το επίπεδο για το συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων, το αποτέλεσμα της διαδικασίας θα ήταν όντως πρακτικά ανούσιο. Όμως η διαδικασία συνεχίζεται και η πρώτη ουσιαστική προσέγγιση αναμένεται να γίνει στο επόμενο επίπεδο.

Μια δεύτερη παρατήρηση αφορά τις αρνητικές τιμές που λαμβάνουν μερικά ελάχιστα της αντικειμενικής συνάρτησης. Γνωρίζουμε ότι η τυπική απόκλιση δεν μπορεί να είναι αρνητικός αριθμός, συνεπώς οι τιμές αυτές δεν είναι ορθές. Αυτό όμως εξηγείται από το γεγονός ότι τα ελάχιστα προκύπτουν από επαναληπτική διαδικασία, δηλαδή είναι απλώς ένα μαθηματικό αποτέλεσμα και όχι πραγματική μέτρηση δεδομένων. Είναι λογικό για ένα ευρύ πεδίο ορισμού η συνάρτηση που προκύπτει από την RSM να βρεθεί στον αρνητικό άξονα, ειδικά όταν οι τιμές των ελαχίστων προκύπτουν στα όρια, που σημαίνει ότι δημιουργείται μεγάλη κλίση της συνάρτησης στα σημεία αυτά. Όπως θα φανεί στα επόμενα επίπεδα το φαινόμενο αυτό μειώνεται, μέχρι το τελευταίο επίπεδο όπου εξαλείφεται, και μπορούμε πλέον να συμπεράνουμε ότι τα ελάχιστα της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκονται κοντά στο πραγματικό.

3.4.2 Επίπεδο 2

Τα νέα διαστήματα ορισμού για την εφαρμογή του επόμενου επιπέδου βρίσκονται από τα αποτελέσματα του πρώτου επιπέδου, μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω. Τα διαστήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- 13 m/s

$$k_p = [0.75 , 1.25]$$

$$k_i = [0.225 , 0.375]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.5]$$

- 15 m/s

$$k_p = [0.75 , 1.25]$$

$$k_i = [0.225 , 0.375]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.5]$$

- 17 m/s

$$k_p = [0.66391 , 1.16391]$$

$$k_i = [0.225 , 0.375]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.5]$$

- 19 m/s

$$k_p = [0.75 , 1.25]$$

$$k_i = [0.0235 , 0.1735]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.5]$$

- 21 m/s

$$k_p = [0 , 0.5]$$

$$k_i = [0 , 0.15]$$

$$k_{iipc} = [0.75 , 1.25]$$

- 23 m/s

$$k_p = [0 , 0.5]$$

$$k_i = [0 , 0.15]$$

$$k_{iipc} = [0.75 , 1.25]$$

- 25 m/s

$$k_p = [0 , 0.5]$$

$$k_i = [0 , 0.15]$$

$$k_{iipc} = [0.75 , 1.25]$$

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Υπενθυμίζουμε ότι για την πραγματική τιμή του k_{iipc} πρέπει να γίνει πολλαπλασιασμός της τιμής των πινάκων με το συντελεστή 10^{-8} :

- 13 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.76667	0.27	0.283330	0.007955	1.0049	0.11395
0.80000	0.25	0.216670	0.005584	1.0049	0.12004
0.83333	0.30	0.316670	0.008963	1.0049	0.11173
0.86667	0.37	0.083333	0.004460	1.0049	0.12006
0.90000	0.33	0.183330	0.004624	1.0049	0.12005
0.93333	0.24	0.016667	0.005326	1.0049	0.12013
0.96667	0.36	0.416670	0.007440	1.0049	0.11125
1.00000	0.34	0.150000	0.004350	1.0050	0.12005
1.03330	0.26	0.250000	0.004966	1.0050	0.11999
1.06670	0.35	0.350000	0.007442	1.0049	0.11136
1.10000	0.23	0.050000	0.005044	1.0050	0.12009
1.13330	0.28	0.483330	0.006640	1.0049	0.11119
1.16670	0.32	0.450000	0.006422	1.0049	0.11134
1.20000	0.31	0.116670	0.004205	1.0050	0.12007
1.23330	0.29	0.383330	0.006739	1.0049	0.11113

- 15 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.76667	0.27	0.283330	0.008249	1.0049	0.18330
0.80000	0.25	0.216670	0.005266	1.0050	0.18672
0.83333	0.30	0.316670	0.008703	1.0049	0.18306
0.86667	0.37	0.083333	0.004383	1.0050	0.18674
0.90000	0.33	0.183330	0.004489	1.0050	0.18673
0.93333	0.24	0.016667	0.005004	1.0049	0.18680
0.96667	0.36	0.416670	0.006837	1.0050	0.18271
1.00000	0.34	0.150000	0.004251	1.0050	0.18674
1.03330	0.26	0.250000	0.004765	1.0050	0.18643
1.06670	0.35	0.350000	0.008210	1.0049	0.18299
1.10000	0.23	0.050000	0.004726	1.0050	0.18676
1.13330	0.28	0.483330	0.006750	1.0050	0.18274
1.16670	0.32	0.450000	0.006741	1.0050	0.18271
1.20000	0.31	0.116670	0.004096	1.0050	0.18674
1.23330	0.29	0.383330	0.008925	1.0050	0.18265

- 17 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.68057	0.27	0.283330	0.0091711	1.0049	0.23640
0.71390	0.25	0.216670	0.0056842	1.0050	0.23874
0.74723	0.30	0.316670	0.0097711	1.0049	0.23633
0.78057	0.37	0.083333	0.0048668	1.0050	0.23876
0.81390	0.33	0.183330	0.0049326	1.0050	0.23874
0.84723	0.24	0.016667	0.0053751	1.0049	0.23880
0.88057	0.36	0.416670	0.0086623	1.0050	0.23612
0.91390	0.34	0.150000	0.0046899	1.0050	0.23875
0.94723	0.26	0.250000	0.0053822	1.0049	0.23814
0.98057	0.35	0.350000	0.0550450	1.0058	0.23268
1.01390	0.23	0.050000	0.0050712	1.0050	0.23876
1.04720	0.28	0.483330	0.0078451	1.0050	0.23611
1.08060	0.32	0.450000	0.0134240	1.0049	0.23566
1.11390	0.31	0.116670	0.0045256	1.0050	0.23875
1.14720	0.29	0.383330	0.1052400	1.0012	0.22202

- 19 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.76667	0.0685	0.283330	0.0102970	1.00510	0.28224
0.80000	0.0485	0.216670	0.0083645	1.00520	0.28411
0.83333	0.0985	0.316670	0.0098199	1.00500	0.28215
0.86667	0.1685	0.083333	0.0062296	1.00500	0.28417
0.90000	0.1285	0.183330	0.0065700	1.00500	0.28416
0.93333	0.0385	0.016667	0.0078392	1.00530	0.28415
0.96667	0.1585	0.416670	0.0095676	1.00500	0.28212
1.00000	0.1385	0.150000	0.0061680	1.00500	0.28416
1.03330	0.0585	0.250000	0.0073390	1.00520	0.28362
1.06670	0.1485	0.350000	0.1021300	1.00370	0.27378
1.10000	0.0285	0.050000	0.0072740	1.00550	0.28409
1.13330	0.0785	0.483330	0.0969490	0.99861	0.27386
1.16670	0.1185	0.450000	0.1005600	0.99950	0.27719
1.20000	0.1085	0.116670	0.0059894	1.00500	0.28416
1.23330	0.0885	0.383330	0.1022300	0.98642	0.27990

- 21 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.016667	0.045	1.03330	0.025771	1.0051	0.32355
0.050000	0.025	0.96667	0.025242	1.0054	0.32351
0.083333	0.075	1.06670	0.020620	1.0050	0.32364
0.116670	0.145	0.83333	0.016745	1.0049	0.32366
0.150000	0.105	0.93333	0.016854	1.0050	0.32362
0.183330	0.015	0.76667	0.020204	1.0062	0.32355
0.216670	0.135	1.16670	0.013880	1.0049	0.32369
0.250000	0.115	0.90000	0.014309	1.0049	0.32389
0.283330	0.035	1.00000	0.017060	1.0053	0.32366
0.316670	0.125	1.10000	0.012866	1.0050	0.32361
0.350000	0.005	0.80000	0.016543	1.0086	0.32276
0.383330	0.055	1.23330	0.013725	1.0050	0.32383
0.416670	0.095	1.20000	0.012253	1.0049	0.32376
0.450000	0.085	0.86667	0.012091	1.0049	0.32371
0.483330	0.065	1.13330	0.012155	1.0050	0.32375

- 23 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.016667	0.045	1.03330	0.024345	1.0049	0.36249
0.050000	0.025	0.96667	0.023481	1.0053	0.36252
0.083333	0.075	1.06670	0.020052	1.0051	0.36256
0.116670	0.145	0.83333	0.015911	1.0049	0.36262
0.150000	0.105	0.93333	0.016236	1.0048	0.36270
0.183330	0.015	0.76667	0.019371	1.0051	0.36262
0.216670	0.135	1.16670	0.014825	1.0050	0.36244
0.250000	0.115	0.90000	0.014584	1.0050	0.36253
0.283330	0.035	1.00000	0.016078	1.0052	0.36261
0.316670	0.125	1.10000	0.013494	1.0051	0.36258
0.350000	0.005	0.80000	0.016674	1.0014	0.36369
0.383330	0.055	1.23330	0.014338	1.0051	0.36247
0.416670	0.095	1.20000	0.012657	1.0050	0.36257
0.450000	0.085	0.86667	0.012099	1.0050	0.36258
0.483330	0.065	1.13330	0.012794	1.0051	0.36257

- 25 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.016667	0.045	1.03330	0.024216	1.00500	0.39911
0.050000	0.025	0.96667	0.023878	1.00540	0.39922
0.083333	0.075	1.06670	0.018937	1.00480	0.39927
0.116670	0.145	0.83333	0.017015	1.00490	0.39934
0.150000	0.105	0.93333	0.017134	1.00490	0.39935
0.183330	0.015	0.76667	0.019236	1.00470	0.39927
0.216670	0.135	1.16670	0.015400	1.00500	0.39918
0.250000	0.115	0.90000	0.014852	1.00500	0.39927
0.283330	0.035	1.00000	0.016228	1.00510	0.39924
0.316670	0.125	1.10000	0.013870	1.00490	0.39939
0.350000	0.005	0.80000	0.018105	0.99708	0.40162
0.383330	0.055	1.23330	0.014478	1.00520	0.39931
0.416670	0.095	1.20000	0.013476	1.00500	0.39931
0.450000	0.085	0.86667	0.012721	1.00510	0.39916
0.483330	0.065	1.13330	0.013070	1.00510	0.39928

Ένα φαινόμενο που αρχίζει να παρατηρείται από τα αποτελέσματα του δεύτερου επιπέδου είναι ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνονται κατά μέσο όρο και οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό συμβαίνει επειδή για το ίδιο επίπεδο τύρβης, οι διακυμάνσεις του ανέμου γίνονται εντονότερες όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Αυτές οι διαφορές, οι οποίες απουσίαζαν στο πρώτο επίπεδο, αρχίζουν να παίρνουν μορφή καθώς τα διαστήματα των κερδών προσαρμόζονται στην κάθε ταχύτητα. Παρόλα αυτά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι κατά μέσο όρο, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζουν μείωση σε σχέση με αυτές του προηγούμενου επιπέδου για την ίδια ταχύτητα ανέμου. Αυτός είναι ένας σημαντικός δείκτης για την ορθή πορεία της μεθόδου, καθώς η μείωση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής αποτελεί και τον τελικό στόχο της παρούσας διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Εφαρμόζοντας την RSM, εξάγουμε την επόμενη και πιο ακριβή προσέγγιση για το βέλτιστο του συστήματος για κάθε ταχύτητα ανέμου. Για όλα τα αποτελέσματα πληρούνται τα κριτήρια μέσης ταχύτητας περιστροφής, συνεπώς καμία τιμή δεν απορρίπτεται από τους υπολογισμούς. Υπολογίζεται ξανά και η μέση τιμή του pitch. Τα αποτελέσματα είναι:

Wind speed (m/s)	k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	$F_{obj} =$ Local min (rad/sec)	Mean pitch (rad)
13	1.15890	0.375000	0.00000	0.00066604	0.116162
15	1.16140	0.375000	0.00000	-0.0017993	0.184921
17	1.10380	0.375000	0.00000	-0.1166900	0.236317
19	0.98173	0.023500	0.50000	-0.2582100	0.281591
21	0.50000	0.041892	1.25000	-0.0077146	0.323613
23	0.38839	0.140690	0.75601	0.01330800	0.362637
25	0.50000	0.090691	1.25000	0.01073600	0.399421

Βλέπουμε ότι σταδιακά οι συντεταγμένες του ελαχίστου αρχίζουν να αποκτούν υπόσταση και το φαινόμενο του να εντοπίζονται στο όριο αρχίζει να εξαλείφεται. Επίσης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις μειώθηκαν, εξακολουθούν όμως να έχουν αρνητικές τιμές σε πολλές περιπτώσεις. Στο τρίτο και τελευταίο επίπεδο αυτά τα προβλήματα θα λυθούν και θα δοθεί το τελικό αποτέλεσμα.

3.4.3 Επίπεδο 3

Τα νέα διαστήματα ορισμού για την εφαρμογή του επόμενου επιπέδου βρίσκονται από τα αποτελέσματα του δευτέρου επιπέδου, μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω. Τα διαστήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- 13 m/s

$$k_p = [1.0339 , 1.2839]$$

$$k_i = [0.335 , 0.415]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.25]$$

- 15 m/s

$$k_p = [1.0364 , 1.2864]$$

$$k_i = [0.335 , 0.415]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.25]$$

- 17 m/s

$$k_p = [0.9788 , 1.2288]$$

$$k_i = [0.335 , 0.415]$$

$$k_{iipc} = [0 , 0.25]$$

- 19 m/s

$$k_p = [0.85673 , 1.10675]$$

$$k_i = [0 , 0.08]$$

$$k_{iipc} = [0.375 , 0.625]$$

- 21 m/s

$$k_p = [0.375 , 0.625]$$

$$k_i = [0.0019 , 0.0819]$$

$$k_{iipc} = [1.125 , 1.375]$$

- 23 m/s

$$k_p = [0.2634 , 0.5134]$$

$$k_i = [0.10069 , 0.18069]$$

$$k_{iipc} = [0.631 , 0.881]$$

- 25 m/s

$$k_p = [0.375 , 0.625]$$

$$k_i = [0.0507 , 0.1307]$$

$$k_{iipc} = [1.125 , 1.375]$$

Τα αποτελέσματα του τελικού επιπέδου βελτιστοποίησης φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Υπενθυμίζουμε ότι για την πραγματική τιμή του k_{iipc} πρέπει να γίνει πολλαπλασιασμός της τιμής των πινάκων με το συντελεστή 10^{-8} :

- 13 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
1.0422	0.35900	0.141670	0.0041635	1.0050	0.12006
1.0589	0.34833	0.108330	0.0041938	1.0050	0.12006
1.0756	0.37500	0.158330	0.0040241	1.0050	0.12006
1.0922	0.41233	0.041667	0.0038259	1.0050	0.12009
1.1089	0.39100	0.091667	0.0038941	1.0050	0.12007
1.1256	0.34300	0.008333	0.0041116	1.0049	0.12022
1.1422	0.40700	0.208330	0.0037804	1.0050	0.12006
1.1589	0.39633	0.075000	0.0037971	1.0050	0.12008
1.1756	0.35367	0.125000	0.0039818	1.0050	0.12007
1.1922	0.40167	0.175000	0.0037320	1.0050	0.12006
1.2089	0.33767	0.025000	0.0040244	1.0050	0.12012
1.2256	0.36433	0.241670	0.0038801	1.0050	0.12004
1.2422	0.38567	0.225000	0.0037444	1.0050	0.12006
1.2589	0.38033	0.058333	0.0037379	1.0050	0.12009
1.2756	0.36967	0.191670	0.0037714	1.0050	0.12006

- 15 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
1.0447	0.35900	0.141670	0.0040997	1.0050	0.18674
1.0614	0.34833	0.108330	0.0041172	1.0050	0.18674
1.0781	0.37500	0.158330	0.0039921	1.0050	0.18674
1.0947	0.41233	0.041667	0.0038555	1.0050	0.18676
1.1114	0.39100	0.091667	0.0038965	1.0050	0.18675
1.1281	0.34300	0.008333	0.0040425	1.0049	0.18685
1.1447	0.40700	0.208330	0.0038138	1.0050	0.18673
1.1614	0.39633	0.075000	0.0038215	1.0050	0.18675
1.1781	0.35367	0.125000	0.0039418	1.0050	0.18674
1.1947	0.40167	0.175000	0.0037737	1.0050	0.18674
1.2114	0.33767	0.025000	0.0039654	1.0050	0.18678
1.2281	0.36433	0.241670	0.0038703	1.0050	0.18670
1.2447	0.38567	0.225000	0.0037781	1.0050	0.18673
1.2614	0.38033	0.058333	0.0037701	1.0050	0.18676
1.2781	0.36967	0.191670	0.0037905	1.0050	0.18673

- 17 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.98713	0.35900	0.141670	0.0045130	1.005	0.23875
1.00380	0.34833	0.108330	0.0045236	1.005	0.23875
1.02050	0.37500	0.158330	0.0044286	1.005	0.23875
1.03710	0.41233	0.041667	0.0043405	1.005	0.23877
1.05380	0.39100	0.091667	0.0043629	1.005	0.23875
1.07050	0.34300	0.008333	0.0044590	1.005	0.23885
1.08710	0.40700	0.208330	0.0043164	1.005	0.23874
1.10380	0.39633	0.075000	0.0043198	1.005	0.23876
1.12050	0.35367	0.125000	0.0043917	1.005	0.23875
1.13710	0.40167	0.175000	0.0043029	1.005	0.23874
1.15380	0.33767	0.025000	0.0044096	1.005	0.23878
1.17050	0.36433	0.241670	0.0043966	1.005	0.23867
1.18710	0.38567	0.225000	0.0043261	1.005	0.23874
1.20380	0.38033	0.058333	0.0043214	1.005	0.23876
1.22050	0.36967	0.191670	0.0043366	1.005	0.23874

- 19 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.86506	0.024000	0.51667	0.0098028	1.0055	0.28201
0.88173	0.013333	0.48333	0.0101720	1.0059	0.28195
0.89840	0.040000	0.53333	0.0094831	1.0052	0.28198
0.91506	0.077333	0.41667	0.0093718	1.0051	0.28210
0.93173	0.056000	0.46667	0.0094726	1.0051	0.28228
0.94840	0.008000	0.38333	0.0107910	1.0062	0.28190
0.96506	0.072000	0.58333	0.0094767	1.0051	0.28209
0.98173	0.061333	0.45000	0.0095085	1.0051	0.28213
0.99840	0.018667	0.50000	0.0097027	1.0056	0.28196
1.01510	0.066667	0.55000	0.0091797	1.0052	0.28213
1.03170	0.002667	0.40000	0.0304710	1.0067	0.28085
1.04840	0.029333	0.61667	0.0094043	1.0054	0.28201
1.06510	0.050667	0.60000	0.0106550	1.0052	0.28193
1.08170	0.045333	0.43333	0.0504590	1.0053	0.27980
1.09840	0.034667	0.56667	0.0126030	1.0053	0.28197

- 21 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.38333	0.025900	1.2667	0.015106	1.0055	0.32363
0.40000	0.015233	1.2333	0.015218	1.0061	0.32358
0.41667	0.041900	1.2833	0.014019	1.0052	0.32377
0.43333	0.079233	1.1667	0.012206	1.0049	0.32372
0.45000	0.057900	1.2167	0.012796	1.0050	0.32375
0.46667	0.009900	1.1333	0.014110	1.0068	0.32328
0.48333	0.073900	1.3333	0.012379	1.0051	0.32374
0.50000	0.063233	1.2000	0.011992	1.0050	0.32375
0.51667	0.020567	1.2500	0.013469	1.0057	0.32375
0.53333	0.068567	1.3000	0.011917	1.0050	0.32371
0.55000	0.004567	1.1500	0.012992	1.0087	0.32273
0.56667	0.031233	1.3667	0.012714	1.0054	0.32360
0.58333	0.052567	1.3500	0.012079	1.0052	0.32367
0.60000	0.047233	1.1833	0.011435	1.0051	0.32374
0.61667	0.036567	1.3167	0.011889	1.0053	0.32362

- 23 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.27173	0.12469	0.77267	0.014554	1.0050	0.36261
0.28840	0.11402	0.73933	0.014085	1.0048	0.36271
0.30507	0.14069	0.78933	0.013671	1.0050	0.36266
0.32173	0.17802	0.67267	0.012597	1.0050	0.36260
0.33840	0.15669	0.72267	0.012471	1.0049	0.36264
0.35507	0.10869	0.63933	0.013293	1.0050	0.36275
0.37173	0.17269	0.83933	0.011726	1.0049	0.36270
0.38840	0.16202	0.70600	0.012065	1.0049	0.36257
0.40507	0.11936	0.75600	0.012266	1.0049	0.36276
0.42173	0.16736	0.80600	0.011693	1.0049	0.36275
0.43840	0.10336	0.65600	0.012405	1.0050	0.36262
0.45507	0.13002	0.87267	0.011436	1.0049	0.36263
0.47173	0.15136	0.85600	0.010953	1.0049	0.36269
0.48840	0.14602	0.68933	0.011317	1.0050	0.36271
0.50507	0.13536	0.82267	0.011352	1.0050	0.36264

- 25 m/s

k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	st. dev. Ω (rad/sec)	$\bar{\Omega}$ (rad/sec)	pitch (rad)
0.38333	0.074700	1.2667	0.012297	1.0051	0.39935
0.40000	0.064033	1.2333	0.012438	1.0050	0.39942
0.41667	0.090700	1.2833	0.012208	1.0051	0.39948
0.43333	0.128030	1.1667	0.011923	1.0051	0.39931
0.45000	0.106700	1.2167	0.011979	1.0052	0.39942
0.46667	0.058700	1.1333	0.012404	1.0049	0.39952
0.48333	0.122700	1.3333	0.011911	1.0051	0.39939
0.50000	0.112030	1.2000	0.011956	1.0051	0.39936
0.51667	0.069367	1.2500	0.012218	1.0050	0.39931
0.53333	0.117370	1.3000	0.012015	1.0051	0.39935
0.55000	0.053367	1.1500	0.012221	1.0048	0.39953
0.56667	0.080033	1.3667	0.011917	1.0051	0.39943
0.58333	0.101370	1.3500	0.011831	1.0051	0.39934
0.60000	0.096033	1.1833	0.011737	1.0051	0.39937
0.61667	0.085367	1.3167	0.011782	1.0051	0.39931

Παρατηρείται ακόμα μια φορά η αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου. Ομοίως, η αντικειμενική συνάρτηση για την ίδια ταχύτητα ανέμου μειώνεται καθώς περνάμε από το δεύτερο επίπεδο στο τρίτο.

Η τελική εφαρμογή της RSM, δίνει και την τελική προσέγγιση για το βέλτιστο του συστήματος για κάθε ταχύτητα ανέμου. Αυτό θεωρείται και το τελικό βέλτιστο για το σύστημα και θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση. Για όλα τα αποτελέσματα πληρούνται τα κριτήρια μέσης ταχύτητας περιστροφής, συνεπώς καμία τιμή δεν απορρίπτεται από τους υπολογισμούς. Υπολογίζεται ξανά και η μέση τιμή του pitch. Αυτό αποτελεί εντέλει αντικειμενικό κριτήριο, καθώς οι αποκλίσεις του pitch για το τρίτο επίπεδο είναι πολύ μικρές ανάμεσα στα δείγματα. Μετατρέπονται τέλος οι τιμές του pitch από ακτίνια σε μοίρες με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων. Η τιμή των γωνιών σε μοίρες θα χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω επεξεργασία. Συνεπώς για τις επτά ταχύτητες ανέμου, έχουμε τα εξής τελικά αποτελέσματα:

Wind speed (m/s)	k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	$F_{obj} =$ Local min (rad/sec)	Mean pitch (rad)	Mean pitch (deg)
13	1.28390	0.415000	0.25000	0.00318080	0.120080	6.88
15	1.28640	0.415000	0.25000	0.00329550	0.186749	10.70
17	1.22880	0.404990	0.25000	0.00324970	0.238753	13.68
19	0.85673	0.080000	0.37500	0.18238000	0.281806	16.15
21	0.62500	0.081900	1.12500	0.00665080	0.323603	18.54
23	0.32346	0.180690	0.63100	0.01470500	0.362669	20.78
25	0.57493	0.070701	1.32612	0.00484216	0.399393	22.88

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούνται μερικές συστηματικές συμπεριφορές των μεταβλητών και των αποτελεσμάτων καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα ανέμου. Οι συμπεριφορές αυτές διέπονται από στατιστικές ατασθαλίες, όμως σε γενικές γραμμές έχουν τυπική συμπεριφορά. Έτσι λοιπόν η εξής σχέση παρατηρείται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου:

$$\text{wind speed} \uparrow \Leftrightarrow k_p \downarrow \Leftrightarrow k_i \downarrow \Leftrightarrow k_{iipc} \uparrow \Leftrightarrow F_{obj} \uparrow \Leftrightarrow \text{pitch} \uparrow$$

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης και του pitch έχει αναλυθεί και στα προηγούμενα επίπεδα και εξακολουθεί να είναι της ίδιας λογικής. Εξάλλου, μπορεί να προβλεφθεί η τάση που αυτά τα δύο στοιχεία ακολουθούν, δεδομένου ότι έχουν άμεση φυσική ερμηνεία. Από την άλλη, είναι δύσκολο κανείς να προβλέψει τον τρόπο που θα κινηθούν τα κέρδη δεδομένης της αλληλεξάρτησής τους κατά τη φάση της βελτιστοποίησης και της ανταγωνιστικής τους συμπεριφοράς. Αυτό που μπορούσαμε να υποθέσουμε είναι ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου τα κέρδη k_p και k_i θα έφθιναν, καθότι αυξάνεται η ευαισθησία του ελέγχου. Όταν όμως εισάγεται ο IPC, η συμπεριφορά αυτή τροποποιείται, ενώ και η ίδια η συμπεριφορά του IPC είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Για τα κέρδη τελικά εξάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα εκ του αποτελέσματος.

Όπως προαναφέρθηκε όμως, η συμπεριφορά των κερδών δεν είναι προδιαγεγραμμένη. Η RSM είναι στατιστική μέθοδος, οπότε είναι αναμενόμενο να υπάρχουν διαφοροποιήσεις από τη συνολική πορεία των στοιχείων στις ενδιάμεσες ταχύτητες ανέμου. Μερικά τέτοια φαινόμενα παρατηρούνται για το k_i στα 23 m/s, το k_{iipc} στα 21 m/s, για την αντικειμενική συνάρτηση στα 19 m/s, και αλλού. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα εκμεταλλευτούμε τα φαινόμενα αυτά για την

ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων και την τελική εξαγωγή ενός νέου νόμου ελέγχου που θα ελαχιστοποιεί τις αποκλίσεις από την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και θα προσαρμόζεται σε όλες τις ταχύτητες ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

4.1 Baseline Control Technique

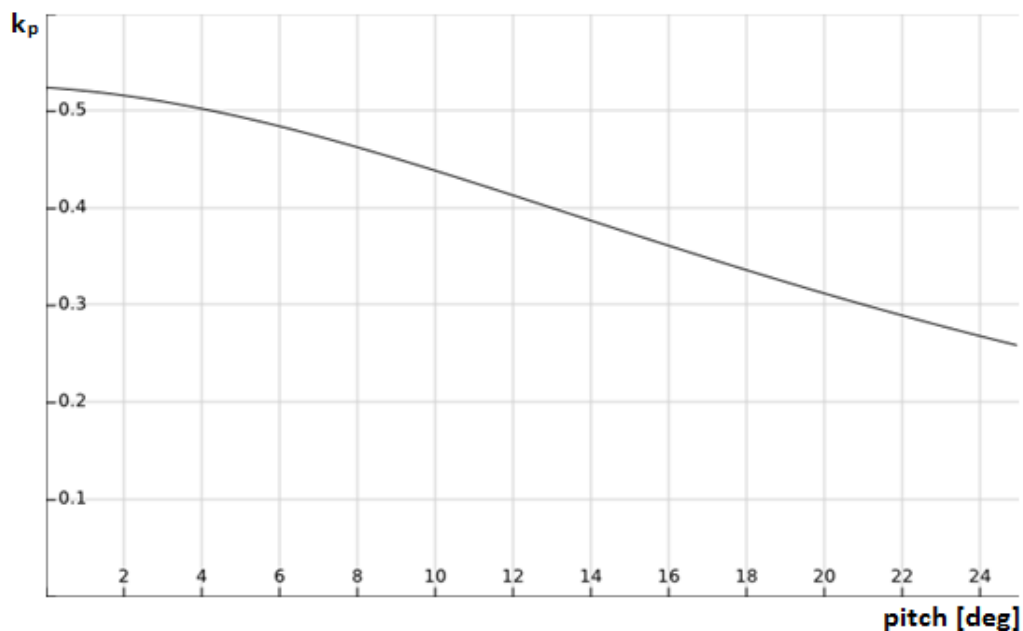
Προτού γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προηγούμενου Κεφαλαίου, είναι απαραίτητο να εισάγουμε τη λογική ελέγχου της ανεμογεννήτριας DTU 10MW. Τη λογική αυτή θα την ονομάσουμε Baseline control technique.

Η μέθοδος που προτείνεται από το DTU για τον έλεγχο της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας είναι μέσω προσαρμογής των κερδών στην ταχύτητα ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της γωνίας του pitch. Το κέρδος μεταβάλλεται με βάση την γωνία ώστε σε μικρές ταχύτητες περιστροφής οι αλλαγές να είναι πιο ραγδαίες, καθώς είναι πιο δύσκολο να δημιουργηθούν αστάθειες, ενώ όταν η ταχύτητα αυξάνεται γίνεται το αντίθετο. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την εξάρτηση των κερδών από την γωνία pitch (θ σε μοίρες) είναι:

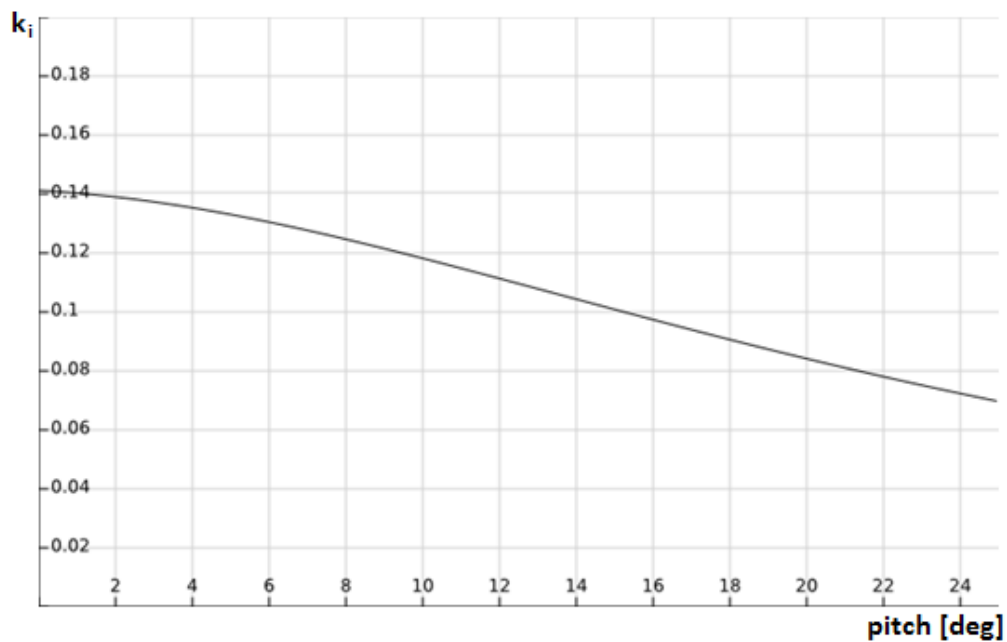
$$k_p^{base} = \frac{0.5245}{1 + \frac{\theta}{198.32888} + \frac{\theta^2}{693.22213}} \quad (4.1)$$

$$k_i^{base} = \frac{0.1412}{1 + \frac{\theta}{198.32888} + \frac{\theta^2}{693.22213}} \quad (4.2)$$

Οι γραφικές παραστάσεις φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 4.1. Gain scheduling scheme για το κέρδος k_p .

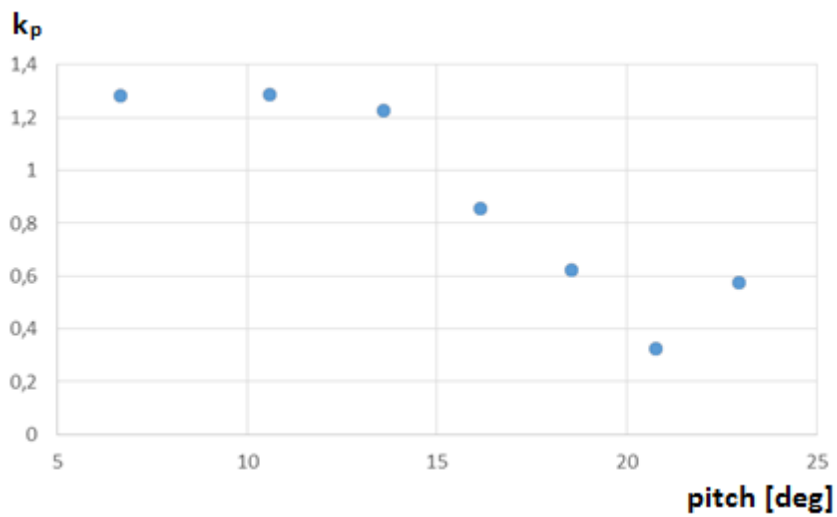


Σχήμα 4.2. Gain scheduling scheme για το κέρδος k_i .

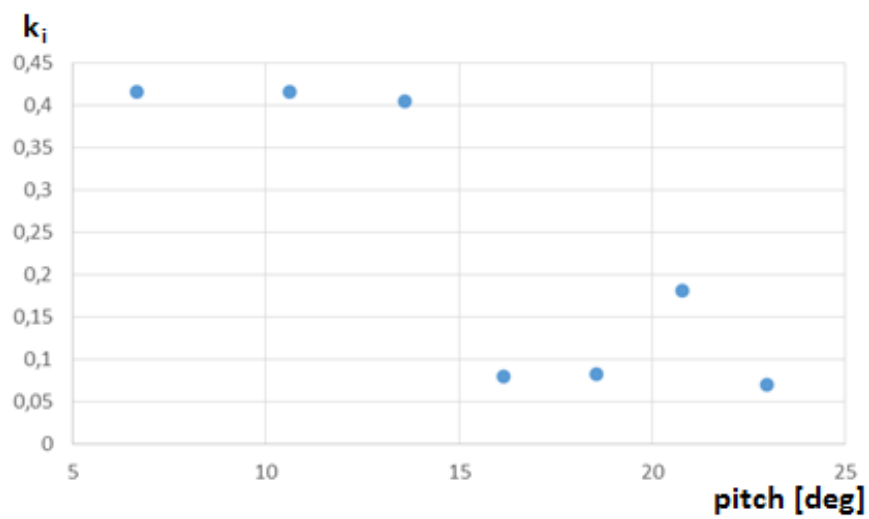
4.2 SMCT Control Technique

Σε παραλλαγή της παραπάνω λογικής, η μέθοδος βελτιστοποίησης SMCT έχει ως τελικό στόχο την εφαρμογή μιας παρόμοιας καμπύλης ελέγχου. Δεδομένου ότι η πρότυπη μέθοδος του DTU δεν έχει λάβει υπόψιν την ύπαρξη ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων, δεν υπάρχει τέτοια καμπύλη προσαρμογής για τα κέρδη του IPC, συνεπώς θα τη δημιουργήσουμε από την αρχή. Το ερώτημα που γεννιέται είναι με ποιο τρόπο θα κατασκευαστούν αυτές οι καμπύλες.

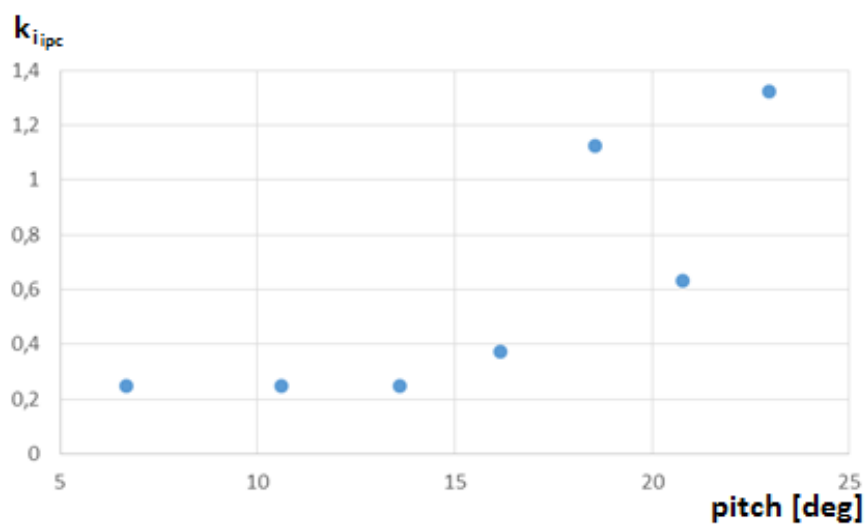
Στα Σχήματα 4.3. – 4.5. απεικονίζονται τα βέλτιστα κέρδη όπως προέκυψαν από την διαδικασία σε συνάρτηση με τη γωνία βήματος σε μοίρες. Υπενθυμίζεται ότι για την εύρεση της πραγματικής τιμής του k_{iipc} πρέπει να γίνει πολλαπλασιασμός με 10^{-8} :



Σχήμα 4.3. Βέλτιστα k_p συναρτήσει της γωνίας βήματος.



Σχήμα 4.4. Βέλτιστα k_i συναρτήσει της γωνίας βήματος.



Σχήμα 4.5. Βέλτιστα k_{iipc} συναρτήσει της γωνίας βήματος.

Είναι λογικό ότι οι βέλτιστες αυτές συντεταγμένες δεν μπορούν να αποτελέσουν ευθέως τα σημεία που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο. Ακόμα και να αγνοήσουμε το φαινόμενο του στατιστικού λάθους της διαδικασίας, γεννώνται ακόμα πιο σημαντικά ερωτήματα. Τι συμβαίνει στις ενδιάμεσες ταχύτητες ανέμου; Τι συμβαίνει για πιο ακριβείς τιμές γωνιών; Είναι προφανές ότι δεν μπορούμε να ενώσουμε τις κουκίδες για να εξάγουμε την μορφή του ελέγχου. Αυτό που πρέπει να γίνει είναι μια παλινδρόμηση των σημείων για την εύρεση μιας αναλυτικής σχέσης των κερδών συναρτήσει της γωνίας.

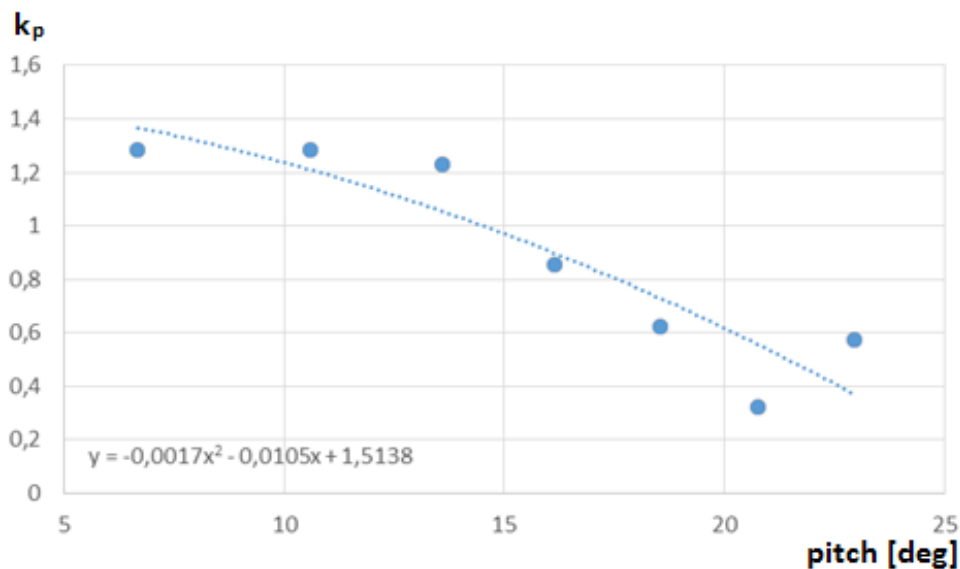
Η τάξη αυτής της παλινδρόμησης θα κριθεί από την μορφή του baseline ελέγχου. Από τα Σχήματα 4.1 και 4.2 παρατηρούμε ότι οι baseline εξισώσεις είναι γνησίως φθίνουσες και παρουσιάζουν αλλαγή κυρτότητας. Συνεπώς μια καλή επιλογή φαίνεται η παλινδρόμηση τρίτης τάξης. Η χρήση όμως τριτοβάθμιας εξίσωσης δημιούργησε τοπικά μέγιστα, γεγονός που αντιβαίνει με την επιθυμητή μονοτονία των συναρτήσεων, που είναι και το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό. Συνεπώς, τελικά επιλέχθηκε εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οι εξισώσεις που προέκυψαν από την παλινδρόμηση δευτέρου βαθμού για θ σε μοίρες είναι:

$$k_p = -0.0017\theta^2 - 0.0105\theta + 1.5138 \quad (4.3)$$

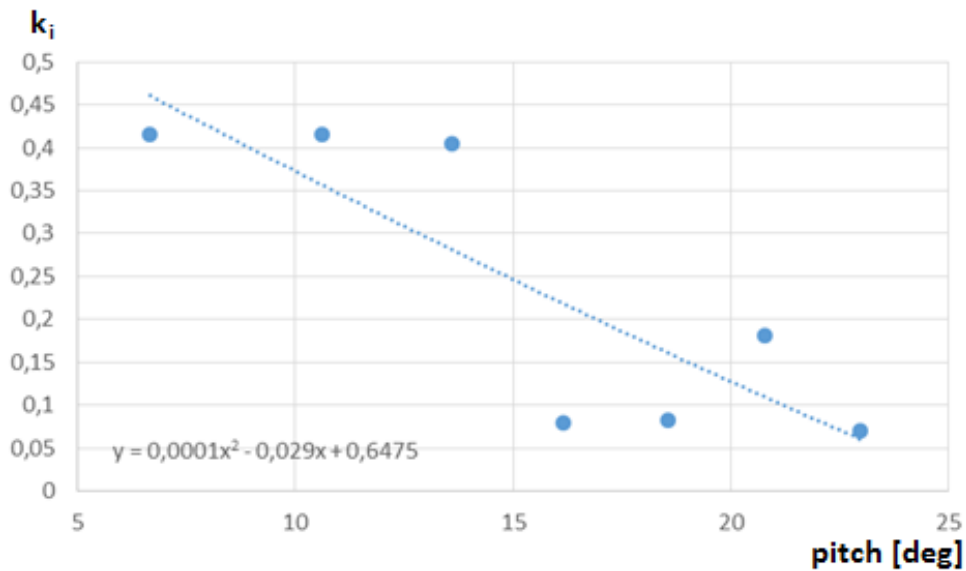
$$k_i = 0.0001\theta^2 - 0.029\theta + 0.6475 \quad (4.4)$$

$$k_{i_{ipc}} = (0.0052\theta^2 - 0.0919\theta + 0.6205) \cdot 10^{-8} \quad (4.5)$$

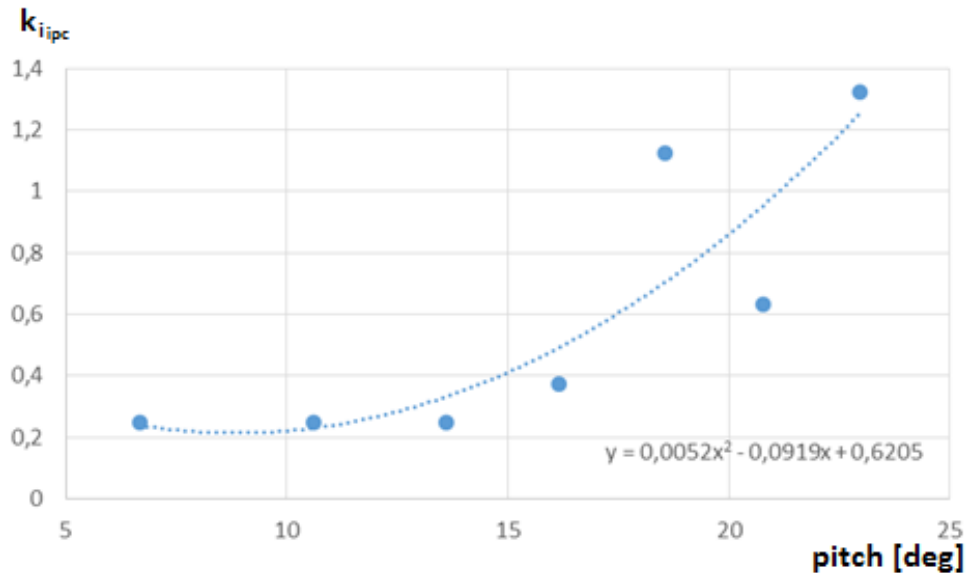
Γραφικά απεικονίζονται στα Σχήματα 4.6 – 4.8.



Σχήμα 4.6. Τελική μορφή gain scheduling για το k_p .



Σχήμα 4.7. Τελική μορφή gain scheduling για το k_i .



Σχήμα 4.8. Τελική μορφή gain scheduling για το k_{iipc} .

4.3 Σύγκριση των μεθόδων ελέγχου

Επειδή η κατασκευή μιας μεθόδου προσαρμοστικού ελέγχου και η ενσωμάτωσή της στο υπάρχον σύστημα δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, η σύγκριση των δύο μεθόδων έγινε με επιλογή συγκεκριμένων σημείων που αποτελούν την αντιπροσωπευτική τιμή για την κάθε ταχύτητα ανέμου. Χρησιμοποιώντας το μέσο pitch που υπολογίστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, βρίσκουμε την αντίστοιχη τιμή κέρδους για την περίπτωση του Baseline αλλά και για την SMCT μέσω αντικατάστασης στους τύπους. Για το IPC του Baseline, όπου δεν γνωρίζουμε προσαρμοστική συμπεριφορά, θα χρησιμοποιηθεί η σταθερή τιμή $k_{iipc}=0,2 \cdot 10^{-8}$. Αυτή η επιλογή οδηγεί σε υπο-απόδοση του συστήματος για την περίπτωση του Baseline, αλλά είναι μια αναγκαία

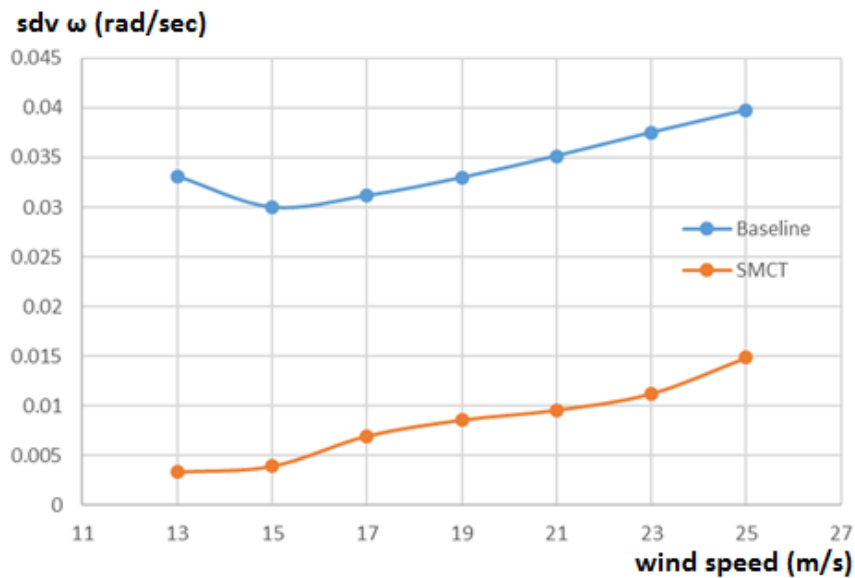
επιλογή προκειμένου να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης. Η επιλογή του κέρδους αυτού αποτελεί μια αποδεκτή μέση τιμή που θα μπορούσε να επιλεγεί για το σύστημα ως μια γρήγορη λύση για την δοκιμή του IPC, και είναι μια σχετικά συντηρητική επιλογή. Συνεπώς οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση των μεθόδων, είναι:

Wind speed (m/s)	Mean pitch (deg)	BASELINE			SMCT		
		k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)	k_p (sec)	k_i (-)	k_{iipc} (-)
13	6.88	0.475534	0.128018	$0.2 \cdot 10^{-8}$	1.361090	0.452713	$0.234367 \cdot 10^{-8}$
15	10.70	0.430233	0.115822	$0.2 \cdot 10^{-8}$	1.206820	0.348649	$0.232518 \cdot 10^{-8}$
17	13.68	0.391729	0.105457	$0.2 \cdot 10^{-8}$	1.052020	0.269494	$0.336448 \cdot 10^{-8}$
19	16.15	0.359819	0.096866	$0.2 \cdot 10^{-8}$	0.900827	0.205232	$0.492592 \cdot 10^{-8}$
21	18.54	0.330014	0.088843	$0.2 \cdot 10^{-8}$	0.734786	0.144213	$0.704078 \cdot 10^{-8}$
23	20.78	0.303587	0.081728	$0.2 \cdot 10^{-8}$	0.561536	0.088061	$0.956222 \cdot 10^{-8}$
25	22.88	0.280403	0.075487	$0.2 \cdot 10^{-8}$	0.383620	0.036329	$1.240000 \cdot 10^{-8}$

Με βάση τον παραπάνω πίνακα εφαρμόστηκε μία προσομοίωση για κάθε ταχύτητα ανέμου για τα δύο σενάρια, συνολικά 14 προσομοιώσεις, με τα ίδια στοιχεία που δίνονται στο Κεφάλαιο 3. Μοναδική διαφορά αποτελεί η ένταση της τύρβης, η οποία είναι 16% αντί για 5% που ήταν στην διαδικασία της βελτιστοποίησης. Όπως προαναφέρθηκε, η χαμηλή τύρβη είναι απαραίτητη κατά τη φάση του σχεδιασμού προκειμένου να αποφεύγονται μεγάλες ριπές ανέμου που οδηγούν σε αποτελέσματα τα οποία είναι μη αντιπροσωπευτικά της αντίστοιχης ταχύτητας. Κατά τη φάση της επαλήθευσης όμως, πρέπει να υπάρχει σχετικά υψηλή τύρβη. Αυτό συμβαίνει διότι η ικανότητα του ελέγχου να ανταποκρίνεται επιτυχώς στο σκοπό του, γίνεται σημαντικότερη όταν ο άνεμος είναι πιο τυρβώδης, καθώς τότε είναι και πιο κρίσιμο να διατηρηθεί η ευστάθεια του συστήματος.

Μετά τη φάση της προσομοίωσης, έγινε υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής για κάθε ταχύτητα ανέμου για τα δύο σενάρια. Οι μονάδες είναι σε rad/sec. Υπολογίζεται επίσης σαν μέτρο σύγκρισης η ποσοστιαία μείωση για την SMCT σε σχέση με την Baseline. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα και παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 4.9.

Wind speed (m/s)	St. dev. Ω (rad/sec)		Variation
	Baseline	SMCT	
13	0.033099	0.0033531	-89.87 %
15	0.029993	0.0039242	-86.92 %
17	0.031141	0.0069662	-77.63 %
19	0.032960	0.0085792	-73.97 %
21	0.035146	0.0095758	-72.75 %
23	0.037496	0.0112350	-70.04 %
25	0.039738	0.0148510	-62.63 %



Σχήμα 4.9. Τυπική απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής για τις δύο μεθόδους.

Όπως είναι εμφανές, η βελτίωση της επίδοσης της ανεμογεννήτριας είναι πολύ υψηλή. Η μείωση της τυπικής απόκλισης, γεγονός που σχετίζεται άμεσα με την ευστάθεια και την καλή λειτουργία, είναι της τάξης του 60% μέχρι και 90%. Αυτό σημαίνει ότι η μεθοδολογία της SMCT μπορεί να κριθεί επιτυχημένη ως προς τον σκοπό για τον οποίο επιλέχθηκε, δηλαδή για τη μείωση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απόκρισης των ροπών και της μηχανικής ισχύος, προκειμένου να μελετηθεί η επίπτωση του νέου ελέγχου στην κόπωση του συστήματος και στην παραγόμενη ενέργεια. Οι δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό είναι:

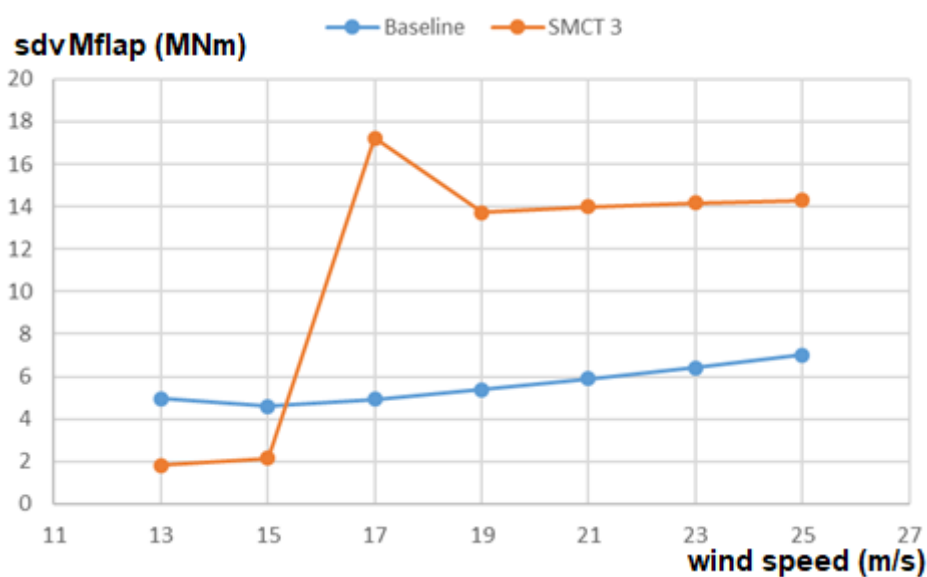
- Τυπική απόκλιση της ροπής M_{flap} . Ο σκοπός που επιλέγεται είναι για να παρατηρηθεί η επιρροή του νέου συστήματος ελέγχου στις ροπές που ασκούνται στη βάση των πτερυγίων. Η μείωση των αποκλίσεων των ροπών από τη μέση τιμή είναι ο πρωταρχικός λόγος για τον οποίο υπάρχουν οι IPC/IFC. Για το λόγο αυτό, η τυπική απόκλιση της M_{flap} θα μπορούσε να αποτελεί εναλλακτική αντικειμενική συνάρτηση για την βελτιστοποίηση του συστήματος. Επειδή όμως η υπάρχουσα μέθοδος βελτιστοποίησης δεν έλαβε καθόλου υπόψιν της τη συγκεκριμένη δυνατότητα, οφείλουμε κατ' ελάχιστο να ελέγξουμε την επιρροή που έχει η νέα τεχνική ελέγχου στα πτερύγια. Σημειώνεται ότι η μέθοδος των ισοδύναμων φορτίων αποτελεί καλύτερη επιλογή για την μέτρηση της κόπωσης, όμως επιλέχθηκε η τυπική απόκλιση της ροπής, καθώς είναι ταχύτερη η εξαγωγή της, ενώ δεν αλλοιώνονται σημαντικά τα συμπεράσματα.
- Μέση τιμή της μηχανικής ισχύος P_{mech} . Πρόκειται για την ισχύ που το σύστημα χρησιμοποιεί για την περιστροφή της γεννήτριας. Η μηχανική ισχύς διαφέρει από αυτή που εισάγει ο δρομέας, διότι μειώνεται λόγω αδράνειας, ελαστικότητας και αποσβέσεων. Επίσης, δεν έχει σχέση με τη ροπή που δύναται να παράγει ο άνεμος, η οποία είναι πάντα πολύ μεγαλύτερη για τις συγκεκριμένες ταχύτητες ανέμου, και η οποία απορρίπτεται μέσω του βήματος πτερυγίου για την αποφυγή καταστροφής του συστήματος. Εντέλει, η ισχύς

P_{mech} αποτελεί τη χρήσιμη ισχύ, και είναι άμεσος δείκτης της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος.

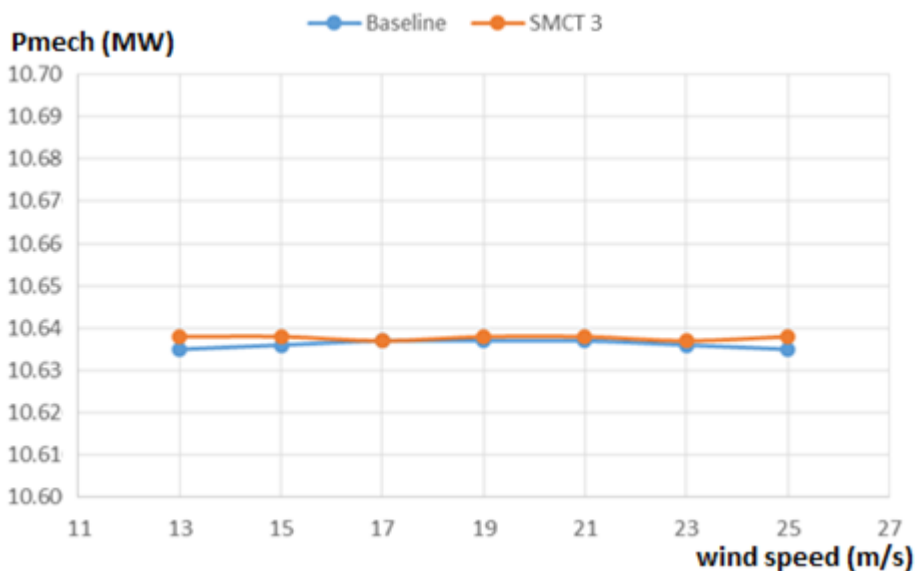
Wind speed (m/s)	M_{flap} (MNm)		Variation
	Baseline	SMCT	
13	4.9652	1.81700	-63.41 %
15	4.6079	2.14310	-53.49 %
17	4.9392	17.2140	+248.52 %
19	5.3820	13.7070	+154.68 %
21	5.8842	13.9810	+137.60 %
23	6.4127	14.1710	+120.98 %
25	7.0131	14.3040	+103.96 %

Wind speed (m/s)	P_{mech} (MW)		Variation
	Baseline	SMCT	
13	10.635	10.638	~ 0 %
15	10.636	10.638	~ 0 %
17	10.637	10.637	~ 0 %
19	10.637	10.638	~ 0 %
21	10.637	10.638	~ 0 %
23	10.636	10.637	~ 0 %
25	10.635	10.638	~ 0 %

Οι παραπάνω πίνακες φαίνονται γραφικά στα Σχήματα 4.10 και 4.11.



Σχήμα 4.10. Τυπική απόκλιση της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου για τις δύο μεθόδους.



Σχήμα 4.11. Μέση τιμή μηχανικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου για τις δύο μεθόδους.

Αυτό που παρατηρούμε στο Σχήμα 4.10, είναι ότι η επιρροή της SMCT δεν προκαθορίζει βελτίωση ή χειροτέρευση της τυπικής απόκλισης των ροπών του πτερυγίου. Αυτό που φαίνεται είναι ότι για τις ταχύτητες 13 m/s και 15 m/s η SMCT υπερτερεί της Baseline, συνεπώς βελτιώνει τις αποκλίσεις των ροπών, ενώ για τις υπόλοιπες ταχύτητες συμβαίνει το αντίθετο. Αυτό μπορεί να συσχετιστεί με την καμπύλη του k_{tipc} του Σχήματος 4.8. Καθώς το κέρδος του IPC αυξάνεται, οι ανεξάρτητες κινήσεις των πτερυγίων γίνονται ταχύτερες, συνεπώς δικαιολογείται η αύξηση των ροπών που φαίνονται στο Σχήμα 4.10. Το φαινόμενο αυτό όμως είναι στατιστικό, και η παρούσα ανάλυση δεν είναι αρκετή προκειμένου να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που μπορούμε να υποθέσουμε με τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας είναι ότι η μείωση ή αύξηση της τυπικής απόκλισης των ροπών είναι ένα τυχαίο φαινόμενο. Αυτό όμως που μπορούμε να συμπεράνουμε σίγουρα, είναι ότι δεν υπάρχει εγγύηση της νέας τεχνικής ελέγχου μέσω της SMCT 3 μεταβλητών όσον αφορά τη συμπεριφορά των ροπών στα πτερύγια. Συνεπώς, οι δύο διαφορετικοί στόχοι βελτιστοποίησης, συγκεκριμένα η μείωση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής ή η μείωση της τυπικής απόκλισης των ροπών, δεν δρουν συνεργατικά, για την ακρίβεια θα μπορούσαμε να πούμε ότι πιθανότατα δρουν και εντελώς ανταγωνιστικά. Συμπερασματικά, όσον αφορά τις ροπές, δεν υπάρχει καμία εγγύηση σχετικά με την συμπεριφορά τους όταν η αντικειμενική συνάρτηση επικεντρώνεται στην ταχύτητα περιστροφής.

Ως προς την παραγόμενη ισχύ, βλέπουμε ότι οι τιμές είναι πρακτικά ίδιες, στα όρια του στατιστικού σφάλματος. Αυτό σημαίνει ότι η νέα μέθοδος ελέγχου δεν θυσιάζει παραγόμενη ισχύ προκειμένου να επιτύχει το σκοπό της. Σίγουρα, η νέα επιλογή κερδών μπορεί να είναι πιο ενεργοβόρα από την προηγούμενη, π.χ. επειδή απαιτεί ταχύτερους μηχανισμούς κίνησης των πτερυγίων, αυτό όμως δεν έχουμε τρόπο να το γνωρίζουμε από την παρούσα ανάλυση. Εκείνο που έχει σημασία είναι το γεγονός ότι η νέα μέθοδος ελέγχου επιτυγχάνει την ίδια επίδοση ισχύος για την ανεμογεννήτρια.

Μια τελική σύγκριση της νέας μεθόδου ελέγχου γίνεται μεταξύ της βελτιστοποίησης τριών μεταβλητών της παρούσας εργασίας και της βελτιστοποίησης δύο μεταβλητών της εργασίας [1]. Αυτό έχει ως κύριο στόχο να φανεί η επιρροή του ανεξαρτήτου ελέγχου περυγίων στην τροποποίηση της μεθόδου ελέγχου και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

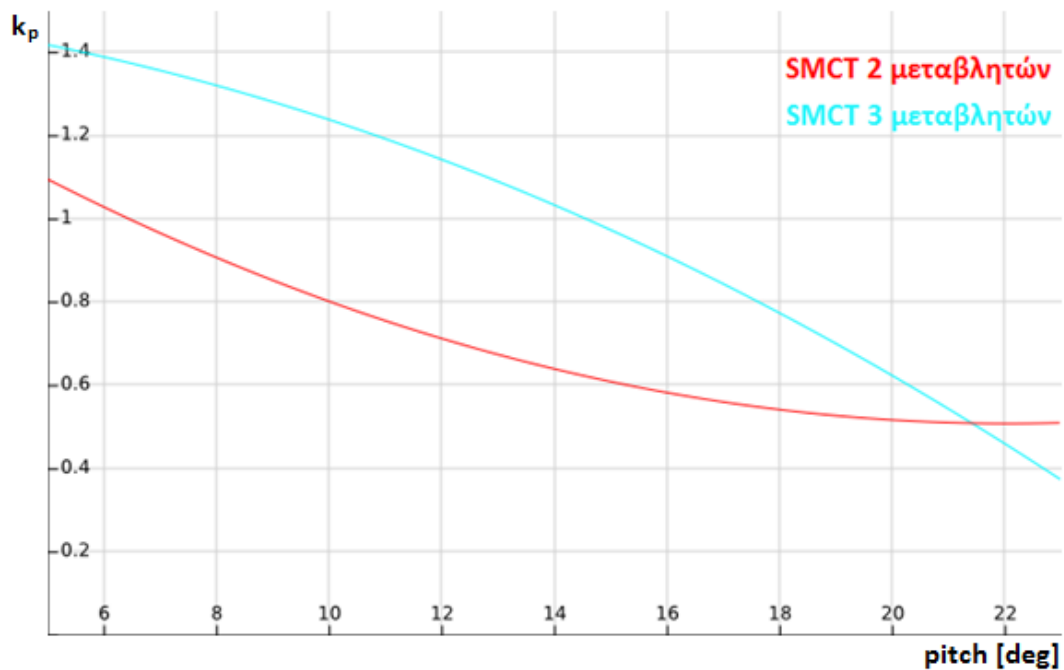
Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα ελέγχου του [1] είναι:

$$k_p = 1.4897 - 5.0922\theta + 6.6123\theta^2 \quad (4.6)$$

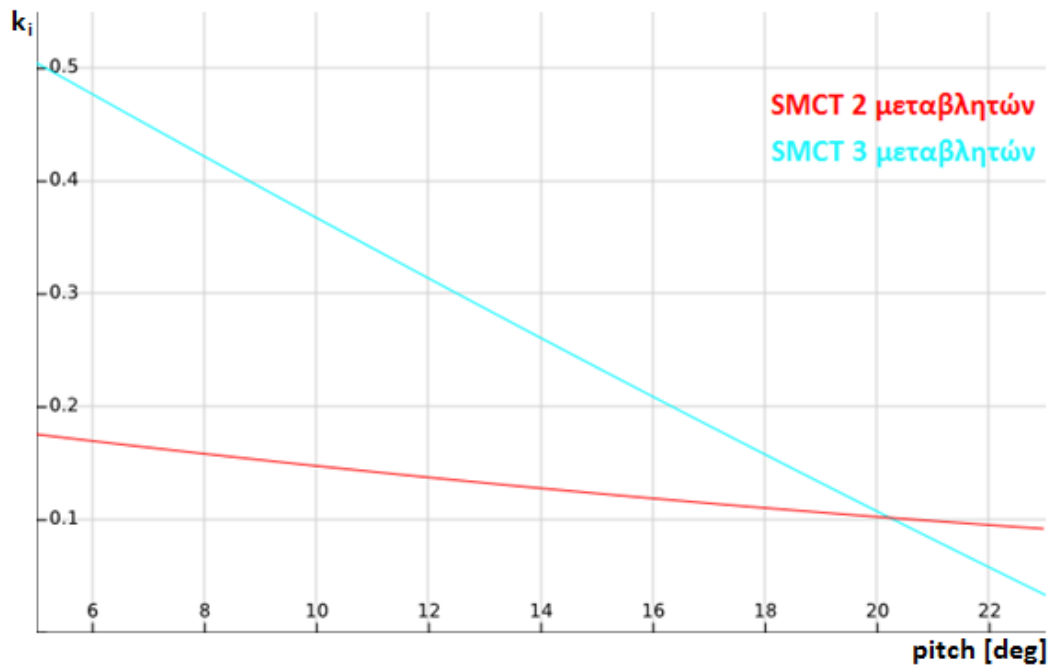
$$k_i = 0.2075 - 0.3835\theta + 0.2395\theta^2 \quad (4.7)$$

θ σε rad.

Στα Σχήματα 4.12 και 4.13 απεικονίζονται οι παραπάνω εξισώσεις ελέγχου, αφού έχουν μετατραπεί σε μοίρες, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες εξισώσεις που προέκυψαν από την SMCT 3 μεταβλητών της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.12. Gain scheduling του k_p για τις SMCT 2 και 3 μεταβλητών.

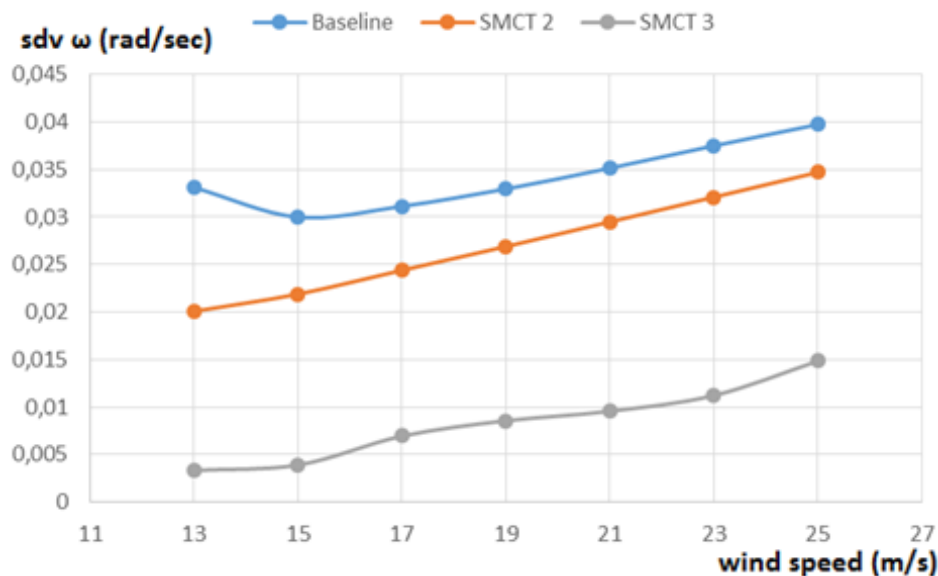


Σχήμα 4.13. Gain scheduling του k_i για τις SMCT 2 και 3 μεταβλητών.

Τα αποτελέσματα για το σενάριο [1], καθώς και μια αντίστοιχη σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Wind speed (m/s)	St. dev. Ω (rad/sec)			Variation 1-2	Variation 2-3
	1) Baseline	2) SMCT 2 μεταβλ	3) SMCT 3 μεταβλ		
13	0.033099	0.020096	0.0033531	-39.29 %	-83.31 %
15	0.029993	0.021897	0.0039242	-26.99 %	-82.08 %
17	0.031141	0.024400	0.0069662	-21.65 %	-71.45 %
19	0.032960	0.026903	0.0085792	-18.38 %	-68.11 %
21	0.035146	0.029500	0.0095758	-16.06 %	-67.54 %
23	0.037496	0.032097	0.0112350	-14.40 %	-65.00 %
25	0.039738	0.034704	0.0148510	-12.67 %	-57.21 %

Μια γραφική απεικόνιση των παραπάνω αποτελεσμάτων γίνεται στο Σχήμα 4.14:



Σχήμα 4.14: Τυπική απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής για όλες τις περιπτώσεις.

Μια πρώτη παρατήρηση είναι πως η διαφορά ανάμεσα στην Baseline μέθοδο και στην εφαρμογή της εργασίας είναι αξιόλογη. Αυτό σημαίνει πως η επιλογή μιας συντηρητικής τιμής του k_{iirc} δεν κατάφερε να επιτύχει καλύτερες αποκρίσεις απ' ό,τι η SMCT 2 μεταβλητών η οποία είναι σχεδιασμένη ώστε να ελαχιστοποιεί την τυπική απόκλιση. Άρα, η τυφλή χρήση μιας παραπάνω μεταβλητής ελέγχου δεν σημαίνει ότι θα οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα, αν δεν γίνει και η κατάλληλη διαδικασία βελτιστοποίησης. Γενικότερα δε, φαίνεται ότι η baseline μέθοδος είναι αρκετά συντηρητική και δεν έχει στόχο την βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος, αντιθέτως έχει κατασκευαστεί ώστε να εξασφαλίζει μια σίγουρη ευστάθεια που δίνουν τα χαμηλά κέρδη, χωρίς να πιέζει το σύστημα στα όριά του.

Μια δεύτερη παρατήρηση αφορά την αλματώδη διαφορά που παρατηρείται στην απόκριση του συστήματος με την εισαγωγή του ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων. Όπως είναι εμφανές, η τυπική απόκλιση έχει μείωση μέχρι και 80% σε σχέση με την βελτιστοποίηση που προκύπτει όταν δεν υπάρχει ο ανεξάρτητος έλεγχος πτερυγίων. Αυτή αποτελεί μια πολύ σημαντική παρατήρηση, καθώς δείχνει και το λόγο που οι εξισώσεις ελέγχου μεταβάλλονται καθολικά. Η νέα μεταβλητή ελέγχου εισάγει έναν καινούριο τρόπο συμπεριφοράς, ο οποίος είναι αδύνατον να αφήσει ανεπηρέαστο το σύστημα όταν επιλεγθεί η βελτιστοποίησή του.

Μπορούμε τέλος να παρατηρήσουμε πως η εισαγωγή της τρίτης μεταβλητής μας δίνει τη δυνατότητα να ωθήσουμε το σύστημα ακόμα περισσότερο στα όριά του, καθώς όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.12 και 4.13, τα κέρδη με την SMCT 3 μεταβλητών προκύπτουν ακόμη μεγαλύτερα από αυτά της αντίστοιχης 2 μεταβλητών για τις όχι πολύ υψηλές ταχύτητες. Αυξάνεται συνεπώς η αξιοπιστία του συστήματος. Αυτό που μπορούμε όμως να δούμε είναι ότι γύρω στις 20° και έπειτα, δηλαδή για ταχύτητες άνω των 23m/s αυτή η τάση αρχίζει να αντιστρέφεται. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό είναι ότι το κέρδος του ανεξάρτητου ελέγχου πτερυγίων έχει γίνει αρκετά υψηλό και πλέον αναλαμβάνει αυτό με μεγαλύτερη βαρύτητα να επιτύχει τη μείωση των αποκλίσεων της

ονομαστικής ταχύτητας. Φαίνεται λοιπόν για ακόμα μια φορά η επιρροή που έχει η εισαγωγή τρίτης μεταβλητής στο σύστημα είναι καθοριστική όταν επιδιώκεται η βελτιστοποίησή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της SMCT τριών επιπέδων με 3 μεταβλητές, που αποτέλεσε το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, οδήγησε σε μερικά σημαντικά συμπεράσματα τόσο για την εφαρμογή της τεχνικής, όσο και για την απόκριση του συστήματος.

Καταρχάς, κρίνεται ότι η SMCT αποτελεί μια επιτυχημένη μέθοδο βελτιστοποίησης. Οι στόχοι που θέτει επιτυγχάνονται και καταφέρνει, παρά τις ιδιαιτερότητές της, να επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η επιτυχία της μεθόδου επιβεβαιώνεται όχι από μόνο από την πορεία της διαδικασίας, η οποία αναδεικνύει ορατή βελτίωση της απόκρισης καθώς η διαδικασία εξελίσσεται, αλλά και από την επαλήθευση που γίνεται στο Κεφάλαιο 4. Αυτό είναι ενθαρρυντικό για τη χρήση της SMCT σε ευρύτερο πλαίσιο, καθώς θεμελιώνεται ως μία μέθοδος που μπορεί να δώσει ορθά αποτελέσματα και να επιτύχει τους σκοπούς της βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της εργασίας, μπορεί να ειπωθεί ότι η εισαγωγή του ανεξαρτήτου ελέγχου πτερυγίων, παρόλο που έχει ως κύριο στόχο την μείωση των φορτίων στα πτερύγια, δύναται να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και για την μείωση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής. Αυτό βέβαια συμβαίνει όχι χωρίς να θυσιάζει τον πρωταρχικό του στόχο, καθώς όπως φάνηκε δεν μπορεί να εγγυηθεί τη μείωση των φορτίων όσο επικεντρώνεται στην διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής. Συνεπώς φαίνεται πως τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης είναι αλληλοαποκλειόμενα.

Παρατηρήθηκε επίσης πως η νέα αυτή τεχνική προσαρμοστικού ελέγχου υπερτερεί κάθε προηγούμενης που έχει χρησιμοποιηθεί, γεγονός που ανοίγει νέους ορίζοντες σχετικά με την κερδών και για τα όρια που αυτά λαμβάνουν. Τα κέρδη γίνονται εν γένει μεγαλύτερα, χωρίς να επέρχεται αποσυγχρονισμός του συστήματος και οι νέες αποκρίσεις είναι ταχύτερες χωρίς να θυσιάζεται η ευστάθεια του συστήματος. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι η νέα μέθοδος ελέγχου συντελεί στην βελτίωση της απόκρισης του συστήματος.

Όσον αφορά τις μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας, ενδιαφέρουσα παραλλαγή θα αποτελούσε η ενσωμάτωση μιας τέταρτης, πέμπτης ή παραπάνω μεταβλητών βελτιστοποίησης και η παρατήρηση του κατά πόσο αυτές επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Πιθανές μεταβλητές για το σκοπό αυτό θα μπορούσαν να είναι το διαφορικό κέρδος του ελέγχου βήματος πτερυγίων k_d , η ταυτόχρονη ενσωμάτωση IFC και IPC, η χρήση 2P ανεξάρτητου ελέγχου, ή η χρήση του αναλογικού κέρδους του ανεξαρτήτου ελέγχου πτερυγίων, k_{ipc} . Πρέπει να δοθεί βέβαια ιδιαίτερη προσοχή καθώς η αύξηση του αριθμού των μεταβλητών επιφέρει και την αντίστοιχη αύξηση στον αριθμό των δειγμάτων, γεγονός που κάνει την μέθοδο υπολογιστικά ασύμφορη. Συνεπώς η επιλογή των επιπλέον μεταβλητών πρέπει να είναι ορθή, ώστε να υπάρχει σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές και στον αντικειμενικό στόχο.

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η χρήση της τυπικής απόκλισης των φορτίων των πτερυγίων αντί της ταχύτητας περιστροφής ως αντικειμενική συνάρτηση για τις 3 μεταβλητές. Αυτή η διαδικασία θα αναδείξει το άλλο άκρο της μεθόδου, όπου οι μεταβλητές του pitch control αξιοποιούνται για την ενίσχυση του IPC, στον αντίποδα δηλαδή της παρούσας εργασίας. Ο νόμος ελέγχου θα μεταβληθεί και μπορεί να μελετηθεί τι επιπτώσεις θα έχει αυτή η επιλογή στην ευστάθεια του συστήματος. Μπορεί επίσης να μελετηθεί κατά πόσο η νέα μέθοδος ελέγχου μεταβάλλει την τυπική απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής σε σχέση με τον έλεγχο της παρούσας εργασίας.

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι ο συνδυασμός των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων, με στόχο την δημιουργία μιας πολυμεταβλητής αντικειμενικής συνάρτησης. Ο στόχος είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας περιστροφής, λαμβάνοντας υπόψιν την τυπική απόκλιση των φορτίων των πτερυγίων. Ένας τρόπος με τον οποίο αυτό μπορεί να επιτευχθεί είναι με τη χρήση σταθμιστών στην κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή η χρήση σταθμισμένων μέσων των δύο συναρτήσεων. Οι βαρύτητες των σταθμίσεων θα μπορούσαν να έχουν ποικίλες τιμές, ή θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση κατά Pareto, όπου εξάγεται η αντικειμενική συνάρτηση ως συνάρτηση των συντελεστών βαρύτητας.

Σαν μια τελευταία παραλλαγή, μπορεί να ειπωθεί πως για όλες τις παραπάνω πιθανές εφαρμογές, όπως και σαν παραλλαγή της παρούσας εργασίας, μπορεί να εξεταστεί η περίπτωση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή, οι επιπλέον ροπές που εισάγονται από δυνάμεις όπως π.χ. των κυμάτων, επηρεάζουν το σύστημα σε επίπεδο που επιφέρει θεμελιώδεις αλλαγές στον τρόπο ελέγχου, οι οποίες είναι άξιες διερεύνησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tatoulis Petros, “Parameter Optimization for Linear Power – Speed Control of Onshore and Offshore Wind Turbines”, National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, July 2018.
- [2] Spyropoulos Nikos, “Active load control of wind turbine blades through the combined use of Individual Pitch Control and Individual Flap Control based on wind inflow measurements via an ideal spinner anemometer”, National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, October 2017.
- [3] Zhong-Hua Han and Ke-Shi Zhang, “Surrogate-Based Optimization”, Dr. Olympia Roeva (Ed.), March 7th 2012.
- [4] Αντώνης Αλεξανδρίδης, «Τεχνολογίες Ελέγχου στα Αιολικά Συστήματα», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα 2009.
- [5] Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L.C., Natarajan, A., and Hansen, M. H., “Description of the DTU 10MW Reference Wind Turbine”, DTU Wind Energy Report-I-0092, 2013.

