



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

**Αποτίμηση της δυνατότητας μείωσης των φορτίων  
ανεμογεννήτριας με χρήση ανεξάρτητου κυκλικού  
ελέγχου υψηλής συχνότητας (2P) της γωνίας βήματος  
και της θέσης μεταπτερυγίων καμπυλότητας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΑΒΡΑΜΙΔΟΥ ΕΥΔΟΞΙΑΣ**

**Επιβλέπων :** Βασίλειος Ριζιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

---





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ

**Αποτίμηση της δυνατότητας μείωσης των φορτίων  
ανεμογεννήτριας με χρήση ανεξάρτητου κυκλικού ελέγχου  
υψηλής συχνότητας (2P) της γωνίας βήματος και της θέσης  
μεταπτερυγίων καμπυλότητας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΑΒΡΑΜΙΔΟΥ ΕΥΔΟΞΙΑΣ**

**Επιβλέπων :** Βασίλειος Ριζιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2019.

*(Υπογραφή)*

.....  
Βασίλειος Ριζιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Σπυρίδων Βουτσινάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Μπούρης Δημήτριος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

---



## Πίνακας περιεχομένων

<b>i</b>	<b>Εικόνες</b> .....	<b>2</b>
<b>ii</b>	<b>Πίνακες</b> .....	<b>3</b>
<b>iii</b>	<b>Διαγράμματα</b> .....	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>7</b>
1.1	Παθητικός και ενεργητικός έλεγχος.....	7
1.2	Σύνοψη επόμενων κεφαλαίων.....	8
<b>2</b>	<b>Ο κώδικας HydroGast</b> .....	<b>9</b>
2.1	Αεροδυναμικό μοντέλο.....	9
2.2	Ελαστικό μοντέλο.....	10
2.2	Θεωρία πολλαπλών σωμάτων.....	10
<b>3</b>	<b>Ανεμογεννήτρια αναφοράς DTU 10MW RWT</b> .....	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Βασικός έλεγχος</b> .....	<b>19</b>
4.1	Μεταβλητές στροφές.....	19
4.2	Σταθερές στροφές.....	20
<b>5</b>	<b>Έλεγχος φορτίων</b> .....	<b>23</b>
5.1	Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος (IPC).....	23
5.2	Εξατομικευμένος Έλεγχος Γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IFC).....	29
5.2	Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος και Γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IPFC).....	33
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα</b> .....	<b>34</b>
6.1	Αρχικές προσομοιώσεις με βασικό έλεγχο, IPC 1p, IPC 1p-2p και IPC 2p.....	34
6.2	Βαθμονόμηση κερδών.....	38
6.3	Έλεγχος φίλτρων.....	41
6.4	IPC 1p-2p έλεγχος σε κανονική και ακραία τύρβη.....	43
6.5	IPFC 1p-2p έλεγχος σε κανονική και ακραία τύρβη.....	54
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>60</b>

## **i) Εικόνες**

2.3.1 Το κάθε σώμα έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων. $r_G^k$ η θέση ενός τυχαίου σημείου του σώματος σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων $O_G x_G y_G z_G$ δίνεται ως εξής και $\rho^k$ το διάνυσμα θέσης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων $O_{xyz}$ του σώματος σε σχέση με το αδρανειακό.....	13
2.3.2 Πραγματοποίηση της κινηματικής των πολλαπλών σωμάτων. Παραδείγματα ελαστικών βαθμών ελευθερίας $q$ (αριστερά) είτε βαθμών ελευθερίας $q$ λόγω της ελεγχόμενης κίνησης άκαμπτου σώματος (δεξιά).....	13
2.3.3 Το κάθε σώμα (εδώ το παράδειγμα ενός περυγίου) χωρίζεται σε έναν αριθμό επιμέρους υπο-σωμάτων, όπου το καθένα θεωρείται ως γραμμικό στοιχείο δοκού. Κάθε υπό-σωμα έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, και δέχεται παραμορφώσεις και περιστροφές.....	14
4.1.1 Διάγραμμα βασικού ελέγχου στο διάστημα μεταβλητών στροφών.....	20
4.2.1 Διάγραμμα βασικού ελέγχου στο διάστημα σταθερών στροφών.....	20
5.1.1 Μετασχηματισμός Mflap και Medge στην Mout.....	25
5.1.2 Μετασχηματισμός των Mout σε Mtilt και Myaw.....	27
5.1.3 Διαδικασία IPC ελέγχου.....	29
5.2.1 Διαδικασία IFC ελέγχου.....	30
5.2.2 Α) Ανεξάρτητη κίνηση του 30% του αρθρωτού περυγίου Β) συνδυασμένη κίνηση του 10% και του 30% του αρθρωτού περυγίου.....	31
5.2.3 Α) Διάφοροι σχηματισμοί διαμόρφωσης της γραμμής καμπυλότητας που δοκιμάστηκαν. Β) Μεταβολή του συντελεστή άνωσης σε σχέση με τη γωνία μεταπερυγίου για τους προαναφερθείς σχηματισμούς.....	32

## ii) Πίνακες

3.1	Βασικοί παράμετροι της DTU 10MW.....	15
3.2	Ιδιότητες ατράκτου και πλήμνης.....	16
3.3	Ιδιοσυχνότητα για τη στρέψη.....	16
3.4	Ιδιότητες αξονικού συστήματος.....	17
3.5	Ιδιοσυχνότητα του απομονωμένου πτερυγίου.....	17
3.6	Ιδιοσυχνότητα όλης της ανεμογεννήτριας .....	17
6.1.1	Αρχικά κέρδη του ολοκληρωτικού και του διαφορικού όρου του ελεγκτή για IPC 1p και 2p έλεγχο.....	35
6.2.1	Ισοδύναμα φορτία (kNm) της Mflap για διάφορα κέρδη με έλεγχο IPC 1p-2p στην ταχύτητα ανέμου 17m/s.....	39
6.2.2	Ισοδύναμα φορτία (kNm) της Mx tower με έλεγχο IPC 1p-2p στην ταχύτητα ανέμου 17m/s για τα κέρδη που επέφεραν μείωση στα ισοδύναμα φορτία της Mflap σε σχέση με τον βασικό και ipc 1p έλεγχο.....	39
6.2.3	Ισοδύναμα φορτία (kNm) της Mz tower με έλεγχο IPC 1p-2p στην ταχύτητα ανέμου 17m/s για τους συνδυασμούς κερδών που επέφεραν μείωση στα ισοδύναμα φορτία της Mflap σε σχέση με τον βασικό και ipc 1p έλεγχο .....	40
6.2.4	Κέρδη για τον IPC 1p-2p έλεγχο που μειώνουν τα ισοδύναμα φορτία της Mflap και της Mz tower σε σχέση με τον βασικό και τον IPC 1p έλεγχο στην ταχύτητα ανέμου 17m/s.....	41
6.3.1	Ποσοστιαία μεταβολή ισοδύναμων φορτίων Mflap, Mx tower, Mz tower που προέκυψαν μετά τις αλλαγές των φίλτρων σε σχέση με τα αρχικά, για τα επιλεγμένα κέρδη.....	42
6.4.1	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3 ) των Mflap, Mx tower, Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B.....	44
6.4.2	Κέρδη που θα χρησιμοποιηθούν τελικά στην κανονική τύρβη για τον έλεγχο IPC 1p-2p στις ταχύτητες 21-25m/s .....	46
6.4.3	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap, Mx tower, Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 21-25m/s. IPC 1p-2p: κέρδη E.....	46
6.4.4	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap, Mx tower, Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-17m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B.....	48

6.4.5	Κέρδη που θα χρησιμοποιηθούν τελικά στην ακραία τύρβη για τον έλεγχο IPC 1p-2p στις ταχύτητες 13-25m/s .....	50
6.4.6	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E (5η στήλη) και Στ (6η).....	50
6.4.7	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E.....	52
6.5.1	Κέρδη που χρησιμοποιήθηκαν για τον IPFC έλεγχο σε κανονική και ακραία τύρβη στις ταχύτητες 13-25m/s .....	54
6.5.2	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.....	54
6.5.3	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.....	56



### iii) Διαγράμματα

4.2.1	Καμπύλη ισχύς-ταχύτητας ανέμου .....	21
4.2.2	Καμπύλη γωνίας βήματος-ταχύτητας ανέμου .....	21
4.2.3	Καμπύλη γωνιακής ταχύτητας δρομέα -ταχύτητας ανέμου .....	22
5.1.1	Καμπτικές ροπές περιγύσης (Mflap) όταν οι ροπές στο μη στρεφόμενο σύστημα (Mtilt, Myaw) είναι μη μηδενικές .....	26
5.1.2	Καμπτικές ροπές περιγύσης (Mflap) όταν οι ροπές στο μη στρεφόμενο σύστημα (Mtilt, Myaw) είναι μηδενικές .....	27
6.1.1	Η Mflap σε μια προσομοίωση ενός δεκαλέπτου με IPC 1p έλεγχο, σε ταχύτητα ανέμου 17m/s συγκρινόμενη με την Mflap που σημειώθηκε στον βασικό έλεγχο .....	35
6.1.2	Διάγραμμα φάσματος της Mflap με βασικό και IPC 1p έλεγχο .....	36
6.1.3	Η Mflap σε μια προσομοίωση ενός δεκαλέπτου με IPC 1p-2p έλεγχο, σε ταχύτητα ανέμου 17m/s συγκρινόμενη με αυτήν που καταγράφηκε τόσο με τον βασικό έλεγχο όσο και τον έλεγχο IPC 1p .....	36
6.1.4	Διάγραμμα φάσματος της Mflap με βασικό, IPC 1p και IPC 1p-2p έλεγχο .....	37
6.1.5	Η Mflap σε μια προσομοίωση ενός δεκαλέπτου με IPC 2p έλεγχο, σε ταχύτητα ανέμου 17m/s συγκρινόμενη με αυτήν που καταγράφηκε με τον βασικό έλεγχο .....	37
6.1.6	Διάγραμμα φάσματος της Mflap με βασικό και IPC 2p έλεγχο .....	38
6.4.1	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B .....	45
6.4.2	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B .....	45
6.4.3	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p κέρδη B στις ταχύτητες 13-19m/s, κέρδη E στις ταχύτητες 21-25m/s .....	47
6.4.4	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p κέρδη B στις ταχύτητες 13-19m/s, κέρδη E στις ταχύτητες 21-25m/s. ....	47
6.4.5	Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-17m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B .....	49

6.4.6 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-17m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B .....	49
6.4.7 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p με τα δύο διαφορετικά κέρδη E και Στ, σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη, στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1 .....	51
6.4.8 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p με τα δύο διαφορετικά κέρδη E και Στ, σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1 .....	51
6.4.9 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E .....	53
6.4.10 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E .....	53
6.5.1 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B .....	55
6.5.2 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B .....	56
6.5.3 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC συνδυασμός κερδών B .....	57
6.5.4 Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B .....	58

# 1

## *Εισαγωγή*

Για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των ανεμογεννητριών, και συνεπώς να μειωθεί το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές, γίνονται έρευνες για τις μεθόδους ελέγχου με τις οποίες μπορούν να μειωθούν τα φορτία που δέχονται κατά τη λειτουργία τους.

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η μείωση των εναλλασσόμενων φορτίων στα πτερύγια. Αυτά οφείλονται σε πληθώρα αιτιών, όπως η ανομοιομορφία του ανάντη πεδίου ανέμου, η οποία με τη σειρά της προκαλείται από την τύρβη στον άνεμο, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου στην οριζόντια κατεύθυνση σε ανώμαλες τοπογραφίες, η λειτουργία με άνεμο σε απόκλιση τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη κατεύθυνση, η κλίση του άξονα, οι ριπές (απότομες αλλαγές) του ανέμου, η επίδραση του πύργου στην ταχύτητα που βλέπουν τα πτερύγια, η βαρύτητα και άλλα.

Για την μείωση των εναλλασσόμενων φορτίων δύο είναι οι βασικές μέθοδοι, ο ενεργητικός και ο παθητικός έλεγχος.

### *1.1 Παθητικός και Ενεργητικός Έλεγχος*

Ο παθητικός έλεγχος στοχεύει στην ακύρωση των ανομοιομορφιών του ανάντη πεδίου ανέμου, αποκλειστικά μέσω της αεροελαστικής απόκρισης των πτερυγίων του δρομέα. Τέτοιες μέθοδοι είναι η παραδοσιακή ρύθμιση γωνίας βήματος ή στροφών, οι πιο καινοτόμες μέθοδοι οι οποίες ακόμα ερευνώνται, όπως η σύζευξη κάμψης-στρέψης και στις δύο κατευθύνσεις.

Ο ενεργητικός έλεγχος έγκειται στη ρύθμιση των κύριων αεροδυναμικών παραμέτρων των πτερυγίων (αλλαγή της γωνίας πρόσπτωσης ή του συντελεστή άνωσης) με βάση πληροφορίες που λαμβάνονται από κατάλληλους αισθητήρες (επιμηκυνσιόμετρα, επιταχυνσιόμετρα, σωλήνες Pitot, LIDAR, ανεμόμετρα πλήμνης κ.τ.λ.).

Η πιο γνωστή μορφή ενεργητικού ελέγχου είναι ο Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος (Individual pitch control-IPC). Ο IPC αλλάζει τις γωνίες πρόσπτωσης των πτερυγίων χρησιμοποιώντας επενεργητές του ελέγχου βήματος. Τα εναλλασσόμενα φορτία έχουν συχνότητα τη συχνότητα περιστροφής ( $1p$ ), ή τις υψηλότερης τάξης αρμονικές  $2p, 3p$ . Στην παρούσα εργασία, στόχος μας είναι η εφαρμογή ενός επιπλέον τμήματος ελέγχου στον ενεργητικό έλεγχο IPC που να αφορά την μείωση εναλλασσόμενων φορτίων με συχνότητα υψηλότερης της  $1p$  αρμονικής συχνότητας, της  $2p$ .

Τα τελευταία χρόνια, μελετάται η υποβοήθηση του Εξατομικευμένου Ελέγχου Βήματος από τον Εξατομικευμένο Έλεγχο γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (Individual Flap Control – IFC). Σε αυτήν την προσέγγιση, μικρές αεροδυναμικές επιφάνειες που ονομάζονται Μεταπτερύγια Καμπυλότητας στη Γραμμή Εκφυγής (Trailing Edge Flaps – TEFs) κατανέμονται σε συγκεκριμένες θέσεις κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου. Ένας επενεργητής είναι υπεύθυνος για την αλλαγή της γωνίας των Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας στη Γραμμή Εκφυγής, η οποία με τη σειρά της μετατοπίζει την καμπύλη του συντελεστή άνωσης και άρα επιφέρει αλλαγή στην τρέχουσα τιμή του. Με αυτόν τον τρόπο, τα φορτία των πτερυγίων ελέγχονται δυναμικά. Τέτοιες μέθοδοι είναι γνωστές στη βιβλιογραφία σαν Ευφυής Έλεγχος Δρομέα (Smart Rotor Control).

Στην παρούσα εργασία, ο IFC έλεγχος δεν χρησιμοποιείται αυτούσιος, αλλά ως επικουρικός στον IPC έλεγχο. Χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων ελέγχου, ο Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος και γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IPFC).

## ***1.2 Σύνοψη επόμενων κεφαλαίων***

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη διπλωματική, ο hydroGAST και τα μοντέλα που χρησιμοποιεί.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της προσομοιωμένης ανεμογεννήτριας, της DTU 10MW RWT.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το κομμάτι του βασικού ελέγχου της ανεμογεννήτριας (μεταβλητή ταχύτητα-συλλογική γωνία βήματος).

Στο πέμπτο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια του ελέγχου φορτίων και περιγράφονται οι έλεγχοι IPC, IFC, IPFC.

Στο έκτο κεφάλαιο καταγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

# 2

## *Ο κώδικας HydroGAST*

Ο κώδικας hydroGast είναι ένας αεροελαστικός κώδικας που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π.. Εκτελεί την αεροελαστική προσομοίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών υπό διάφορες συνθήκες ροής (κλίση ανέμου, οριακό στρώμα εδάφους, κ.λπ.). Ο κώδικας αποτελείται βασικά από το αεροδυναμικό και το ελαστικό μοντέλο, τα οποία θα εξηγηθούν περιληπτικά παρακάτω. [1],[2],[7]

### *2.1 Αεροδυναμικό μοντέλο*

Το αεροδυναμικό μοντέλο αφορά στην ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων που δέχεται η κατασκευή. Για των υπολογισμό αυτών των φορτίων χρησιμοποιείται η Θεωρία του Δίσκου Ορμής σε συνδυασμό με τη Θεωρία Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum – BEM). Στην ΘΔΟ χρησιμοποιούνται οι βασικές εξισώσεις διατήρησης (συνέχεια, ορμή) για να περιγράψουν τη μεταβολή της ταχύτητας και της πίεσης άναντι και κάτω της ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός αυτός παρέχει μία εκτίμηση για την ώση και τη ροπή που αναπτύσσονται στο δρομέα της ανεμογεννήτριας κάτω από ορισμένες αεροδυναμικές συνθήκες. Αντιστοίχως η ΘΣΠ υπολογίζει τις ίδιες ποσότητες (ώση, ροπή) συναρτήσει διαφορετικών παραμέτρων (κυρίως γεωμετρικών παραμέτρων της αεροτομής). Έτσι απαιτώντας την ισότητα των αεροδυναμικών μεγεθών που παράγονται από τις δυο διαφορετικές θεωρίες και μέσω μιας επαναληπτικής μεθόδου μπορούμε να προσεγγίσουμε τις επαγόμενες ταχύτητες λόγω ομόρρου και να προσδιορίσουμε τα αεροδυναμικά φορτία. Επίσης χρησιμοποιείται και η μέθοδος ONERA [8] ώστε να μπορεί να μοντελοποιηθεί και η κατάσταση

αποκολλημένης ροής (π.χ. στην περίπτωση όπου η ανεμογεννήτρια είναι σταματημένη και πολύ μεγάλη η ταχύτητα του ανέμου οπότε έχουμε και μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης).

## 2.2 Ελαστικό μοντέλο

Το ελαστικό μοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των φορτίων (αδρανειακά, εσωτερικά, βαρυτικά, αεροδυναμικά) και των παραμορφώσεων που υφίστανται τα σώματα της κατασκευής. Όλα τα ελαστικά σώματα της προσομοιωμένης ανεμογεννήτριας θεωρούνται ως γραμμικές (πρώτης τάξεως) δοκοί. Ο κώδικας υλοποιεί τη θεωρία δοκών κατά Timoshenko, ενώ υπάρχει και η επιλογή της επίλυσης κατά Euler. Τόσο στην Euler όσο και στην Timoshenko προσέγγιση γίνεται η θεώρηση ότι μια διατομή της δοκού παραμένει επίπεδη μετά την παραμόρφωση. Η διαφορά των δύο θεωριών είναι ότι η κατά Euler δέχεται πως η διατομή αυτή είναι κάθετη στον ελαστικό άξονα της δοκού ενώ η κατά Timoshenko δέχεται πως μπορεί να έχει κλίση (λαμβάνει λοιπόν υπόψη και τις διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται κατά την κάμψη). Γι' αυτόν το λόγο, στη θεωρία δοκού κατά Euler οι δύο γωνίες κάμψης  $\theta_x$  και  $\theta_z$  σχετίζονται με τις παραγώγους των δυο εγκάρσιων παραμορφώσεων  $u$  και  $w$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι άγνωστοι να μειώνονται κατά δύο και να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις δύο επιπλέον εξισώσεις για τον υπολογισμό εσωτερικών φορτίων. Αν και πιο απλή και με λιγότερες απαιτήσεις για κατασκευαστικά δεδομένα της ανεμογεννήτριας, η κατά Euler επίλυση συνήθως δεν δίνει τόσο ακριβή αποτελέσματα όσο η κατά Timoshenko και γι αυτό στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε η δεύτερη.

## 2.3 Μέθοδος πολλαπλών σωμάτων

Στον κώδικα hydroGast, η ανεμογεννήτρια θεωρείται ένα δυναμικό σύστημα αποτελούμενο από πολλές συνιστώσες, οι οποίες είναι τα πτερύγια, το αξονικό σύστημα και ο πύργος που προσεγγίζονται σαν δομές δοκών Timoshenko. Όλα τα παραπάνω συναρμολογούνται ως ενιαίο σύστημα με την λεγόμενη μέθοδο πολλαπλών σωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε συστατικό θεωρείται ξεχωριστό από τα άλλα, παρόλα αυτά υπόκειται σε κινηματικές συνθήκες καθώς και συνθήκες φόρτισης που ασκούνται στα σημεία σύνδεσης των στοιχείων.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης προσέγγισης ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων  $O_{xyz}$  εκχωρείται σε κάθε επιμέρους συστατικό/σώμα σε σχέση με το οποίο ορίζονται οι τοπικές ελαστικές μετατοπίσεις (εικόνα 2.3.1). Στον hGAST το κάθε σώμα θεωρείται άκαμπτο σε σχέση με το τοπικό του σύστημα και οι ελαστικές κινήσεις επικοινωνούνται από τα προηγούμενα σώματα σαν κινηματικές συνθήκες επιβαλλόμενες στα συνδεδεμένα τους σημεία. Οι κινήσεις του άκαμπτου σώματος μπορούν να οριστούν ή να ελεγχθούν ενώ οι ελαστικές κινήσεις αφορούν μόνο την ολική εκτροπή των προηγούμενων συστατικών που "μεταφέρεται" στο τρέχον. Για παράδειγμα το πτερύγιο μπορεί να υποβληθεί σε κίνηση βήματος (κίνηση άκαμπτου σώματος που υποβάλλεται κατευθείαν στο πτερύγιο), αζιμουθιακή περιστροφή και περιστροφή απόκλισης (κίνηση άκαμπτου σώματος που υποβάλλεται έμμεσα από το αξονικό

σύστημα και την πλήρη στο περύγιο) αλλά και στις ελαστικές περιστροφικές κινήσεις και κινήσεις μετατόπισης που προκαλούνται από το αξονικό σύστημα και τον πύργο.

Για παράδειγμα, η θέση  $r_G^k$  ενός τυχαίου σημείου του  $k$  – στού σώματος σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων  $O_G x_G y_G z_G$  δίνεται από την εξίσωση 2.3.1.  $R^k$  είναι το διάνυσμα θέσης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων  $O_{xyz}$  του σώματος  $k$  σε σχέση με το αδρανειακό και  $T^k$  το μητρώο περιστροφής του τοπικού συστήματος προς το ολικό.

$$r_G^k = R^k + T^k \cdot r^k \quad (2.3.1)$$

$$(T^k)^T \cdot \ddot{r}_G^k = (T^k)^T \cdot \ddot{R}^k + (T^k)^T \cdot \ddot{T}^k \cdot r + 2 \cdot (T^k)^T \cdot \dot{A} T_k \cdot r_G + \dot{r}^k \quad (2.3.2)$$

όπου:

$(T^k)^T \cdot \ddot{R}^k$  : επιτάχυνση της αρχής των αξόνων

$(T^k)^T \cdot \ddot{T}^k \cdot r$  : φυγόκεντρος επιτάχυνση

$2 \cdot (T^k)^T \cdot \dot{A} T_k \cdot r_G$  : επιτάχυνση Coriolis

όπου το  $(T^k)^T \cdot \ddot{r}_G^k$  εκφράζεται σε τοπικές συντεταγμένες. Η κίνηση του τοπικού συστήματος του σώματος εγείρει επιπλέον αδρανειακούς όρους (φυγόκεντρος και Coriolis) μέσω των χρονικών παραγώγων του  $T^k$  που πρέπει να προστεθούν στις εξισώσεις ισορροπίας.

Ορίζοντας τα  $R^k$  και τα  $T^k$  ακολουθεί μια σειρά μετατοπίσεων και περιστροφών  $d_j$  και  $t_j$  που συνδέει τους  $O_{xyz}$  και  $O_G x_G y_G z_G$

$$r_G^k = d_m + t_m \cdot \{ \dots [d_2 + t_2 \cdot (d_1 + t_1 \cdot r^k)] \} \rightarrow$$

$$R^k = d_m + t_m \cdot \{ \dots [d_2 + t_2 \cdot d_1] \}, T^k = \prod_{j=1}^{J(k)} t_j \quad (2.3.2)$$

Καθένα από τα  $d_j$  και  $t_j$  συνδέεται με μια μόνο μετατόπιση είτε με μία μόνο περιστροφή σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Συλλέγοντας όλες τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές που εμπλέκονται στον ορισμό του  $T^k$  και του  $R^k$ , εισάγεται το διάνυσμα κινηματικών βαθμών ελευθερίας  $q$ . Κάθε στοιχείο του  $q$  αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση περιστροφής ή μετακίνησης κι έτσι το  $d_j = d_j(q_n; dir_n)$  αντιστοιχεί σε μια  $q_n$  μετατόπιση στην κατεύθυνση  $dir_n$  (αντίστοιχα και για το  $t_j$ ). Τα στοιχεία του  $q$  είναι γενικά εξαρτημένα και γι' αυτό  $R^k = R^k(q_k; t)$  και  $T^k = T^k(q_k; t)$ , όπου  $q_k$  δηλώνει τον περιορισμό για το  $k$  –  $th$  συστατικό. Αν η  $q_n$  αναφέρεται σε ελεγχόμενη κίνηση άκαμπτου σώματος, τότε η αντίστοιχη δυναμική εξίσωση προστίθεται στο σύστημα. Αν η  $q_n$  είναι ένας ήδη υπάρχων ελαστικός βαθμός ελευθερίας, τότε προστίθεται μια απλή εξίσωση αντιστοίχισης, (εικόνα 2.3.2). Για παράδειγμα, τα περύγια ακολουθούν την ελαστική κίνηση του πύργου, την γωνιακή απόκλιση του κλωβού, την περιστροφή του άξονα και την περιστροφή βήματος που όλα περιλαμβάνονται σαν βαθμοί ελευθερίας των ελεγχόμενων κινήσεων.

Εκτός από τις κινηματικές συνθήκες που επιβάλλονται στα σημεία σύνδεσης, πρέπει να ικανοποιούνται και οι συνθήκες φόρτισης. Συγκεκριμένα σε κάθε σημείο σύνδεσης ένα από τα συνδεδεμένα σώματα μεταδίδει τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές στα υπόλοιπα, οι οποίες

με τη σειρά τους συμβάλλουν στα εσωτερικά τους φορτία (αντίδρασης). Έτσι στο προηγούμενο παράδειγμα ο πύργος θα λάβει φορτία από την άτρακτο.

Επιπλέον, η ίδια θεωρία πολλαπλών σωμάτων επεκτείνεται στο επίπεδο των επί μέρους συνιστωσών. Το κάθε σώμα (περυγίο, αξονικό σύστημα, πύργος) χωρίζεται σε έναν αριθμό επιμέρους υπο-σωμάτων, όπου το καθένα θεωρείται ως ένα γραμμικό στοιχείο δοκού, (εικόνα 2.3.3). Κάθε υπό-σώμα έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων  $O_{xyz}$  που ακολουθεί το σώμα στην κίνησή του. Το πρώτο άκρο (P1) από το υπό-σώμα θεωρείται η αρχή των αξόνων  $O$  ενώ το δεύτερο άκρο P2 είναι ελεύθερο. Το σύστημα συντεταγμένων  $O_{xyz}$  του  $v$  – στού υπο-σώματος του  $k$  – στού σώματος, ορίζεται σε σχέση ως προς τον άξονα συντεταγμένων  $O_k x_k y_k z_k$  του κύριου σώματος από το διάστημα θέσης της αρχής των αξόνων του  $\widetilde{R}_v^k$  και από τον πίνακα περιστροφής  $\widetilde{T}_v^k$ . Μεγάλες παραμορφώσεις και περιστροφές χτίζονται σταδιακά και μη γραμμική δυναμική εισάγεται επιβάλλοντας σε κάθε υπό-σώμα τις μετακινήσεις και τις περιστροφές των προηγούμενων υπο-σωμάτων σαν κινήσεις άκαμπτων σωμάτων. Συγκεκριμένα, ένα διάνυσμα  $\widetilde{q}_v^k$  ορίζεται για κάθε  $v$  – στού υπο-σώμα του  $k$  – στού σώματος που περιλαμβάνει τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές των ελεύθερων ακρών των προηγούμενων υπο-σωμάτων.

$$\widetilde{R}_v^k = \widetilde{R}_v^k(\widetilde{q}_v^k; t) \quad (2.3.3)$$

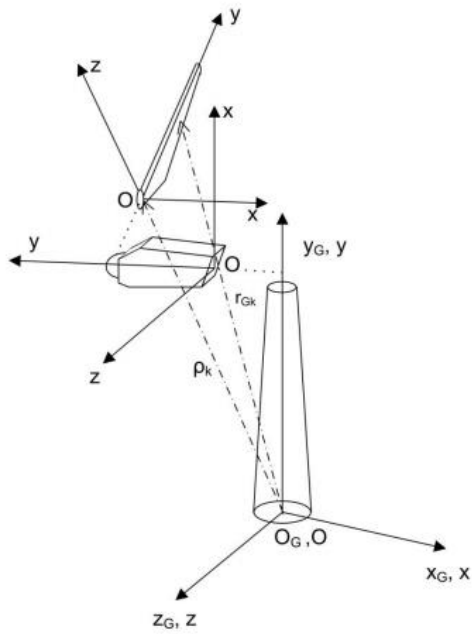
$$\widetilde{T}_v^k = \widetilde{T}_v^k(\widetilde{q}_v^k; t) \quad (2.3.4)$$

Αν το κύριο σώμα διαιρείται σε έναν επαρκώς μεγάλο αριθμό υπο-σωμάτων, τότε οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές, σε σχέση στο σύστημα του υπο-σώματος, θεωρούνται μικρές και μπορούν να εφαρμοστούν γραμμικές εξισώσεις δοκού. Το διάνυσμα θέσης ενός αυθαίρετου σημείου στο  $v$  – στού υπο-σώμα του  $k$  – στού σώματος γράφεται σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων  $O_G x_G y_G z_G$  ως:

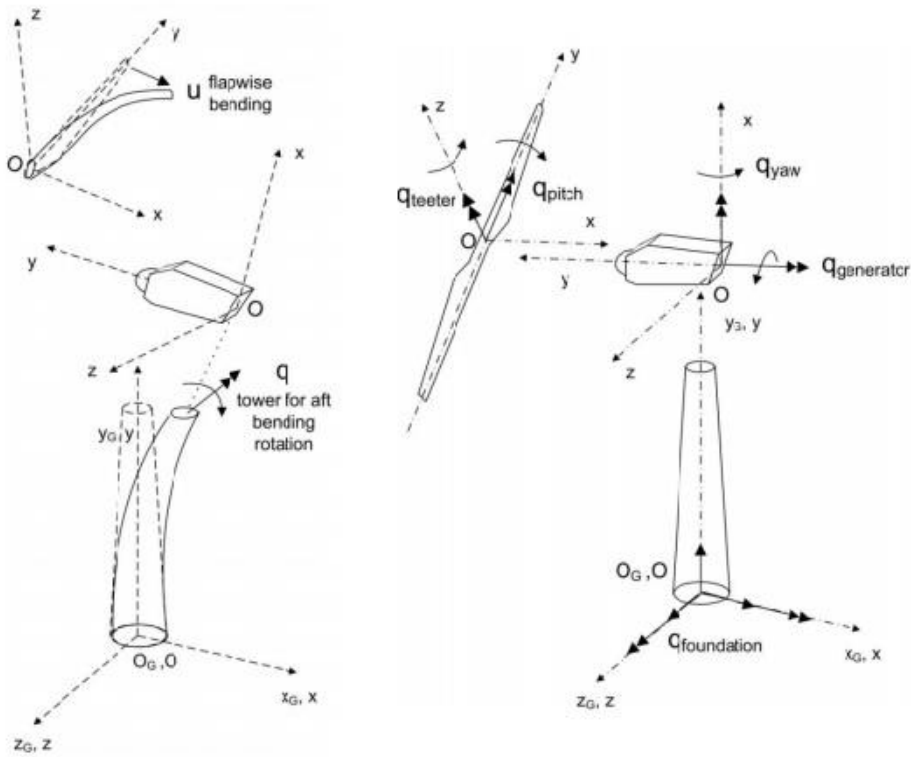
$$r_{G,v}^k = R^k(q_k; t) + T^k(q_k; t) \cdot \{ \widetilde{R}_v^k(\widetilde{q}_v^k; t) + \widetilde{T}_v^k(\widetilde{q}_v^k; t) \cdot r_v^k \} \quad (2.3.5)$$

όπου το  $r_v^k$  είναι το διάνυσμα θέσης της αυθαίρετης τοποθεσίας στο υπο-σώμα με στο  $O_{xyz}$ . Η δυναμική σύζευξη των υπο-σωμάτων εισάγεται με την επικοινωνία των φορτίων αντίδρασης (3 δυνάμεις και 3 ροπές) στον πρώτο κόμβο κάθε υπο-σώματος στον ελεύθερο κόμβο του προηγούμενου υπο-σώματος ως εξωτερικό φορτίο.

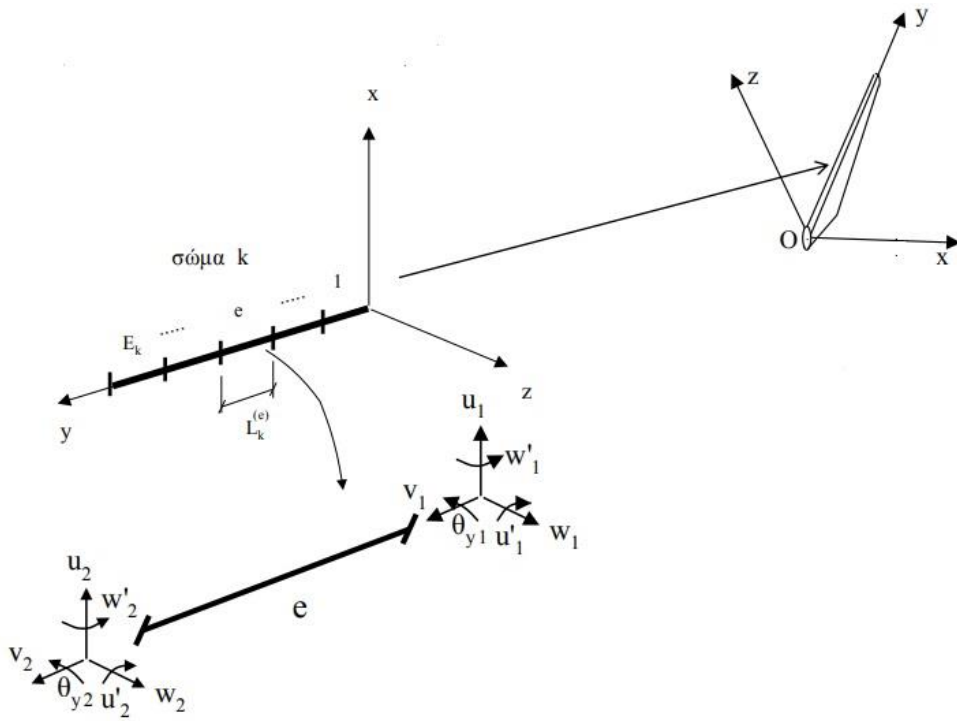




Εικόνα 2.3.1: Το κάθε σώμα έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων.  $r_G^k$  η θέση ενός τυχαίου σημείου του σώματος σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων  $O_G x_G y_G z_G$  δίνεται ως εξής και  $\rho^k$  το διάνυσμα θέσης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων  $O_{xyz}$  του σώματος σε σχέση με το αδρανειακό



Εικόνα 2.3.2: Πραγματοποίηση της κινηματικής των πολλαπλών σωμάτων. Παραδείγματα ελαστικών βαθμών ελευθερίας  $q$  (αριστερά) είτε βαθμών ελευθερίας  $q$  λόγω της ελεγχόμενης κίνησης άκαμπτου σώματος (δεξιά).



Εικόνα 2.3.3: Το κάθε σώμα (εδώ το παράδειγμα ενός πτερυγίου) χωρίζεται σε έναν αριθμό επιμέρους υπο-σωμάτων, όπου το καθένα θεωρείται ως γραμμικό στοιχείο δοκού. Κάθε υπό-σωμα έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, και δέχεται παραμορφώσεις και περιστροφές.

# 3

## *Ανεμογεννήτρια Αναφοράς DTU 10MW RWT*

Στην παρούσα εργασία η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά είναι η πρότυπη 3πτερη ανεμογεννήτρια των 10MW που αναπτύχθηκε από το Τμήμα Αιολικής Ενέργειας του Πανεπιστημίου της Κοπεγχάγης (DTU Wind Energy), εμπνευσμένη από την τεχνητή ανεμογεννήτρια αναφοράς NREL 5 MW και ονομάζεται DTU 10-MW Reference Wind Turbine (DTU 10MW RWT). Η ανεμογεννήτρια είναι εξοπλισμένη με τον βασικό τύπο ελέγχου “Basic DTU wind energy controller” με αποτέλεσμα να έχει τη δυνατότητα ρύθμισης στροφών και γωνίας βήματος που αποσκοπούν στον έλεγχο ισχύος της ανεμογεννήτριας. [3],[4]

Ακολουθούν πίνακες με τα βασικά χαρακτηριστικά της DTU 10MW RWT.

Παράμετρος	DTU 10MW RWT
Πλαίσιο Ανέμου	IEC Class 1A
Προσανατολισμός Δρομέα	Δεξιόστροφη περιστροφή - προς τα κάτω
Έλεγχος	Μεταβλητή Ταχύτητα Συλλογική Γωνία βήματος
Ταχύτητα έναρξης	4 m/s
Ταχύτητα αποκοπής	25 m/s
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	11.4 m/s
Ονομαστική ισχύς	10 MW
Αριθμός πτερυγίων	3
Διάμετρος δρομέα	178.3 m

Διάμετρος πλήμνης	5.6 m
Ύψος πλήμνης	119.0 m
Αξονικό σύστημα	Μεσαία Ταχύτητα, Κιβώτιο ταχυτήτων πολλών σταδίων
Ελάχιστη ταχύτητα δρομέα	6.0 rpm
Μέγιστη ταχύτητα δρομέα	9.6 rpm
Μέγιστη ταχύτητα γεννήτριας	480.0 rpm
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	50
Μέγιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου	90.0 m/s
Εξοχή πλήμνης	7.1 m
Γωνία κλίσης άξονα	5.0 deg
Γωνία Κώνου	-2.5 deg
Μέγιστη Καμπυλότητα πτερυγίου (prebend)	3.332 m
Μάζα δρομέα	311,127 kg
Μάζα ατράκτου	446,036 kg
Μάζα πύργου	628,442 kg

Πίνακας 3.1: Βασικοί παράμετροι της DTU 10MW

Ανύψωση του εδράνου ρύθμισης γωνίας απόκλισης πάνω από το έδαφος	119 m
Κατακόρυφη απόσταση από το έδρανο απόκλισης μέχρι τον άξονα	2.75 m
Απόσταση κατά μήκος του άξονα από το κέντρο της πλήμνης μέχρι τον άξονα απόκλισης	7.07 m
Απόσταση κατά μήκος του άξονα από το κέντρο της πλήμνης μέχρι το κεντρικό έδρανο	2.7
Μάζα πλήμνης	105,520 kg
Αδράνεια πλήμνης ως προς τον άξονα χαμηλής ταχύτητας	325,671 kgm <sup>2</sup>
Μάζα ατράκτου	446,036 kg
Αδράνεια ατράκτου ως προς τον άξονα απόκλισης	7,326,346 kgm <sup>2</sup>
Θέση κέντρου μάζας κάταντι του άξονα απόκλισης	2.687 m
Θέση κέντρου μάζας πάνω από τον άξονα απόκλισης	2.45 m

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες ατράκτου και πλήμνης

Ιδιοσυχνότητες άξονα	Ιδιοσυχνότητα [Hz]	Λογαριθμική Απόσβεση[%]	Κρίσιμη απόσβεση[%]
Ελεύθερο-Ελεύθερο εύκαμπτο	1.803	5.614	0.894
Ελεύθερο-Ελεύθερο άκαμπτο	4.003	31.455	5.000

Ελεύθερο-Ελεύθερο εύκαμπτο	0.502	3.013	0.480
Ελεύθερο-Ελεύθερο άκαμπτο	0.612	4.762	0.758

Πίνακας 3.3: Ιδιοσυχνότητα για τη στρέψη

Ονομαστική ταχύτητα δρομέα	9.6 rpm
Ονομαστική ταχύτητα γεννήτριας	480 rpm
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	50 : 1
Απόδοση ηλεκτρικής γεννήτριας	94
Αδράνεια γεννήτριας ως προς τον άξονα υψηλής ταχύτητας	1500.5 kgm <sup>2</sup>
Ισοδύναμη σταθερά στρεπτικού ελατηρίου άξονα	2,317,025,352 Nm/rad
Ισοδύναμη σταθερά απόσβεσης άξονα	9,240,560 Nm/(rad/s)

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες αξονικού συστήματος

Λειτουργία	Ιδιοσυχνότητα[Hz]	Λογαριθμική απόσβεση[%]
1η Λειτουργία πτερυγίου	0.61	3.0
1η Λειτουργία ακμής	0.93	3.0
2η Λειτουργία πτερυγίου	1.74	8.4
2η Λειτουργία ακμής	2.76	8.9
3η Λειτουργία πτερυγίου	3.57	17.0
1η Λειτουργία περιστροφής	5.69	20.8
4η Λειτουργία πτερυγίου	6.11	26.4
3η Λειτουργία ακμής	6.66	5.0

Πίνακας 3.5: Ιδιοσυχνότητα του απομονωμένου πτερυγίου

Λειτουργία	Ιδιοσυχνότητα[Hz]	Λογαριθμική απόσβεση[%]
1 <sup>η</sup> πλευρική πύργου	0.25	1.9
1 <sup>η</sup> άξονα (ελεύθερο-σταθερό άκρο)	0.50	3.1
1 <sup>η</sup> ασύμμετρη πτερύγισης/ απόκλισης	0.55	2.3
1 <sup>η</sup> ασύμμετρη πτερύγισης/ κλίσης	0.59	2.8
1 <sup>η</sup> συμμετρική πτερύγισης	0.63	3.1
1 <sup>η</sup> ασύμμετρη περιστροφής/ οριζόντια	0.92	2.9
1 <sup>η</sup> ασύμμετρη περιστροφής/ κατακόρυφη	0.94	3.0
2 <sup>η</sup> ασύμμετρη πτερύγισης/ απόκλισης	1.38	4.8
2 <sup>η</sup> ασύμμετρη πτερύγισης/ κλίσης	1.55	6.1

κλίσης		
--------	--	--

Πίνακας 3.6 Ιδιοσυχνότητα όλης της ανεμογεννήτριας

# 4

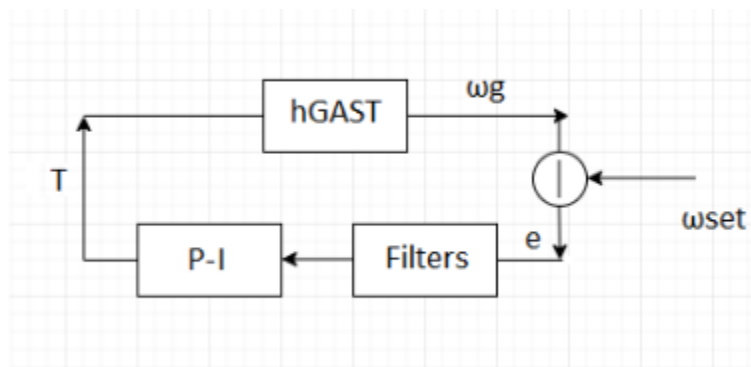
## *Βασικός Έλεγχος*

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται ο βασικός έλεγχος της ανεμογεννήτριας, ο οποίος λειτουργεί ως εξής: [4],[5].

### *4.1 Μεταβλητές στροφές*

Στο διάστημα των μεταβλητών στροφών, η ρύθμιση της ταχύτητας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός ελεγκτή PI (αναλογικός και ολοκληρωτικός) που έχει ως είσοδο το σφάλμα ταχύτητας και έτσι εξάγει την απαίτηση ροπής για τον μηδενισμό του σφάλματος.

Η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα, χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια και έναν κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας ικανό να παρέχει οποιοδήποτε απαιτούμενο επίπεδο ροπής (εντός ορίων) στο κενό αέρος της γεννήτριας. Αυτός ο έλεγχος ροπής έχει ένα υψηλό εύρος ζώνης, οπότε η απαιτούμενη ροπή επιτυγχάνεται στο κενό αέρα με μόνο μία σύντομη καθυστέρηση. Με τον έλεγχο αυτής της ροπής, η ταχύτητα του δρομέα μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο. Έτσι σε χαμηλούς ανέμους η ταχύτητα ρυθμίζεται έτσι ώστε να διατηρεί τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση, μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της σταθερής κατάστασης. Στη συνέχεια, η ροπή ελέγχεται για να διατηρηθεί η ταχύτητα σταθερή στην μέγιστη αυτή τιμή, μέχρι να επιτευχθεί η ονομαστική ροπή και η ισχύς στην ονομαστική ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 4.1.1 Διάγραμμα βασικού ελέγχου στο διάστημα μεταβλητών στροφών

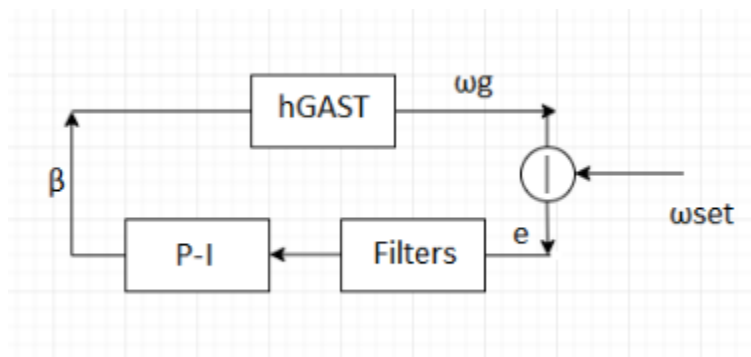
## 4.2 Σταθερές στροφές

Στο διάστημα των σταθερών στροφών η ονομαστική ροπή και ισχύς έχουν επιτευχθεί και διατηρούνται σταθερές. Στο σημείο αυτό αναλαμβάνει ο συλλογικός έλεγχος γωνίας βήματος περυγίου τη ρύθμιση της γωνιακής ταχύτητας. Στην περιοχή αυτή ένας ελεγκτής PI έχει σχεδιαστεί για να ρυθμίζει τη γωνία βήματος για τη διατήρηση της γωνιακής ταχύτητας, έχει πάλι δηλαδή ως είσοδο το σφάλμα της ταχύτητας και εξάγει την ανάλογη γωνία βήματος.

.Το gain schedule του ελεγκτή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_s = \frac{1}{\left(1 + \frac{pitchLP}{198,32} + \frac{pitchLP^2}{693,22}\right)} \quad (4.1)$$

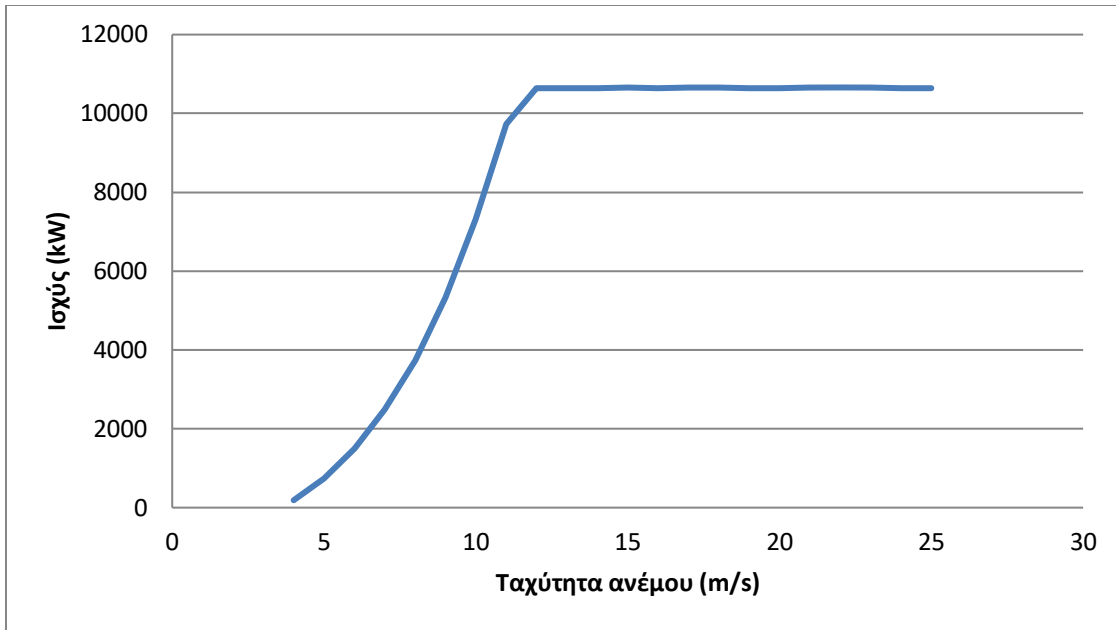
Όπου pitchLP είναι η τιμή της γωνίας βήματος μετά την εφαρμογή ενός φίλτρου lowpass.



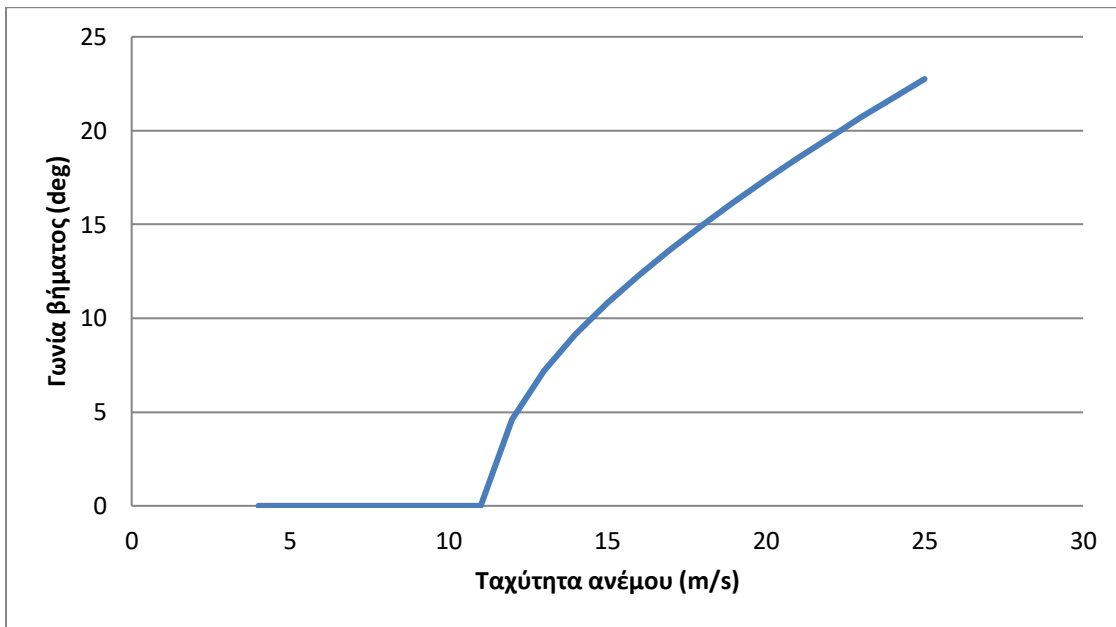
Εικόνα 4.2.1: Διάγραμμα βασικού ελέγχου στο διάστημα σταθερών στροφών

Τα διαγράμματα της ισχύς-ταχύτητας ανέμου, γωνίας βήματος-ταχύτητας ανέμου και ταχύτητας δρομέα-ταχύτητας ανέμου που αφορούν την ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται παρακάτω:

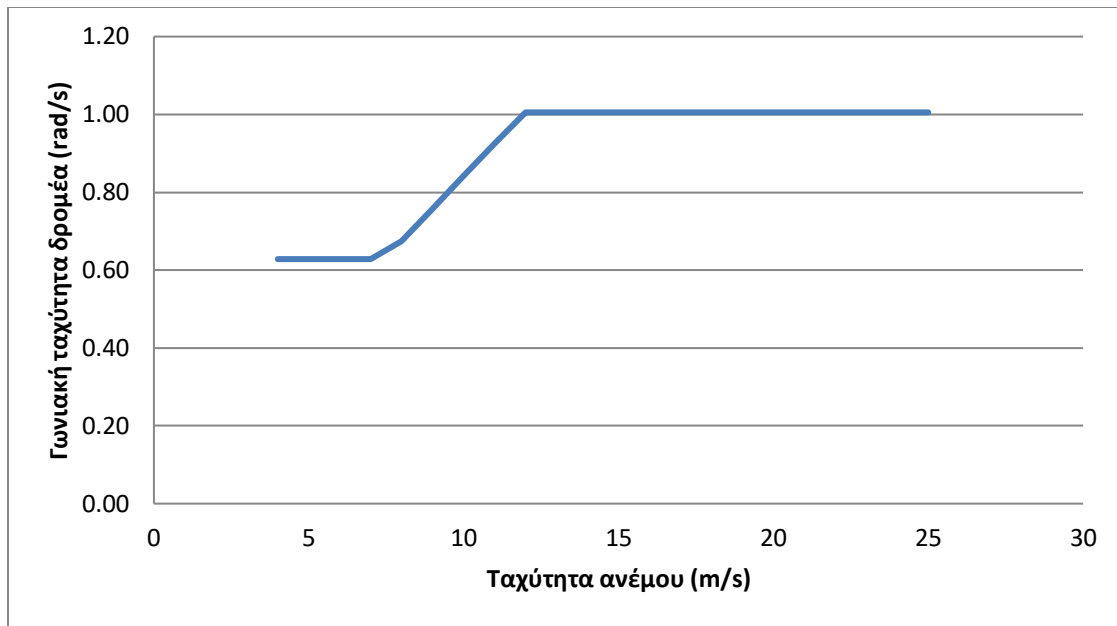




Διάγραμμα 4.2.1: Καμπύλη ισχύς-ταχύτητας ανέμου



Διάγραμμα 4.2.2: Καμπύλη γωνίας βήματος-ταχύτητας ανέμου



Διάγραμμα 4.2.3: Καμπύλη γωνιακής ταχύτητας δρομέα -ταχύτητας ανέμου

# 5

## *Έλεγχος φορτίων*

Εκτός από το βασικό έλεγχο το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας εφαρμόζει τον έλεγχο φορτίων που όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, αποσκοπεί στη μείωση των φορτίων κόπωσης (εναλλασσόμενα φορτία) της με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο χρόνος ζωής της ανεμογεννήτριας και συνεπώς να μειωθεί το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτήν. [1],[6],[7]

### *5.1 Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος (Individual Pitch*

#### *Control – IPC)*

Ο Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος (IPC) είναι μία μέθοδος, στην οποία κάθε πτερύγιο έχει τη δικιά του ξεχωριστή γωνία βήματος. Αυτό είναι εφικτό όταν κάθε πτερύγιο έχει ανεξάρτητο επενεργητή βήματος, κάτι το οποίο συνηθίζεται σε σύγχρονες ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος, χωρίς λοιπόν να αποτελεί επιπλέον κόστος η εφαρμογή αυτού του είδους ελέγχου.

Ο Συλλογικός Έλεγχος Βήματος (Collective Pitch Control – CPC) χρησιμοποιείται για ρύθμιση στροφών και ισχύος και κατά τη χρήση του, η γωνία βήματος καθορίζεται από έναν κεντρικό ελεγκτή και είναι η ίδια για όλα τα πτερύγια. Ο Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος υπερτίθεται στο Συλλογικό Έλεγχο Βήματος και χρησιμοποιείται για μείωση των φορτίων κόπωσης (εναλλασσόμενων φορτίων).

Τα εν λόγω εναλλασσόμενα φορτία εμφανίζονται για τους παρακάτω λόγους:

Όταν το ανάντη πεδίο ανέμου στην επιφάνεια του δρομέα δεν είναι ομοιόμορφο, τότε προκύπτουν εναλλασσόμενα φορτία με συχνότητα τη συχνότητα περιστροφής (1p) στα πτερύγια, στην περίπτωση μας 0,16Hz (για ανεμογεννήτρια με ταχύτητα περιστροφής 9,6 rpm), καθώς και με τις υπόλοιπες αρμονικές συχνότητες (υψηλότερης τάξης) 2p,3p αλλά η 1p είναι αυτή που κυριαρχεί και γι αυτό είναι και η πιο ευκρινής.

Η στοχαστικότητα του ανέμου λόγω τύρβης, η συνεκτικότητα του αέρα στην κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση, η λειτουργία με άνεμο σε απόκλιση τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη κατεύθυνση, η κλίση του άξονα, οι ριπές (απότομες αλλαγές) του ανέμου, η επίδραση του πύργου στην ταχύτητα που βλέπουν τα πτερύγια, η βαρύτητα και άλλοι, λιγότερο σημαντικοί, παράμετροι επηρεάζουν το πλάτος των αρμονικών στη φόρτιση.

Κατανοώντας τη φύση των εν λόγω φορτίων προκύπτει και ο τρόπος αντιμετώπισής τους. Το γεγονός ότι το σήμα των φορτίων έχει συχνότητες τις αρμονικές της συχνότητας περιστροφής σημαίνει ότι μπορεί πολύ εύκολα να γραφτεί μέσω του μετασχηματισμού Fourier ως άπειρο άθροισμα συνημίτονων:

$$Mflap = \sum_{n=0}^{\infty} Cn \cos(n \cdot \psi + \varphi n) \quad (5.1.1)$$

$n = 1$  για συχνότητα 1P,  $n = 2$  για συχνότητα 2P και ούτω καθεξής  
 $Cn$  είναι το πλάτος κάθε αρμονικής και  $\varphi n$  η φάση της  
 $\psi$  είναι η αζιμουθιακή γωνία κάθε πτερυγίου. Συγκεκριμένα στην περίπτωση μας για ανεμογεννήτρια με 3 πτερύγια:

$$\psi_i = \Omega t + (i - 1) \frac{2\pi}{3} \quad (5.1.2)$$

$\Omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας,  $t$  ο χρόνος προσομοίωσης.

Η συμπεριφορά των φορτίων αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ακύρωση αυτών των συνημιτονοειδών φορτίων μπορεί να γίνει μέσω της συνημιτονοειδούς κίνησης ολόκληρου του πτερυγίου, με τον IPC έλεγχο ή ενός μεταπτερυγίου καμπυλότητας στη γραμμή εκφυγής δηλαδή τον IFC έλεγχου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση. Η γενική ιδέα δηλαδή είναι ότι η συνημιτονοειδής κίνηση της εκάστοτε επιφάνειας ελέγχου θα επιφέρει ένα συνημιτονοειδές φορτίο ελέγχου.

$$\beta_f \text{ ή } \beta_p = \sum_{n=1}^{\infty} An \cos(n \cdot \psi + \Delta\psi n) \quad (5.1.3)$$

Αντίστοιχα το  $An$  αντιστοιχεί στο πλάτος κίνησης για κάθε αρμονική συνιστώσα, και το  $\Delta\psi n$  στην φάση της.

Με σωστή ρύθμιση του πλάτους κίνησης  $A_n$  και της διόρθωσης φάσης, το φορτίο ελέγχου μπορεί να επιφέρει ακόμα και πλήρη ακύρωση της συχνότητας  $1p$  του εναλλασσόμενου φορτίου.

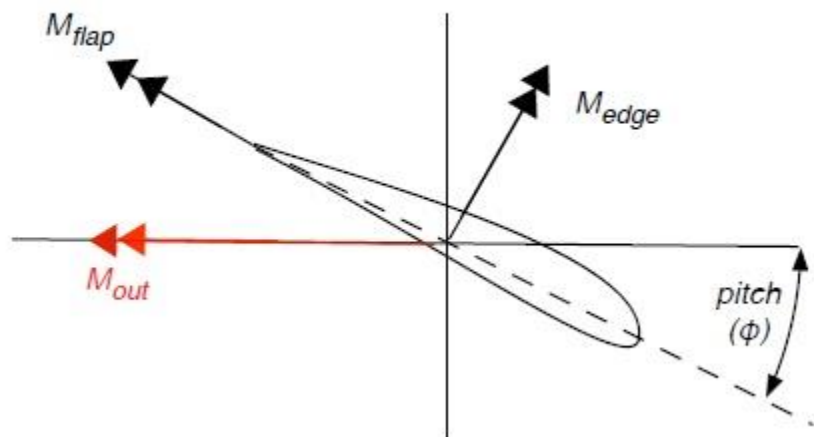
Ακολουθώντας αντίστοιχη λογική μπορεί να γίνει και η απόσβεση της  $2p$  συχνότητας και έτσι το εναπομείναν φορτίο κόπωσης που θα υποστεί η ανεμογεννήτρια να είναι ακόμη πιο μικρό, στόχος με την οποίο ασχοληθήκαμε κατά κύριο λόγο στην παρούσα εργασία. Η προσπάθεια για απόσβεση των αρμονικών ακόμη υψηλότερης τάξης που θεωρητικά θα μείωνε ακόμη περισσότερο τα φορτία κόπωσης, αναγκάζει τους μηχανισμούς ελέγχου να κινούνται με ιδιαίτερα υψηλή συχνότητα, με αποτέλεσμα να διεγείρουν τα φτερά και τελικά τα φορτία κόπωσης που προκύπτουν να μεγαλώνουν.

Ο Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος (IPC) βασίζεται στη μέτρηση των καμπτικών ροπών πτερύγισης ( $M_{flap}$ ) και περιστροφής ( $M_{edge}$ ) στη ρίζα των πτερυγίων, η οποία συνήθως γίνεται μέσω επιμηκυνσιόμετρων. Κύριος στόχος αυτής της μορφή ελέγχου είναι να μειώσει και ιδανικά να μηδενίσει το εύρος εναλλαγής των φορτίων κόπωσης. Η καμπτική ροπή πτερύγισης είναι αυτή που κυριαρχεί αλλά και η καμπτική ροπή περιστροφής μπορεί να πάρει σημαντικές τιμές. Ο IPC όμως δεν μπορεί να ελέγξει το εύρος των  $edge$  φορτίων που κυριαρχούνται από το βάρος.

Όσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει, ο Συλλογικός Ελεγκτής Βήματος ενεργοποιείται. Οι καμπτικές ροπές πτερύγισης και περιστροφής αρχίζουν να εναλλάσσονται. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα, οι καμπτικές ροπές πτερύγισης και περιστροφής δε χρησιμοποιούνται αυτούσιες, αλλά μετασχηματίζονται στην καμπτική ροπή εκτός του επίπεδου περιστροφής ( $M_{out}$ ),

$$M_{out,i} = M_{flap,i} \cos \rho_i - M_{edge,i} \sin \rho_i \quad (5.1.4)$$

ο δείκτης  $i$  αναφέρεται σε κάθε ένα από τα 3 πτερύγια ( $i = 1-3$ )

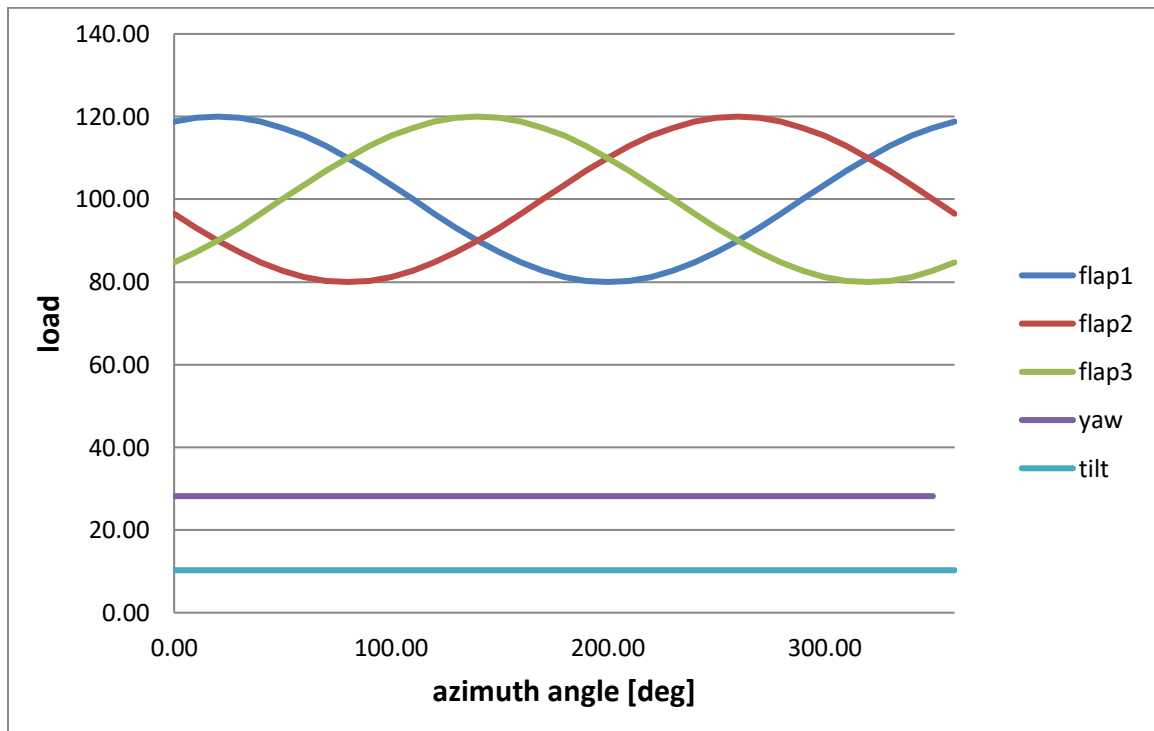


Εικόνα 5.1.1: Μετασχηματισμός  $M_{flap}$  και  $M_{edge}$  στην  $M_{out}$

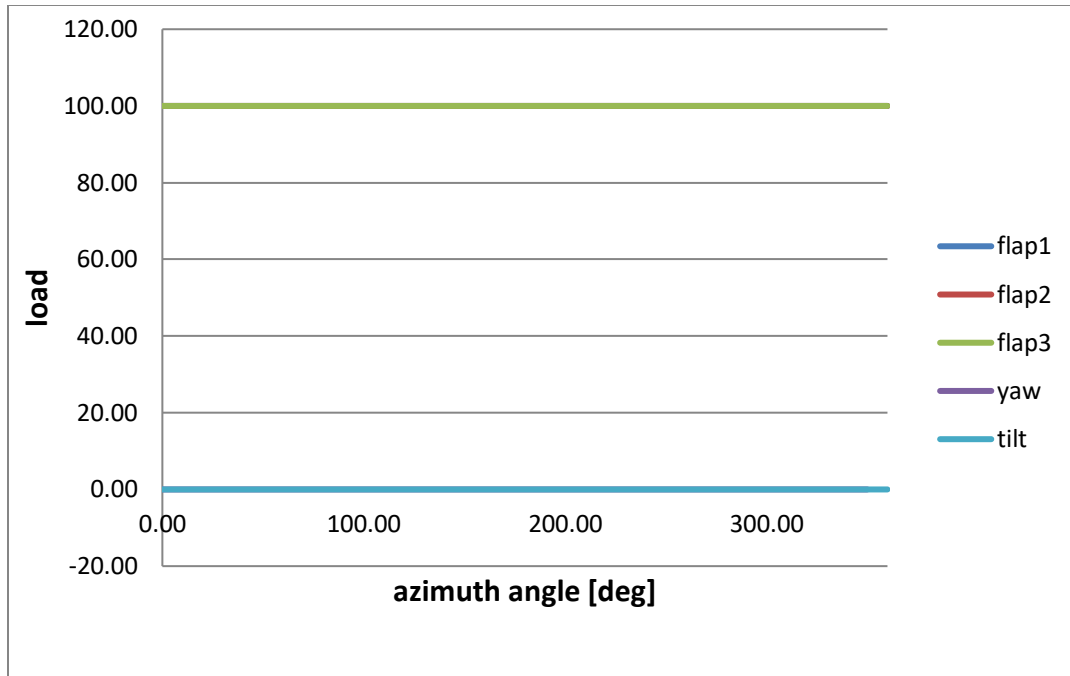
Πραγματοποιείται δηλαδή μια στροφή του μητρώου φόρτισης από το τοπικό σύστημα περιστροφής του κάθε πτερυγίου στο σύστημα περιστροφής του δίσκου. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια επιπλέον στροφή του μητρώου φόρτισης από το σύστημα περιστροφής του δίσκου στο μη στρεφόμενο σύστημα του δίσκου. Έτσι, από τις  $M_{out}$  των τριών πτερυγίων υπολογίζουμε τις ροπές στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση ( $M_{tilt}$  και  $M_{yaw}$ ), όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.1.5.

Ο λόγος που πραγματοποιούμε τον παραπάνω μετασχηματισμό είναι ότι το μέγεθος των ροπών στο μη στρεφόμενο σύστημα του δρομέα είναι ένα μέτρο της ασυμμετρίας του ανάντη πεδίου του ανέμου στην επιφάνεια του δρομέα. Η τιμή των ροπών  $M_{tilt}$  και  $M_{yaw}$  και είναι ανάλογες του εύρους εναλλαγής των καμπτικών ροπών των πτερυγίων  $M_{flap}$  και  $M_{edge}$ . Το εύρος εναλλαγής των καμπτικών ροπών των πτερυγίων προκύπτει από αζιμουθιακές ασυμμετρίες, όπως η συνεκτικότητα του αέρα στην κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση, η λειτουργία με άνεμο σε απόκλιση τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη κατεύθυνση και άλλα.

Γι αυτό το λόγο, στόχος του ελεγκτή στον Εξατομικευμένο Έλεγχο Βήματος (IPC) είναι η μείωση (ιδανικά μηδενισμός) των  $M_{tilt}$  και  $M_{yaw}$  καθώς ανάλογα μειώνονται τα εύρη εναλλαγής των καμπτικών ροπών στις ρίζες των πτερυγίων.

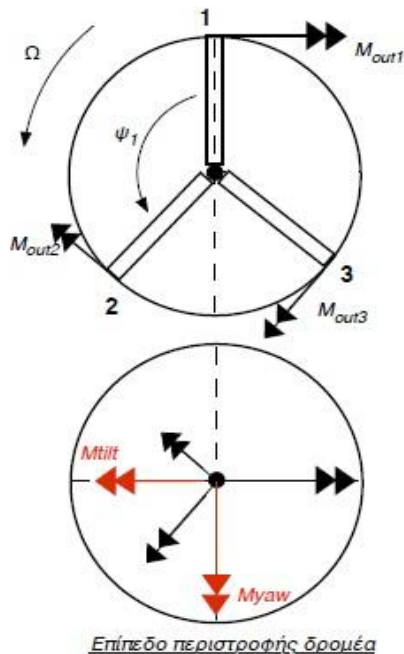


Διάγραμμα 5.1.1 : Καμπτικές ροπές πτερίγυσης ( $M_{flap}$ ) όταν οι ροπές στο μη στρεφόμενο σύστημα ( $M_{tilt}$ ,  $M_{yaw}$ ) είναι μη μηδενικές



Διάγραμμα 5.1.2: Καμπτικές ροπές πτερύγισης (Mflap) όταν οι ροπές στο μη στρεφόμενο σύστημα (Mtilt, Myaw) είναι μηδενικές

$$\begin{Bmatrix} M_{tilt} \\ M_{yaw} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2 \cos \psi_1}{3} & \frac{2 \cos \psi_2}{3} & \frac{2 \cos \psi_3}{3} \\ \frac{2 \sin \psi_1}{3} & \frac{2 \sin \psi_2}{3} & \frac{2 \sin \psi_3}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{out1} \\ M_{out2} \\ M_{out3} \end{Bmatrix} \quad (5.1.5)$$



Εικόνα 5.1.2: Μετασχηματισμός των Mout σε Mtilt και Myaw

Η ανωτέρω διαδικασία είναι γνωστή στη βιβλιογραφία σαν Μετασχηματισμός Coleman (Coleman Transformation). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι για τον ορθό υπολογισμό των  $M_{tilt}$  και  $M_{yaw}$ , απαιτείται και η γνώση της ροπής περιστροφής του κάθε πτερυγίου ( $M_{pitch}$ ), ωστόσο επειδή οι μέθοδοι αυτοί στοχεύουν στη μείωση των καμπτικών ροπών των πτερυγίων ( $M_{flap}$  και  $M_{edge}$ ) και όχι της ροπής περιστροφής  $M_{pitch}$ , η χρήση της κατά την υλοποίηση του Μετασχηματισμού Coleman (Coleman Transformation) παραλείπεται.

Κατόπιν, οι ροπές στο μη στρεφόμενο σύστημα του δίσκου  $M_{tilt}$  και  $M_{yaw}$  φιλτράρονται, ώστε το σήμα τους να απαλλαχτεί από τις αρμονικές υψηλής τάξης και πάνω. Γι αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται με τη σειρά δύο ζωνοαποκοπτικά φίλτρα με κεντρικές συχνότητες αποκοπής 3p και 6p.

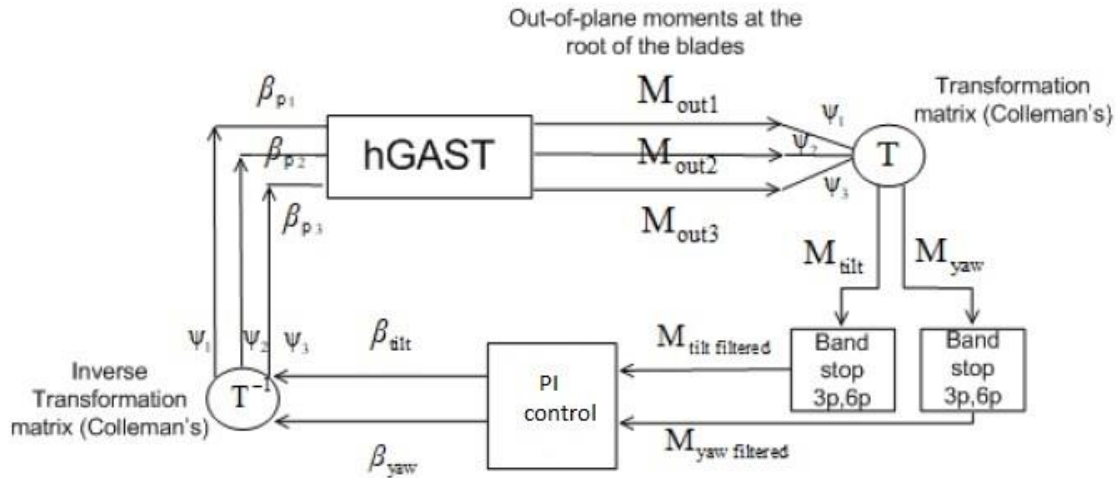
Συνεπώς σαν είσοδος του ελεγκτή (σφάλμα προς μηδενισμό) επιλέγονται οι στιγμιαίες τιμές των  $M_{tilt}$  και  $M_{yaw}$ . Η έξοδος του ελεγκτή είναι δύο γωνίες στο μη περιστρεφόμενο σύστημα του δρομέα, η  $\theta_{tilt}$  και η  $\theta_{yaw}$  αντίστοιχα, οι οποίες λέγονται Κυκλικές Γωνίες (Cyclic Angles). Οι δύο αυτές γωνίες μετασχηματίζονται σε μία γωνία διόρθωσης βήματος στο τοπικό στρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων του κάθε πτερυγίου. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία σαν Αντίστροφος Μετασχηματισμός Coleman (Inverse Coleman Transformation).

$$\beta_{pi} \text{ ή } \beta_{fi} = \theta_{tilt} \cos \psi_i + \theta_{yaw} \sin \psi_i \quad (5.1.8)$$

Μετά από μία μικρή χρονική καθυστέρηση, λόγω της αδράνειας των επενεργητών, αυτή η γωνία θα υπερτεθεί στην τρέχουσα γωνία βήματος του κάθε πτερυγίου. Η όλη διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 5.1.3. Οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες μεθόδους ελέγχου είναι οι κλασικοί Αναλογικοί Ολοκληρωτικοί (Proportional Integral – PI), οι οποίοι είναι και οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι ελεγκτών για βιομηχανικές εφαρμογές. Η λειτουργία του ελεγκτή διέπεται από την Εξίσωση 5.1.9. Ο αναλογικός όρος είναι υπεύθυνος για την απόσβεση των φορτίων με βάση την τρέχουσα στιγμιαία τιμή του σφάλματος και, ενώ ο ολοκληρωτικός όρος είναι υπεύθυνος για το συσσωρευμένο σφάλμα όλων των περασμένων χρονικών βημάτων. Ο διαφορικός όρος ρυθμίζει την έξοδο του ελεγκτή κάνοντας μια πρόβλεψη του σφάλματος των επόμενων βημάτων, αλλά επειδή έχει την τάση να χαλαρεί την ευστάθεια του συστήματος, στη συγκεκριμένη εργασία τέθηκε ίσος με μηδέν.

$$y = K_p u + K_I \int_0^t u dt \quad (5.1.9)$$





Εικόνα 5.1.3: Διαδικασία IPC ελέγχου

Η επιλογή των κερδών του ελεγκτή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιφέρει μείωση του ισοδύναμου φορτίου DEL και η διαδικασία με την οποία επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

Οι προσομοιώσεις γίνονται για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, καθώς οι μηχανισμοί βήματος δε λειτουργούν όταν η ταχύτητα ανέμου είναι μικρότερη της ονομαστικής, γιατί καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας.

Η ονομαστική ταχύτητα της DTU 10MW RWT είναι 11,4 m/s επομένως ο Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος (IPC) θα εφαρμοστεί σε ταχύτητες ανέμου από 12 m/s και πάνω.

## 5.2 Εξατομικευμένος Έλεγχος γωνίας Μεταπτερυγίων

### Καμπυλότητας (Individual Flap Control – IFC)

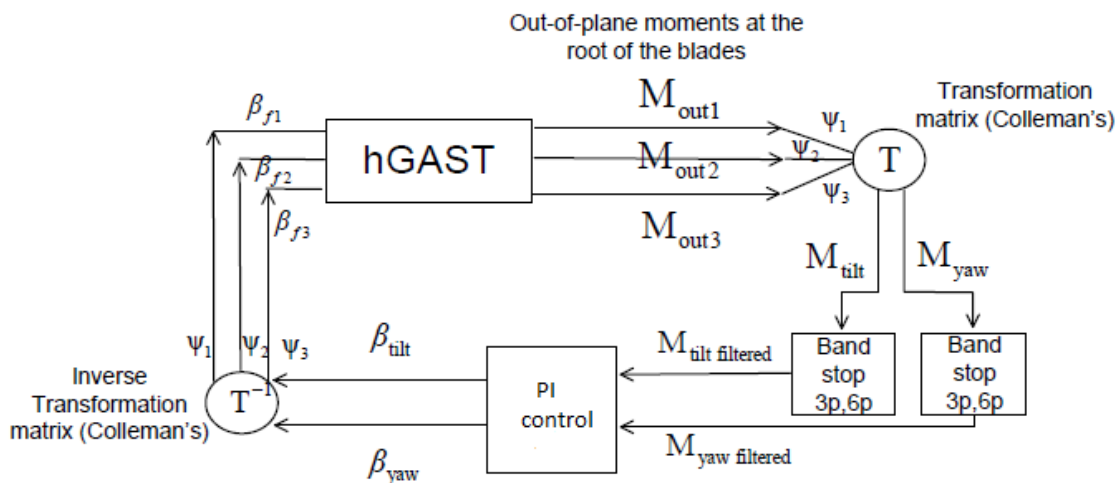
Η εκτεταμένη χρήση του μηχανισμού ελέγχου της γωνίας βήματος οδηγεί σε εκτεταμένη φθορά του μηχανισμού. Αυτός ήταν και ο λόγος που οδήγησε στην έρευνα μιας πιο εξελιγμένης μορφής ελέγχου που θα μπορούσε να υποβοηθήσει τη μέθοδο του Εξατομικευμένου Ελέγχου Βήματος (IPC) και άρα να αποφορτίσει τους μηχανισμούς αυτούς.

Συγκεκριμένα, η δυνατότητα μείωσης των φορτίων κόπωσης, που προκαλούνται στα πτερύγια από τις ανομοιομορφίες του ανάντη πεδίου του ανέμου στην επιφάνεια του δίσκου του δρομέα, μέσω μεθόδων αλλαγής της γραμμής καμπυλότητας συγκεκριμένων τομών των πτερυγίων γίνεται όλο και πιο δημοφιλής από ερευνητική άποψη τα τελευταία χρόνια. Ένας τρόπος, μεταξύ πολλών άλλων, για να υλοποιηθεί αυτή η αλλαγή καμπυλότητας είναι ο ενεργητικός έλεγχος τμημάτων κοντά στη Γραμμή Εκφυγής (Trailing Edge) των πτερυγίων, όπου οι αλλαγές επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στα αεροδυναμικά φορτία (Άνωση, Αντίσταση).

Ένας τρόπος να επιτευχθούν οι αλλαγές αυτές, είναι μέσω της τοποθέτησης, κατά το εκπέτασμα των πτερυγίων, κινούμενων αεροδυναμικών επιφανειών που ονομάζονται Μεταπτερύγια Καμπυλότητας στη Γραμμή Εκφυγής (Trailing Edge Flaps – TEFs). Αυτά (TEFs), όταν συνδυάζονται με κατάλληλους επενεργητές, συνιστούν μία ολόκληρη μονάδα ελέγχου (Εξατομικευμένος Έλεγχος γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας – IFC) και είναι ικανά να υποστούν σημαντικές και γρήγορες μεταβολές στη γεωμετρία τους, με αποτέλεσμα να μπορούν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά στις αλλαγές του ανέμου και έτσι να είναι σε θέση να παρέχουν δυναμικό έλεγχο των εναλλασσόμενων φορτίων.

Η λογική κατά την υλοποίηση του Εξατομικευμένου Ελέγχου γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IFC) είναι ακριβώς η ίδια με τον Εξατομικευμένο Έλεγχο Βήματος (IPC), καθώς βασίζεται επίσης στο μετασχηματισμό της καμπτικής ροπής εκτός του επίπεδου περιστροφής (Mout), στις ροπές στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση (Mtilt και Myaw), ή αλλιώς στην εφαρμογή του Μετασχηματισμού Coleman (Coleman Transformation). Κατόπιν, οι Mtilt και Myaw φιλτράρονται και το σήμα που προκύπτει αποτελεί την είσοδο ενός ελεγκτή PI. Η έξοδος είναι δύο αντίστοιχες γωνίες  $\theta_{tilt}$  και  $\theta_{yaw}$ , οι οποίες ονομάζονται Κυκλικές Γωνίες (Cyclic Angles) και μέσω της εφαρμογής του Αντίστροφου Μετασχηματισμού Coleman (Inverse Coleman Transformation) παρέχουν τις γωνίες μεταπτερυγίων καμπυλότητας του κάθε φτερού, όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.2.1.

$$\beta_{fi} = \theta_{tilt} \cos \psi_i + \theta_{yaw} \sin \psi_i \quad (5.2.1)$$



εικόνα 5.2.1: διαδικασία IFC ελέγχου

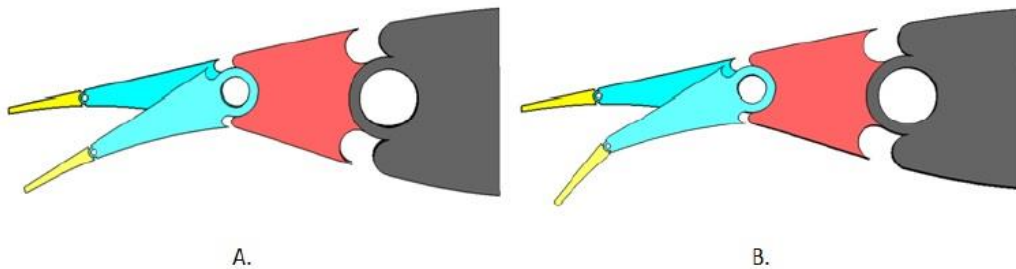
Οι δύο μέθοδοι (IPC και IFC) χρησιμοποιούν ακριβώς τα ίδια φίλτρα, δηλαδή δύο ζωνοαποκοπτικά φίλτρα με κεντρική συχνότητα αποκοπής 3Ρ και 6Ρ, στη σειρά. Και σε αυτή τη μορφή ελέγχου (IFC) ο διαφορικός όρος τίθεται ίσος με το μηδέν, ενώ ο αναλογικός όρος καθώς και ο ολοκληρωτικός πρέπει πάλι να επιλεγούν μετά από δοκιμές και συνδυάζοντας ικανοποιητική μείωση του Ισοδύναμου Φορτίου (DEL) και ευστάθεια σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας.

Οι δύο μέθοδοι ακολουθούν την ίδια λογική ελέγχου και έχουν τον ίδιο στόχο, δηλαδή τη ρύθμιση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων. Ο μεν Εξατομικευμένος

Έλεγχος Βήματος (IPC) στοχεύει στην αλλαγή της γωνίας πρόσπτωσης των πτερυγίων, ενώ ο Εξατομικευμένος Έλεγχος γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IFC) στην αλλαγή της καμπύλης του συντελεστή άνωσης. Και οι δύο επιφέρουν αυτές τις αλλαγές με βάση τις πληροφορίες που παίρνουν για τις καμπτικές ροπές στη ρίζα των πτερυγίων Mflap και Medge από ειδικούς αισθητήρες (επιμηκυνσιόμετρα). Είναι επομένως, λογικό οι δύο μέθοδοι να είναι το ίδιο αποτελεσματικοί όσον αφορά στη μείωση του Ισοδύναμου φορτίου.

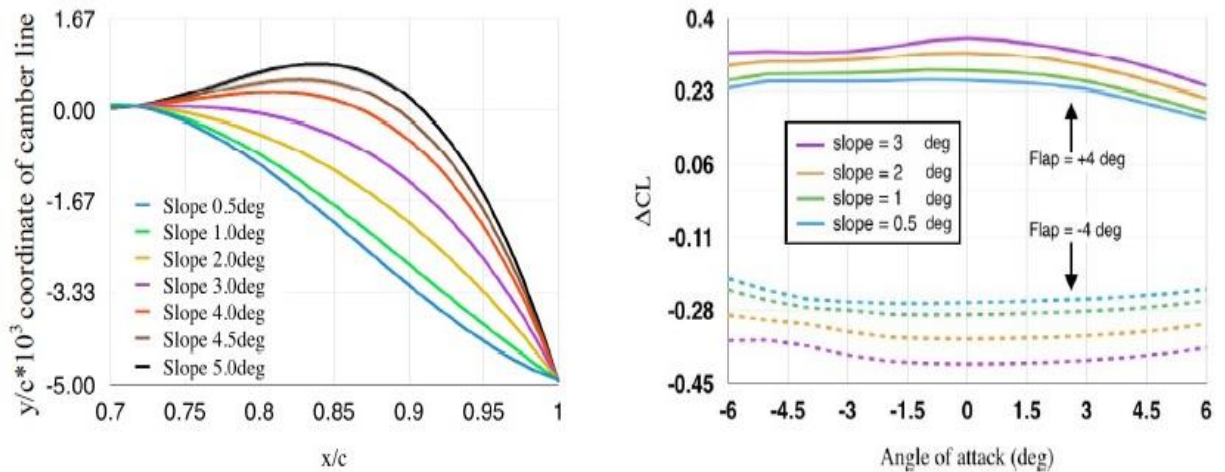
(Η μορφοποίηση της γραμμής καμπυλότητας γίνεται στο τελευταίο τμήμα των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας DTU 10MW RWT. Τα πτερύγια συντίθενται από αεροτομές της σειράς FFA-w3 και το σχετικό πάχος του εξωτερικού 35% του πτερυγίου είναι σταθερό και ίσο με  $t/c=0.24$ , ενώ πιο εσωτερικά το σχετικό πάχος αυξάνεται μέχρι την τιμή  $t/c=0.30$  στη θέση  $r/R=0.4$ .

Διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης της γραμμής καμπυλότητας στην περιοχή της γραμμής εκφυγής δοκιμάστηκαν. Όλες αφορούσαν το τελευταίο 30% της χορδής. Λόγω του μεγάλου μήκους των μεταπτερυγίων καμπυλότητας, η αλλαγή στη γραμμή καμπυλότητας μπορεί να γίνει βαθμιαία. Η αρθρωτή δομή του μεταπτερυγίου καμπυλότητας προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς κάθε μέρος μπορεί να κουνηθεί αυτόνομα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούν να επιτευχθούν και πιο σύνθετες γεωμετρίες.



Εικόνα 5.2.2: A) Ανεξάρτητη κίνηση του 30% του αρθρωτού πτερυγίου B) συνδυασμένη κίνηση του 10% και του 30% του αρθρωτού πτερυγίου

Διάφοροι σχηματισμοί διαμόρφωσης της γραμμής καμπυλότητας δοκιμάστηκαν (Εικόνα 5.2.3). Οι σχηματισμοί προσεγγίστηκαν με καμπύλες splines και αξιολογήθηκαν με βάση την αλλαγή που επιφέρει η κάθε μία στο συντελεστή άνωσης  $C_L$ .



Εικόνα 5.2.3 : Α) Διάφοροι σχηματισμοί διαμόρφωσης της γραμμής καμπυλότητας που δοκιμάστηκαν. Β) Μεταβολή του συντελεστή άνωσης σε σχέση με τη γωνία μεταπτερυγίου για τους προαναφερθείς σχηματισμούς.

Οι αεροδυναμικές επιδόσεις του κάθε σχηματισμού υπολογίστηκαν με χρήση του κώδικα FOIL2W [9] που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π. Τελικά επιλέχθηκε ο σχηματισμός με κλίση  $3^\circ$ , καθώς επιφέρει ικανοποιητική αλλαγή του συντελεστή άνωσης  $C_L$ , χωρίς ωστόσο το μεταπτερύγιο καμπυλότητας να έχει μεγάλη τιμή κλίσης, π.χ.  $5^\circ$ , η οποία θα οδηγούσε σε ταχύτερη κόπωση των επενεργητών.

Η διαμόρφωση της γραμμής καμπυλότητας στην περιοχή της ακμής εκφυγής εφαρμόζεται στο εξωτερικό μέρος, κατά την έννοια του εκπετάσματος, του πτερυγίου. Το εκπέτασμα των περιοχών που διαθέτουν μεταπτερύγια καμπυλότητας καταλαμβάνει το 22.5% του πτερυγίου, ενώ η θέση τους επιλέχθηκε με στόχο τη μεγιστοποίηση της αλλαγής που θα επιφέρει στη ροπή πτερύγισης στη ρίζα του πτερυγίου. Η αλλαγή των καμπτικών ροπών που προκαλείται στη ρίζα του πτερυγίου από τα μεταπτερύγια καμπυλότητας (για άκαμπτο πτερύγιο) μεγιστοποιείται όταν αυτά βρίσκονται μεταξύ του 67 και του 97% του πτερυγίου. Στην παρούσα εργασία, ο Εξατομικευμένος Έλεγχος γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IFC) ερευνάται σαν επικουρική μέθοδος ελέγχου στον Εξατομικευμένο Έλεγχο Βήματος (IPC).

### **5.3 Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος και γωνίας**

#### ***Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (Individual Pitch and Flap Control – IPFC)***

Όπως σημειώθηκε και πριν, σκοπός του Εξατομικευμένου Ελέγχου γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IPC) είναι να βοηθήσει τον Εξατομικευμένο Έλεγχο Βήματος (IPC), ούτως ώστε οι γωνίες βήματος, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις κατά την αλλαγή αυτών, να μην παίρνουν υπερβολικά μεγάλες τιμές. Με αυτόν τον τρόπο, οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για τις γωνίες βήματος προστατεύονται απέναντι στη φθορά, ενώ επίσης αυξάνεται η διάρκεια ζωής τους.

Έτσι, λοιπόν, ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων ελέγχου που αναφέρθηκαν πριν και ο οποίος θα λέγεται Εξατομικευμένος Έλεγχος Βήματος και γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IPFC) αναμένεται να είναι το ίδιο αποτελεσματικός, από άποψη μείωσης του Ισοδύναμου Φορτίου (DEL), καθώς και οι 3 μέθοδοι μοιράζονται την ίδια τεχνική λειτουργίας, δηλαδή τη ρύθμιση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων. Το κύριο πλεονέκτημα της συνδυασμένης μεθόδου, έναντι των άλλων δύο, δεν είναι λοιπόν η μεγαλύτερη μείωση του Ισοδύναμου Φορτίου (DEL), αλλά η διατήρηση του ίδιου επιπέδου μείωσης, επιβαρύνοντας ωστόσο πολύ λιγότερο τους μηχανισμούς ελέγχου των γωνιών βήματος και μεταπτερυγίων καμπυλότητας. Ο συνδυασμός του Εξατομικευμένου Ελέγχου Βήματος (IPC) με τον Εξατομικευμένο Έλεγχο γωνίας Μεταπτερυγίων Καμπυλότητας (IPC) είναι μία αρκετά απλή διαδικασία. Οι δύο μέθοδοι εφαρμόζονται ταυτόχρονα, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε για την κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Η μόνη διαφορά έγκειται στις τιμές των κερδών του ελεγκτή, οι οποίες πρέπει να είναι μικρότερες των αντίστοιχων απλών περιπτώσεων, ούτως ώστε το σύστημα να μην υπερδιεγερθεί. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο IPFC με τον εξής τρόπο. Για να αποκοπεί η συχνότητα 1<sup>η</sup> χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμένοι ο IPC και ο IFC, ενώ στην υψηλότερης τάξης αρμονική 2<sup>η</sup> χρησιμοποιήθηκε ο IFC. Συνεπώς ο μηχανισμός ελέγχου γωνίας βήματος έχει ασφαλώς μειωμένη δραστηριότητα αφού χρησιμοποιείται για να αποκόψει μόνο την 1<sup>η</sup> συχνότητα. Το ίδιο ισχύει και για τον μηχανισμό ελέγχου μεταπτερυγίων καμπυλότητας αφού τα κέρδη του ελεγκτή τώρα είναι μικρότερα από αυτά που χρησιμοποιούνται όταν δουλεύει μόνος του (IPC) γιατί όσο πιο μικρές είναι οι τιμές των κερδών ενός ελεγκτή, τόσο πιο χαμηλή η δραστηριότητα του αντίστοιχου μηχανισμού ελέγχου.

Οι προσομοιώσεις με τον IPFC έλεγχο θα πραγματοποιηθούν όπως και με τον IPC για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής δηλαδή σε ταχύτητες ανέμου από 12m/s και πάνω.

# 6

## *Αποτελέσματα*

### ***6.1 Αρχικές προσομοιώσεις με βασικό έλεγχο, IPC 1p, IPC 1p-2p και IPC 2p.***

Ξεκινώντας την εφαρμογή του ελέγχου φορτίων έγιναν προσομοιώσεις ενός δεκαλέπτου στην ταχύτητα ανέμου 17m/s για βασικό έλεγχο, IPC 1p, IPC 1p-2p και IPC 2p. Επιλέχθηκε αυτή η ταχύτητα διότι είναι μια μεσαία ταχύτητα (σε σχέση με την ονομαστική και την ταχύτητα αποκοπής), συνεπώς θεωρητικά αν τα αποτελέσματα των ελέγχων είναι ικανοποιητικά, θα καλύπτουν όλο το εύρος των ταχυτήτων.

Ο IPC 1p έλεγχος απέφερε μείωση του εύρους της καμπτικής ροπής πτερύγισης  $M_{flap}$  (διάγραμμα 6.6.1). Όταν όμως ενεργοποιήσαμε ταυτόχρονα τον 2p έλεγχο, με τα ίδια κέρδη που έχουν επιλεχθεί για τον 1p, παρατηρήσαμε μεγάλη αύξηση στο εύρος της  $M_{flap}$ , τόσο ως προς τον βασικό έλεγχο όσο και προς τον 1p (διάγραμμα 6.1.3). Το πρόβλημα αυτό ώθησε στο να δοκιμαστεί αν ο hGAST λειτουργεί ικανοποιητικά όταν χρειάζεται να κόψει την 2p συχνότητα ή αν εκεί εντοπίζεται το πρόβλημα, οπότε εφαρμόστηκε αυτόνομα IPC 2p έλεγχος με τα ίδια κέρδη που χρησιμοποιούνται για τον 1p. Ο έλεγχος αυτός είχε ως αποτέλεσμα μια μείωση του εύρους του φορτίου, η οποία βέβαια είναι αρκετά μικρή (διάγραμμα 6.1.5). Το αποτέλεσμα όμως είναι ικανοποιητικό καθώς όπως προαναφέρθηκε η 1p είναι η κυρίαρχη συχνότητα και αυτή που έχει τα σημαντικότερα αποτελέσματα.

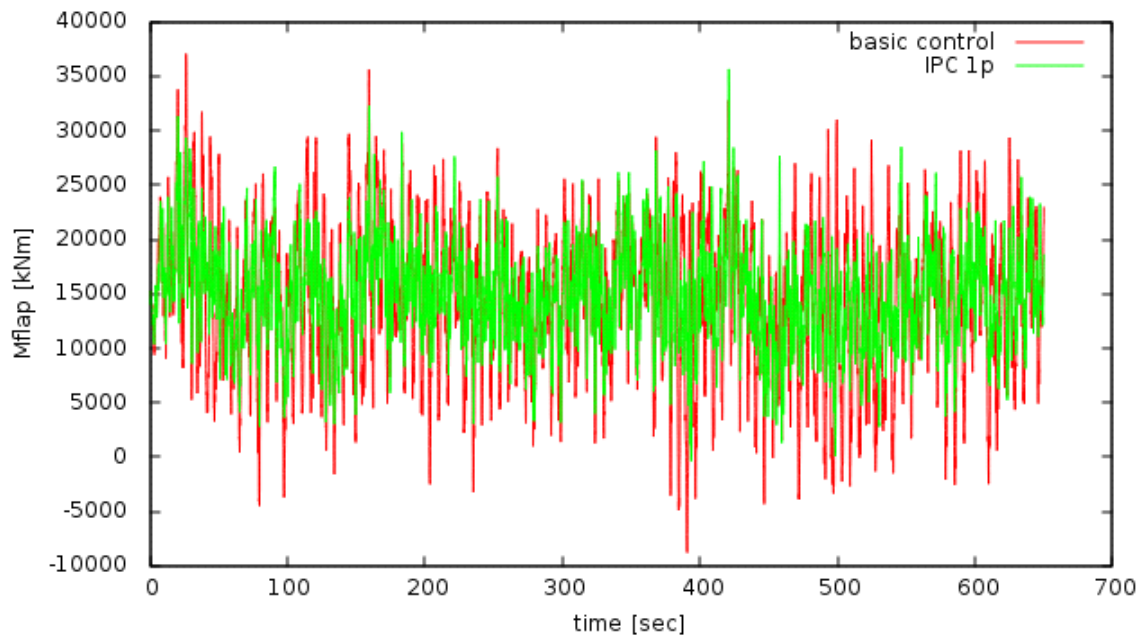
Η παραπάνω ανάλυση ακολουθείται από τα αντίστοιχα διαγράμματα της Mflap στις δεκαλέπτες προσομοιώσεις για την κάθε περίπτωση ελέγχου καθώς και τα διαγράμματα φάσματος που δείχνουν την συμπεριφορά των φορτίων στις αρμονικές συχνότητες 1p,2p.

Τα κέρδη που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους είναι και για τον 1p αλλά και τον 2p έλεγχο:

Όρος	Κέρδος ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )
Ολοκληρωτικός (ki)	$15 \cdot 10^{-10}$
Διαφορικός (kr)	$37,5 \cdot 10^{-10}$

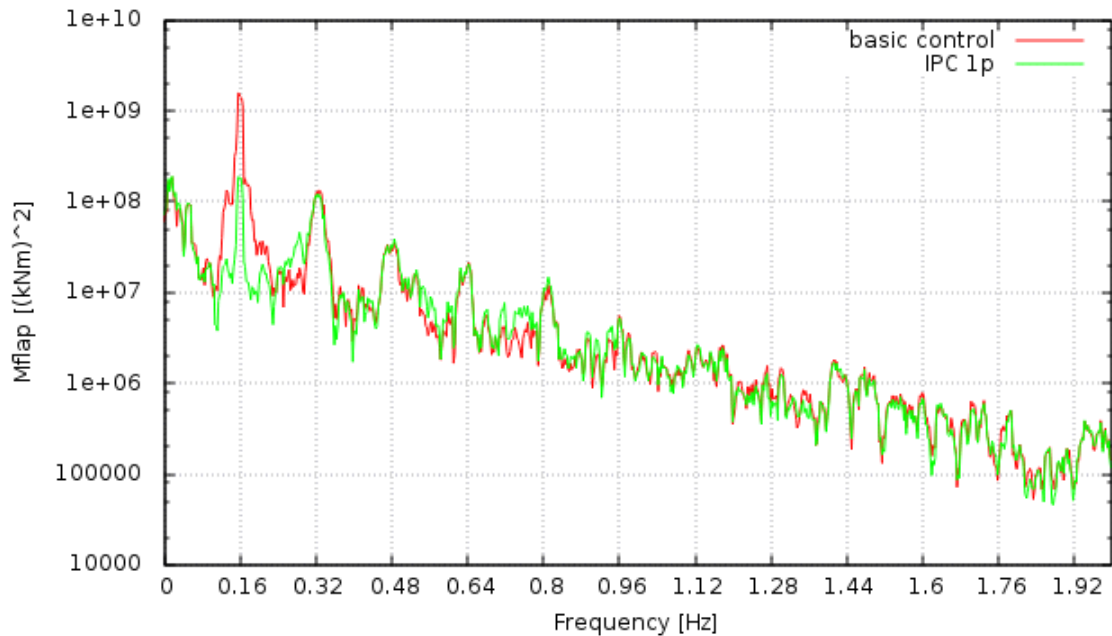
Πίνακας 6.1.1: Αρχικά κέρδη του ολοκληρωτικού και του διαφορικού όρου του ελεγκτή για IPC 1p και 2p έλεγχο

A) IPC έλεγχος στην ανεμογεννήτρια, κόβοντας την 1p συχνότητα για ταχύτητα ανέμου 17m/s.



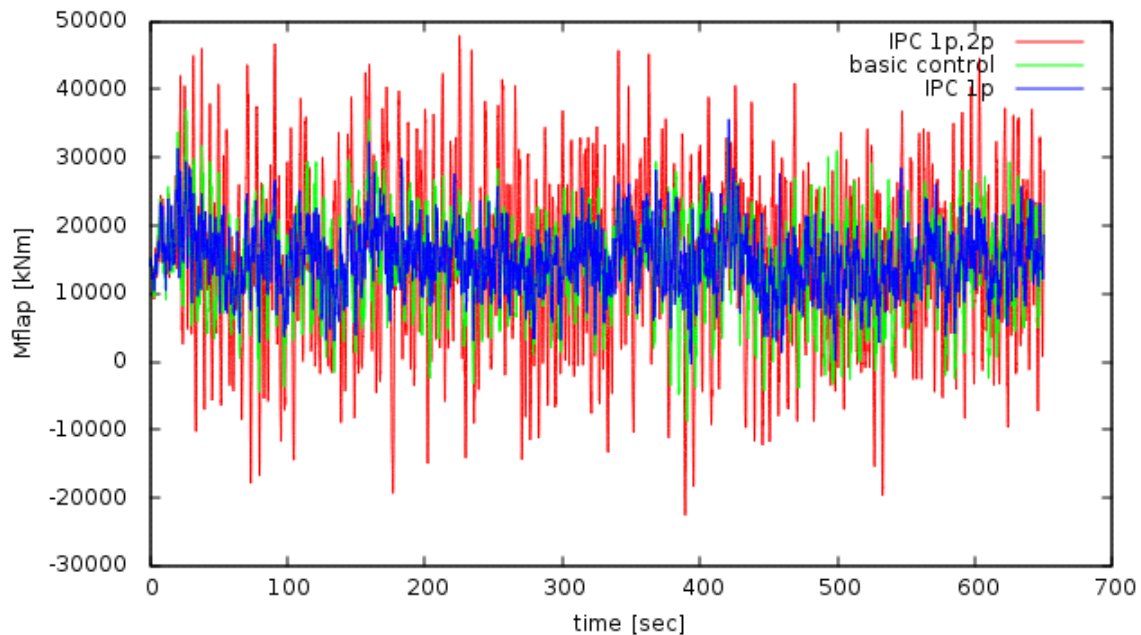
Διάγραμμα 6.1.1: Η Mflap σε μια προσομοίωση ενός δεκαλέπτου με IPC 1p έλεγχο, σε ταχύτητα ανέμου 17m/s συγκρινόμενη με την Mflap που σημειώθηκε στον βασικό έλεγχο.

Εξετάζοντας το παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μια σημαντική μείωση του εύρους της Mflap. Όπως δείχνει και το διάγραμμα φάσματος, έχει μειωθεί το μέγιστο της αρμονικής 1P:



Διάγραμμα 6.1.2: Διάγραμμα φάσματος της Mflap με βασικό και IPC 1p έλεγχο.

Β) IPC έλεγχος κόβοντας τις 1p και 2p συχνότητες για ταχύτητα ανέμου 17m/s

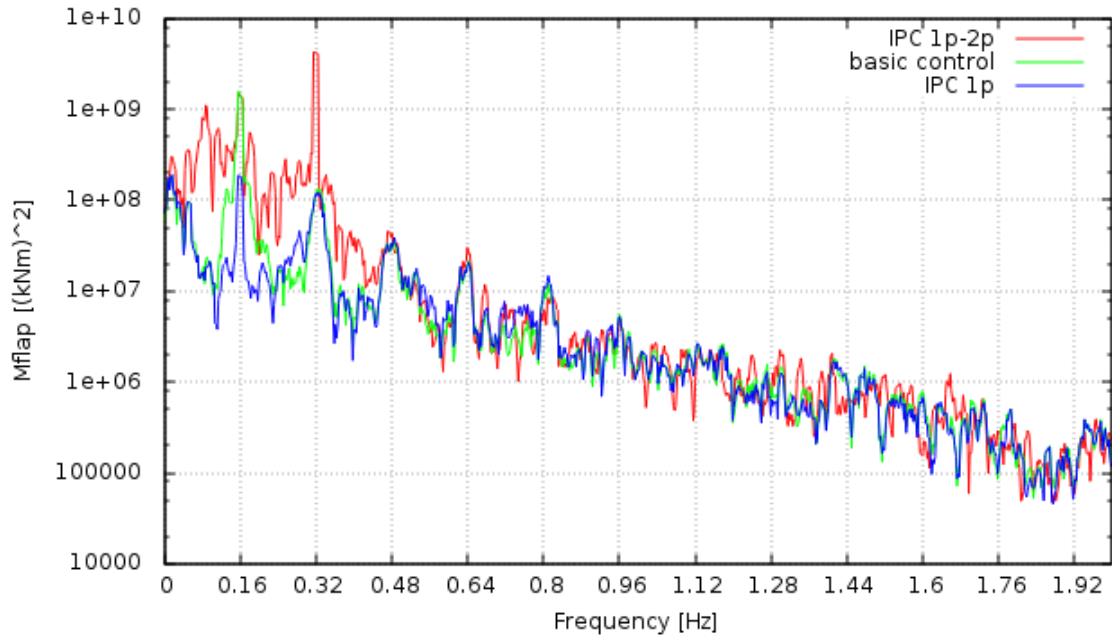


Διάγραμμα 6.1.3: Η Mflap σε προσομοίωση ενός δεκαλέπτου με IPC 1p-2p έλεγχο, σε ταχύτητα ανέμου 17m/s συγκρινόμενη με αυτή που καταγράφηκε τόσο με τον βασικό έλεγχο όσο και τον έλεγχο IPC μόνο για 1p.

Η ενεργοποίηση του ελέγχου για τη 2p συχνότητα έφερε πολύ χειρότερα αποτελέσματα και το εύρος της καμπτικής ροπής πτερύγισης αυξήθηκε αισθητά. Συγκεκριμένα

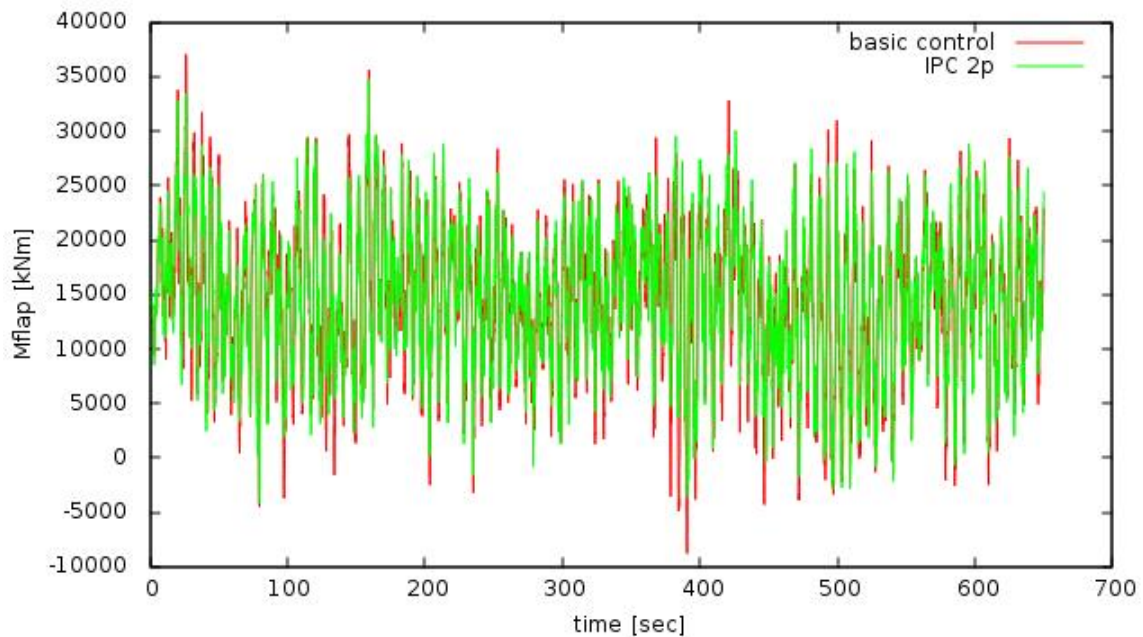


το διάγραμμα φάσματος μας δείχνει ότι το μέγιστο της αρμονικής 1P δεν μειώθηκε αλλά έμεινε ίδιο ενώ όσον αφορά το μέγιστο της 2p αυξήθηκε αισθητά:



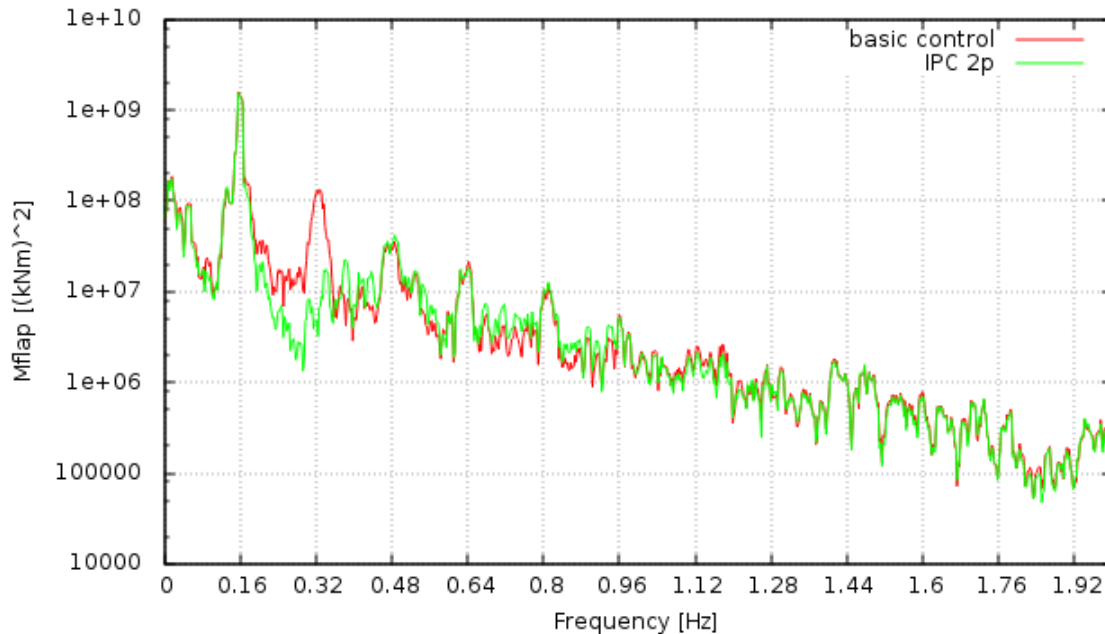
Διάγραμμα 6.1.4: διάγραμμα φάσματος της Mflap με βασικό, IPC 1p και IPC 1p-2p έλεγχο

Γ)IPC έλεγχος κόβοντας την 2p συχνότητα για ταχύτητα ανέμου 17m/s



Διάγραμμα 6.1.5: Η Mflap σε μια προσομοίωση ενός δεκαλέπτου με IPC 2p έλεγχο, σε ταχύτητα ανέμου 17m/s συγκρινόμενη με αυτήν που καταγράφηκε με τον βασικό έλεγχο.

Παρατηρείται μικρή μείωση του εύρους της  $M_{flap}$ , που είναι ικανοποιητική καθώς η  $1p$  είναι η κυρίαρχη συχνότητα με τα σημαντικότερα αποτελέσματα. Όπως δείχνει και το διάγραμμα φάσματος, το μέγιστο της αρμονικής  $2p$  έχει μειωθεί:



Διάγραμμα 6.1.6: Διάγραμμα φάσματος της  $M_{flap}$  με βασικό και IPC 2p έλεγχο

## 6.2 Βαθμονόμηση κερδών ελεγκτή

Καθώς βλέπουμε ότι ο έλεγχος IPC δουλεύει σωστά μόνο για  $1p$  και αντίστοιχα μόνο για  $2p$  συχνότητα, θεωρήσαμε ότι το πρόβλημα προέρχεται από την επιλογή των κερδών του ολοκληρωτικού και του διαφορικού όρου του ελεγκτή τόσο για την  $1p$  όσο και για τη  $2p$  συχνότητα όταν αυτές συνδυάζονται.

Λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας του συστήματος και άρα της υψηλής τάξης των μητρώων κατάστασής του, δεν υπάρχει κάποια ντετερμινιστική διαδικασία η οποία να οδηγή στις βέλτιστες τιμές των κερδών του ελεγκτή. Έτσι, ο μόνος τρόπος αυτές να καθοριστούν είναι μέσω πολλών 10λεπτων προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές των κερδών. Πρόκειται, δηλαδή, για μία διαδικασία δοκιμών μέχρι την εύρεση των τιμών των καλύτερων κερδών του ελεγκτή.

Ο τρόπος με τον οποίο θα αποφασίσουμε ποια είναι τελικά τα καλύτερα κέρδη είναι με τη μέθοδο του Ισοδύναμου φορτίου. Συνεπώς θα διαλέξουμε τα κέρδη που θα επιφέρουν τη μεγαλύτερη μείωση του Ισοδύναμου Φορτίου (Damage Equivalent Load – DEL) των καμπτικών ροπών πτερυγίσης στη ρίζα του 1ου πτερυγίου.

Πραγματοποιήθηκαν δεκάλεπτες προσομοιώσεις στην ταχύτητα ανέμου 17m/s χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα και μικρότερα κέρδη από τα αρχικά και για τους δύο ελέγχους (1p,2p). Οι τιμές τους προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των αρχικών κερδών (πίνακας 6.1.1 ) με τους παρακάτω συντελεστές στην πρώτη γραμμή και πρώτη στήλη του πίνακα 6.1.2, ο οποίος συνοψίζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζοντας τα ισοδύναμα φορτία της Mflar που προέκυψαν με τις αλλαγές των κερδών.

Κέρδη 1p/2p(x) (x)	7,5	5	1	0,75	0,5	0,25	0,01	0,075	0,05	0,025
7,5	46434	44845	50015	47153	47806	48092	48982	47320	45557	46855
5	45811	46385	49249	45661	46490	50116	47210	49656	49112	46128
1	26254	52044	44815	43330	46828	20634	20606	21194	20383	26254
0,75	50402	49781	43585	46026	18885	20433	20486	20854	20802	20958
0,5	54005	52726	53300	18687	18840	20489	20590	20993	20916	21040
0,25	51818	48843	19811	19523	20088	21537	20825	21268	21192	26254
0,01	51626	54010	20568	21114	21408	23271	21684	21893	21847	22021
0,075	53537	54458	20792	20910	21689	23645	22032	22166	22095	22295
0,05	54454	52625	53649	19822	21955	24098	20942	22567	22362	22619
0,025	52132	52921	21141	21070	22289	24689	22824	22885	22668	22965

Πίνακας 6.2.1: Ισοδύναμα φορτία (kNm) της Mflar για διάφορα κέρδη με έλεγχο IPC 1p-2p στην ταχύτητα ανέμου 17m/s

Τα ισοδύναμα φορτία της Mflar για βασικό έλεγχο καθώς και για IPC 1p, στην ταχύτητα 17m/s είναι:

- Βασικός έλεγχος: 26772 kNm
- IPC 1p: 21053 kNm

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα κάποιες δοκιμές είχαν σαν αποτέλεσμα μικρότερο ισοδύναμο φορτίο από τον βασικό έλεγχο (πορτοκαλί χρώμα) και κάποιες μικρότερο ισοδύναμο φορτίο και από τον βασικό έλεγχο αλλά και από τον IPC 1p (κίτρινο χρώμα).

Έτσι για τις περιπτώσεις που μίκρυναν το φορτίο περισσότερο και από τον έλεγχο IPC 1p εξετάστηκε τι συμβαίνει στις ροπές που εφαρμόζονται στον πύργο, δηλαδή στις Mx tower (πλευρική) και Mz tower (μπρος-πίσω) ώστε να μπορέσουμε να καταλήξουμε στα κέρδη που φέρουν συνολικά τα καλύτερα αποτελέσματα.

Τα ισοδύναμα φορτία της Mx tower:

Κέρδη 1p/2p(x) (x)	7,5	5	1	0,75	0,5	0,25	0,01	0,075	0,05	0,025
7,5										
5										

1					23695	23729		22972	
0,75				23455	23621	23721	23753	23653	23692
0,5			23299	23412	23623	24117	24137	24033	24085
0,25		23216	23447	23752		24599			
0,01		23619							
0,075		23655	23965						
0,05			23908			23198			
0,025									

Πίνακας 6.2.2: Ισοδύναμα φορτία (kNm) της Mx tower με έλεγχο IPC 1p-2p στην ταχύτητα ανέμου 17m/s για τα κέρδη που επέφεραν μείωση στα ισοδύναμα φορτία της Mflar σε σχέση με τον βασικό και IPC 1p έλεγχο.

Τα ισοδύναμα φορτία της Mx tower για βασικό έλεγχο καθώς και για IPC 1p, στην ταχύτητα 17m/s είναι:

- Βασικός έλεγχος: 25339 kNm
- IPC 1p: 23375 kNm

Ελέγχοντας τα αποτελέσματα του πίνακα παρατηρούμε ότι όλες οι δοκιμές παρουσιάζουν μικρότερο ισοδύναμο φορτίο από το αντίστοιχο του βασικού ελέγχου, ενώ αυτές με το κίτρινο χρώμα παρουσιάζουν μικρότερο ισοδύναμο φορτίο και από τον IPC 1p.

Τα ισοδύναμα φορτία της Mz tower:

Κέρδη 1p/2p(x) (x)	7,5	5	1	0,75	0,5	0,25	0,01	0,075	0,05	0,025
7,5										
5										
1						58652	60039		58808	
0,75					57564	58091	59761	59707	58502	57992
0,5				56752	56921	57629	59642	59619	58338	57738
0,25			56529	56341	56669		59660			
0,01			56171							
0,075			56094	56064						
0,05				56615			56654			
0,025										

Πίνακας 6.2.3: Ισοδύναμα φορτία (kNm) της Mz tower με έλεγχο IPC 1p-2p στην ταχύτητα ανέμου 17m/s για τα κέρδη που επέφεραν μείωση στα ισοδύναμα φορτία της Mflar σε σχέση με τον βασικό και IPC 1p έλεγχο.

Τα ισοδύναμα φορτία της Mz tower για βασικό έλεγχο καθώς και για IPC 1p, στην ταχύτητα 17m/s είναι:

- Βασικός έλεγχος: 56500 kNm
- IPC 1p: 58294 kNm

Εδώ το ισοδύναμο φορτίο που προκύπτει από τον IPC 1p έλεγχο είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του βασικού ελέγχου. Κάποιες από τις δοκιμές με τον IPC 1p-2p έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερο ισοδύναμο φορτίο από αυτό του IPC 1p, ενώ εκείνες με το κίτρινο χρώμα καταφέρνουν να το μειώσουν και κάτω από τον βασικό έλεγχο.

Για να διαλέξουμε τα βέλτιστα κέρδη ιδανικά θα θέλαμε να μειώνουν ταυτόχρονα την Mflap και την Mx tower σε σχέση με τον IPC 1p και την Mz tower σε σχέση με τον βασικό έλεγχο. Από τους παραπάνω πίνακες συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει κάποιος συνδυασμός από αυτούς που μειώνουν την Mflap που να μειώνει συγχρόνως τις Mx και Mz tower σε σχέση με τους προαναφερθείς ελέγχους.

Αποφασίζουμε να διαλέξουμε εκείνα τα κέρδη που μειώνουν την Mz tower σε σχέση με το βασικό έλεγχο καθώς αρχικά τα φορτία είναι μεγαλύτερα άρα ο πύργος υφίσταται μεγαλύτερη κόπωση εξαιτίας τους αλλά και επειδή η συμπεριφορά της Mx είναι πιο τυχαία.

Συγκεντρωμένα τα βέλτιστα κέρδη (για τους δύο όρους του ελεγκτή) για τον IPC 1p-2p έλεγχο είναι οι εξής:

	Κέρδη 1p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )	Κέρδη 2p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )
Κέρδη Α	Ki = $1,5 \cdot 10^{-10}$ Kp = $3,75 \cdot 10^{-10}$	Ki = $15 \cdot 10^{-10}$ Kp = $37,5 \cdot 10^{-10}$
Κέρδη Β	Ki = $3,75 \cdot 10^{-10}$ Kp = $9,375 \cdot 10^{-10}$	Ki = $11,25 \cdot 10^{-10}$ Kp = $28,125 \cdot 10^{-10}$
Κέρδη Γ	Ki = $1,125 \cdot 10^{-10}$ Kp = $2,8125 \cdot 10^{-10}$	Ki = $15 \cdot 10^{-10}$ Kp = $37,5 \cdot 10^{-10}$
Κέρδη Δ	Ki = $1,125 \cdot 10^{-10}$ Kp = $2,8125 \cdot 10^{-10}$	Ki = $11,25 \cdot 10^{-10}$ Kp = $28,125 \cdot 10^{-10}$

Πίνακας 6.2.4: Κέρδη για τον IPC 1p-2p έλεγχο που μειώνουν τα ισοδύναμα φορτία της Mflap και της Mz tower σε σχέση με τον βασικό και τον IPC 1p έλεγχο στην ταχύτητα ανέμου 17m/s

### 6.3 Αλλαγή φίλτρων

Το επόμενο βήμα είναι η αλλαγή στα φίλτρα που χρησιμοποιεί ο κώδικας. Ήδη το πρόβλημα για τον IPC 1p και 2p έχει λυθεί αλλά θέλουμε να δούμε αν η αλλαγή κάποιων φίλτρων επιφέρει ακόμα μεγαλύτερη μείωση των φορτίων έτσι ώστε να βρούμε τον καλύτερο συνδυασμό κερδών-φίλτρων.

Ο κώδικας χρησιμοποιεί είναι τα εξής:

- ζωνοαποκοπτικά φίλτρα με συχνότητες αποκοπής 1p,2p,3p,6p
- χαμηλοπερατό φίλτρο συχνότητας αποκοπής 10p

Ζωνοαποκοπτικά φίλτρα (bandstop) είναι εκείνα που έχουν σχεδιαστεί ώστε να εξασθενούν μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων σε πολύ χαμηλά επίπεδα αφήνοντας αφιλτράριστες τις μεγαλύτερες ή της μικρότερες από αυτήν συχνότητες. Τα φίλτρα notch είναι ζωνοαποκοπτικά φίλτρα με στενή ζώνη αποκοπής, και τέτοια χρησιμοποιούνται στον κώδικα.

Χαμηλοπερατά (lowpass) είναι τα φίλτρα τα οποία έχουν σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπουν την διέλευση των σημάτων με συχνότητα μικρότερη από την συχνότητα αποκοπής, και εξασθενίζει τα σήματα με μεγαλύτερη συχνότητα από αυτήν.

Η πρώτη αλλαγή που θα πραγματοποιήσουμε είναι να αφαιρέσουμε το lowpass 10p. Στην ουσία, το συγκεκριμένο φίλτρο επιδρά μόνο στις πολύ ψηλές συχνότητες και έτσι με την αφαίρεση του θέλουμε να ελέγξουμε κατά πόσο μεγάλη είναι η συμβολή που έχουν αυτές στο σήμα ελέγχου.

Στη συνέχεια θα αφαιρέσουμε τα notch 1p,2p. Ο λόγος που μας οδήγησε σε αυτή την αλλαγή είναι ότι μια μεταβολή 1p η 2p στα πτερύγια μεταφέρεται σαν 3p ή 6p στο ακίνητο σύστημα του δρομέα, εκτός από την περίπτωση που έχουμε ασυμμετρία στα πτερύγια, κάτι που δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Συνεπώς η αφαίρεση αυτών των φίλτρων αναμένουμε να μην έχει μεγάλη επίπτωση στα αποτελέσματα των φορτίων.

Μια επιπλέον αλλαγή που θα πραγματοποιήσουμε είναι ότι στην θέση των προηγούμενων notch φίλτρων(1p,2p) θα εφαρμόσουμε ένα notch φίλτρο με συχνότητα αποκοπής την ιδιοσυχνότητα του αξονικού συστήματος η οποία είναι 1,779hz για να ελέγξουμε αν έχει κάποια συμβολή στο σήμα ελέγχου.

Τέλος θα εφαρμόσουμε ένα φίλτρο lowpass 0,2 hz το οποίο ουσιαστικά φιλτράρει όλες τις παραπάνω συχνότητες για να δούμε αν είναι προτιμότερη αυτή η μέθοδος ή τα ξεχωριστά ζωνοαποκοπτικά φίλτρα για την κάθε μία.

Οι συγκεκριμένες αλλαγές δοκιμάστηκαν σε δεκάλεπτες προσομοιώσεις για ταχύτητα ανέμου 17m/s με ενεργοποιημένο τον έλεγχο IPC 1p-2p για τα 4 βέλτιστα κέρδη που αναφέραμε προηγουμένως (πίνακας 6.2.4). Τα ισοδύναμα φορτία (kNm) των Mflap, Mx tower, Mz tower συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Κέρδη ελεγκτή	Ροπή	Αρχικά φίλτρα	Lowpass 0,2 hz	Χωρίς Notch 1p,2p	Notch 1,779 hz	Χωρίς Lowpass 10p
Κέρδη A	Mflap	20649	147%	-1,01%	-0,21%	-1,33%
	Mx tower	23801	213%	0,25%	0,76%	-2,39%
	Mz tower	56362	278%	-0,19%	0,11%	-0,01%
Κέρδη B	Mflap	19577	2,29%	-1,54%	-1,37%	2,73%
	Mx tower	23682	10%	-0,88%	-0,10%	19,57%
	Mz	56510	1,9%	-0,50%	-0,16%	3,20%

	tower					
Κέρδη Γ	Mflap	20866	90%	-0,35%	0,53%	151,01%
	Mx tower	23907	49,28%	0,26%	0,38%	248,57%
	Mz tower	56343	121,49%	-0,23%	-0,05%	300,97%
Κέρδη Δ	Mflap	20979	7,29%	0,62%	1,28%	4,51%
	Mx tower	24176	5,54%	-1,73%	-1,50%	13,76%
	Mz tower	56285	1,00%	-0,75%	-0,65%	2,47%

Πίνακας 6.3.1: Ποσοστιαία μεταβολή ισοδύναμων φορτίων Mflap, Mx tower, Mz tower που προέκυψε μετά τις αλλαγές των φίλτρων σε σχέση με τα αρχικά, για τα επιλεγμένα κέρδη.

Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζονται όσα ισοδύναμα φορτία είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων που προέκυψαν με τα αρχικά φίλτρα, ενώ με κίτρινο παρουσιάζονται τα ισοδύναμα φορτία που είναι μικρότερα.

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η εφαρμογή του lowpass 0,2hz αύξησε όλα τα ισοδύναμα φορτία και για τις τρεις ροπές σε όλα τα κέρδη, σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα το ποσοστό της αύξησης που σημειώθηκε ήταν πολύ μεγάλο. Συνεπώς προκύπτει το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο να εφαρμόζουμε πολλά ζωνοαποκοπτικά φίλτρα σε σχέση με ένα χαμηλοπερατό που θα φιλτράρει όλες τις συχνότητες.

Η αφαίρεση του lowpass 10p είχε ως αποτέλεσμα κυρίως αυξήσεις στα ισοδύναμα φορτία με εξαίρεση τα κέρδη Α. Στις υπόλοιπες όμως περιπτώσεις παρατηρήθηκαν μεγάλες αυξήσεις οι οποίες μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι και οι μεγάλες συχνότητες έχουν συμβολή στο σήμα ελέγχου.

Η αφαίρεση των notch 1p,2p αλλά και η εφαρμογή του notch 1,779hz είχαν ως αποτέλεσμα τόσο αυξήσεις όσο και μειώσεις στα ισοδύναμα φορτία, με μικρά όμως ποσοστά. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή αυτών των φίλτρων δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το σήμα ελέγχου. Μάλιστα στην περίπτωση των κερδών Β παρατηρούνται μειώσεις στα ισοδύναμα φορτία και των τριών ροπών, οι οποίες είναι λίγο μεγαλύτερες όταν απλά αφαιρούμε τα notch 1p,2p σε σχέση με την περίπτωση που εφαρμόζουμε στη θέση τους το notch 1,779hz. Έτσι ολοκληρώσαμε την παραπάνω έρευνα που αποσκοπούσε στην επιλογή του καλύτερου συνδυασμού φίλτρων-κερδών για την ταχύτητα ανέμου 17m/s επιλέγοντας τα κέρδη Β και την αφαίρεση των notch 1p,2p.

## 6.4 IPC 1p-2p έλεγχος σε κανονική και ακραία τύρβη

Η προηγούμενη έρευνα αφορούσε την ταχύτητα ανέμου 17m/s καταλήγοντας στα βέλτιστα κέρδη και φίλτρα που επέφεραν τις μεγαλύτερες μειώσεις στα ισοδύναμα φορτία.

Στόχος μας είναι λοιπόν να τα εφαρμόσουμε σε όλες τις ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής μέχρι και την ταχύτητα αποκοπής (13-25m/s), και στις 3 πραγματοποιήσεις ανέμου (R1,R2,R3) καθώς και σε κανονική και ακραία τύρβη για να δούμε αν όντως οι παραπάνω επιλογές μπορούν να εφαρμοστούν καθολικά.

### Κανονική Τύρβη

Πραγματοποιήθηκαν δεκάλεπτες προσομοιώσεις στις ταχύτητες 13m/s - 25m/s για βασικό έλεγχο, IPC 1p και IPC 1p-2p και στις 3 πραγματοποιήσεις ανέμου ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αντίστοιχα ισοδύναμα φορτία τους.

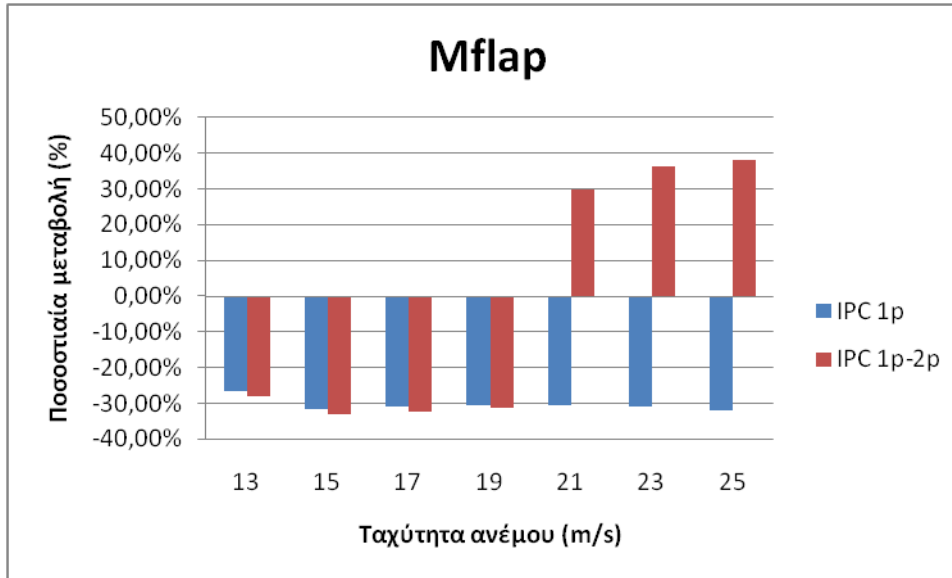
Ο πίνακας και τα διαγράμματα που ακολουθούν περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων. (Τα ισοδύναμα φορτία είναι ο μέσος όρος των 3 πραγματοποιήσεις σε κάθε περίπτωση)

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPC 1p-2p (% μεταβολή)
13	Mflap	24626	-26,73%	-28,19%
	Mx tower	13861	-6,44%	-7,44%
	Mz tower	52680	2,04%	-21,77%
15	Mflap	26547	-31,73%	-33,03%
	Mx tower	19221	-9,68%	-9,36%
	Mz tower	52877	2,62%	-2,00%
17	Mflap	28403	-30,83%	-32,56%
	Mx tower	24424	-10,32%	-10,03%
	Mz tower	58219	2,99%	-1,54%
19	Mflap	30294	-30,61%	-31,47%
	Mx tower	30620	-9,59%	-7,42%
	Mz tower	65545	3,62%	1,02%
21	Mflap	32489	-30,58%	29,71%
	Mx tower	36881	-9,46%	115,26%
	Mz tower	73785	4,09%	120,85%
23	Mflap	34956	-30,96%	36,37%
	Mx tower	43641	-9,61%	73,85%
	Mz tower	82773	5,13%	152,10%
25	Mflap	37542	-32,12%	38,11%
	Mx tower	52584	-8,30%	87,27%

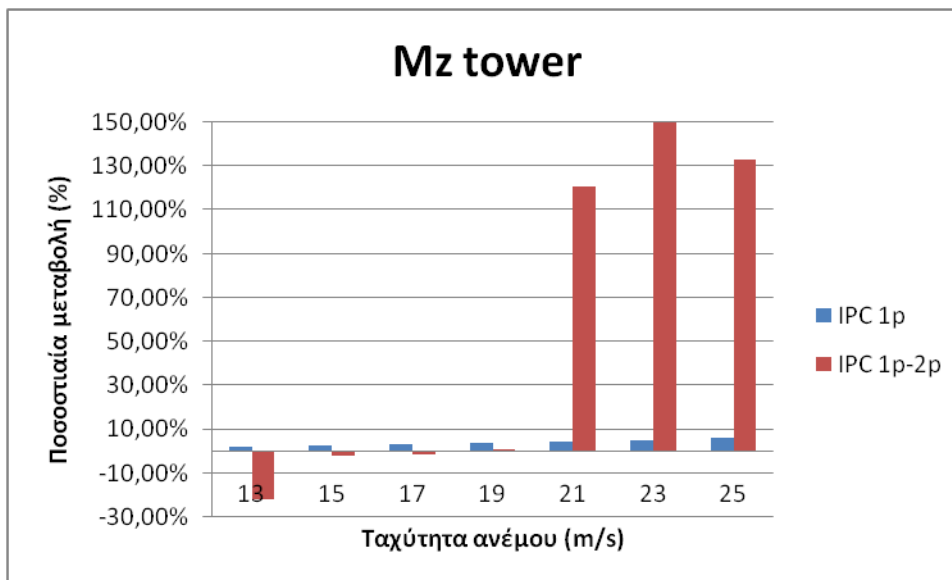


	Mz tower	94101	5,94%	133,23%
--	----------	-------	-------	---------

Πίνακας 6.4.1: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap, Mx tower, Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p κέρδη B.



Διάγραμμα 6.4.1: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B



Διάγραμμα 6.4.2: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B

Αρχική παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα είναι ότι ενώ στις μικρές ταχύτητες παρατηρούμε μειώσεις των ισοδύναμων φορτίων, ο IPC 1p-2p επιφέρει μεγάλη

αύξηση των φορτίων στις μεγάλες ταχύτητες, (21-25 m/s). Αυτό μας ώθησε στο συμπέρασμα ότι τα κέρδη που επιλέξαμε δεν μπορούν να εφαρμοστούν καθολικά. Έτσι στις μεγάλες ταχύτητες ανέμου πρέπει να επανεξεταστεί η τιμή των κερδών που θα χρησιμοποιήσουμε.

Μετά από διάφορες δοκιμές καταλήξαμε στον εξής συνδυασμό κερδών:

	Κέρδη 1p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )	Κέρδη 2p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )
Κέρδη E	$K_i = 7,5 \cdot 10^{-10}$ $K_p = 18,75 \cdot 10^{-10}$	$K_i = 15 \cdot 10^{-12}$ $K_p = 37,5 \cdot 10^{-12}$

Πίνακας 6.4.2: Κέρδη που θα χρησιμοποιηθούν τελικά στην κανονική τύρβη για τον έλεγχο IPC 1p-2p στις ταχύτητες 21-25m/s

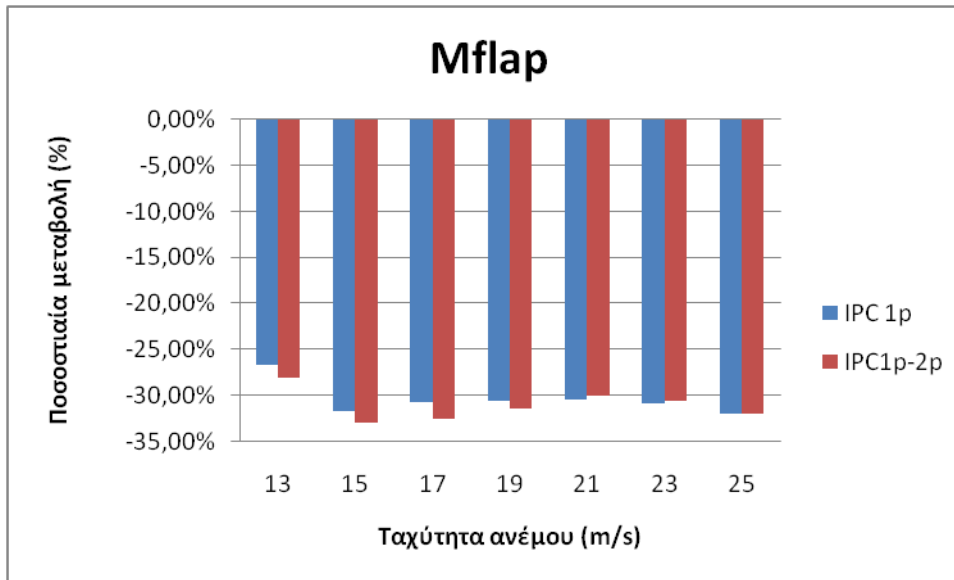
Τα τελικά αποτελέσματα για αυτές τις ταχύτητες μετά τη χρήση των καινούριων κερδών:

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPC 1p-2p (% μεταβολή)
21	Mflap	32489	-30,58%	-30,15%
	Mx tower	36881	-9,46%	-5,51%
	Mz tower	73785	4,09%	2,19%
23	Mflap	34956	-30,96%	-30,68%
	Mx tower	43641	-9,61%	-5,43%
	Mz tower	82773	5,13%	2,89%
25	Mflap	37542	-32,12%	-32,08%
	Mx tower	52584	-8,30%	-5,20%
	Mz tower	94101	5,94%	4,30%

Πίνακας 6.4.3: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 21-25m/s. IPC 1p-2p κέρδη E.

Τα τελικά αποτελέσματα για τον IPC έλεγχο είναι πολύ ικανοποιητικά. Τα ισοδύναμα φορτία για την Mflap είναι μικρότερα και από τον βασικό έλεγχο και από τον IPC 1p για τις ταχύτητες 13-19m/s. Για τις ταχύτητες 21-25m/s είναι μικρότερα από τον βασικό έλεγχο και ελάχιστα μεγαλύτερα από τον IPC 1p.

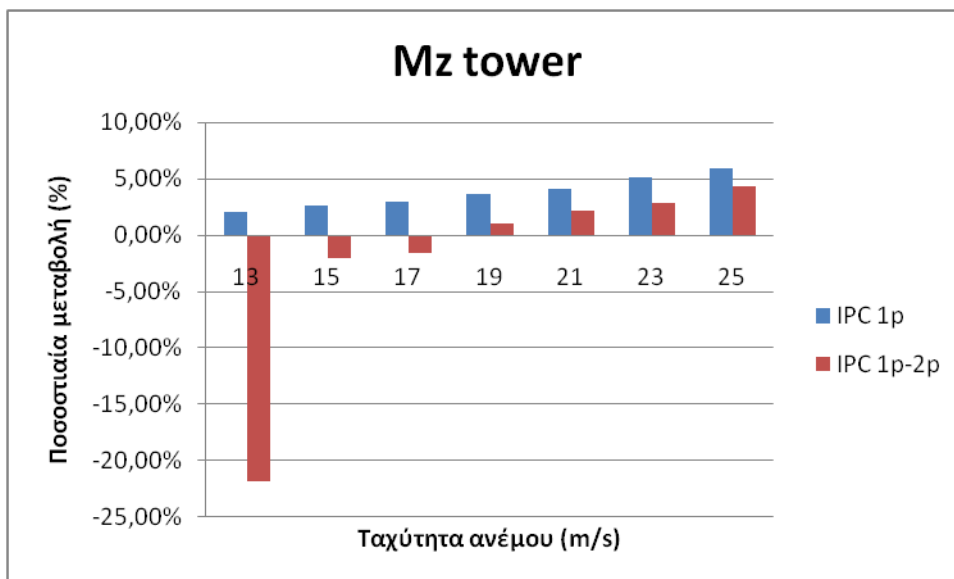
Σχηματικά παρουσιάζονται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.4.3: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι των 3 realisations) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p κέρδη B στις ταχύτητες 13-19m/s, κέρδη E στις ταχύτητες 21-25m/s.

Όσον αφορά τον πύργο και κυρίως την Mz tower που μας ενδιαφέρει περισσότερο, εδώ τα ισοδύναμα φορτία είναι μικρότερα από τον IPC έλεγχο σε όλες τις ταχύτητες, καθώς και από τον βασικό για τις ταχύτητες 13-17 m/s

Σχηματικά παρουσιάζονται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.4.4: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι των 3 realisations) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPC 1p-2p κέρδη B στις ταχύτητες 13-19m/s, κέρδη E στις ταχύτητες 21-25m/s.

Το γεγονός ότι τα ισοδύναμα φορτία της Mz πύργου είναι πάντοτε μικρότερα από εκείνα του IPC 1p είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς στην κανονική τύρβη μας νοιάζει κυρίως η κόπωση του πύργου, από εκεί δηλαδή μπορεί να υπάρξει βλάβη στην ανεμογεννήτρια.

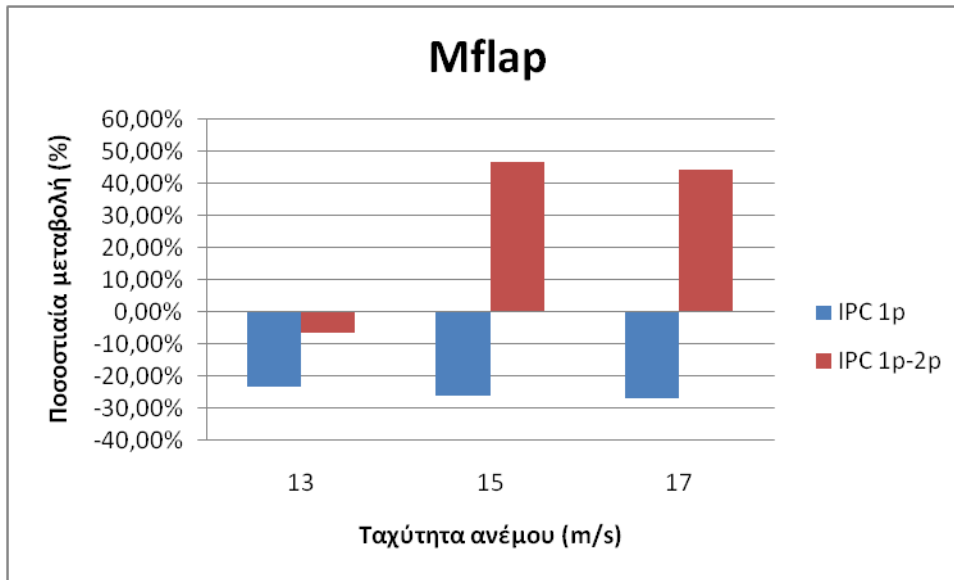
#### Ακραία τύρβη

Συνεχίζοντας, πραγματοποιήθηκαν δεκάλεπτες προσομοιώσεις και για τις 3 πραγματοποιήσεις ανέμου για βασικό έλεγχο, IPC 1p και IPC 1p-2p για ακραία τύρβη. Εδώ τα φορτία που προέκυψαν από τον IPC 1p,2p ήταν αισθητά αυξημένα (σε σύγκριση με τους άλλους 2 ελέγχους) ήδη από τις μικρές ταχύτητες.

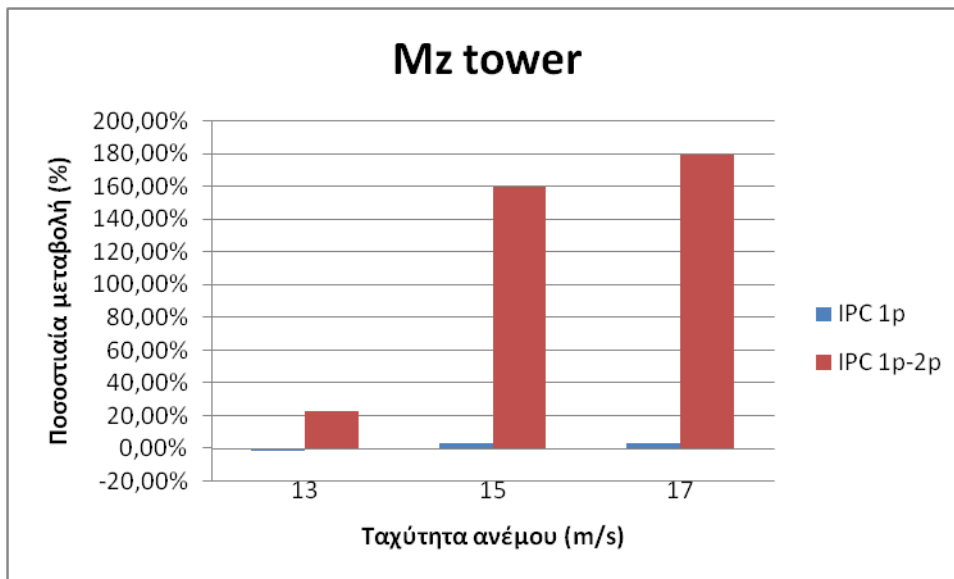
Ο πίνακας και τα διαγράμματα που ακολουθούν περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων (για ταχύτητες ανέμου 13-17m/s). Τα ισοδύναμα φορτία είναι ο μέσος όρος των 3 πραγματοποιήσεις σε κάθε περίπτωση.

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPC 1p-2p (% μεταβολή)
13	Mflap	31137	-23,10%	-6,68%
	Mx tower	21986	-6,04%	10,48%
	Mz tower	74893	-1,11%	22,56%
15	Mflap	34595	-26,22%	46,50%
	Mx tower	26950	-7,73%	199,58%
	Mz tower	74501	3,51%	159,78%
17	Mflap	35968	-26,66%	43,96%
	Mx tower	33165	-8,99%	173,53%
	Mz tower	79367	3,72%	178,72%

Πίνακας 6.4.4: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-17m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B.



Διάγραμμα 6.4.5: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-17m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B



Διάγραμμα 6.4.6: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-17m/s. IPC 1p-2p: κέρδη B

Και σε αυτήν την περίπτωση οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι τα κέρδη που επιλέξαμε δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην extreme τύρβη. Βέβαια ο hGAST χρησιμοποιεί για τις προσομοιώσεις του επίπεδο τύρβης Class A, που είναι το μέγιστο επίπεδο τύρβης. Για μια ανεμογεννήτρια σε περιοχή όπου η τύρβη του ανέμου είναι Class B ή C πιθανότατα να μπορούσαν να λειτουργήσουν τα κέρδη που είχαν επιλεγεί.

Και εδώ οδηγηθήκαμε σε επανεξέταση των κερδών που θα χρησιμοποιηθούν. Μετά από διάφορες δοκιμές καταλήξαμε στα εξής 2 κέρδη:

	Κέρδη 1p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )	Κέρδη 2p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )
Κέρδη Ε	$K_i = 7,5 \cdot 10^{-10}$ $K_p = 18,75 \cdot 10^{-10}$	$K_i = 15 \cdot 10^{-12}$ $K_p = 37,5 \cdot 10^{-12}$
Κέρδη ΣΤ	$K_i = 15 \cdot 10^{-12}$ $K_p = 37,5 \cdot 10^{-12}$	$K_i = 15 \cdot 10^{-12}$ $K_p = 37,5 \cdot 10^{-12}$

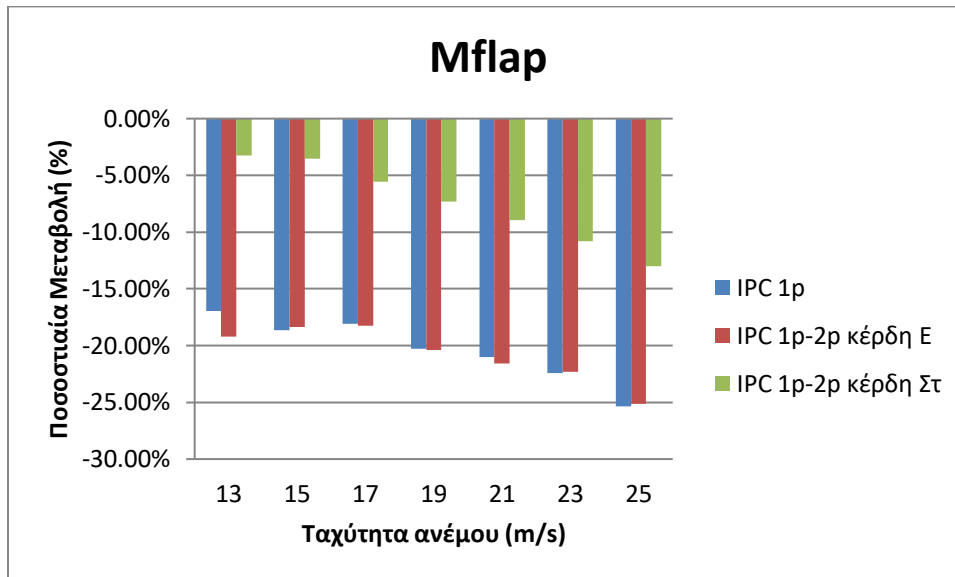
Πίνακας 6.4.5:Κέρδη που θα χρησιμοποιηθούν τελικά στην ακραία τύρβη για τον έλεγχο IPC 1p-2p στις ταχύτητες 13-25m/s

Τα αποτελέσματα των δεκάλεπτων προσομοιώσεων μόνο για την R1 πραγματοποίηση σε σύγκριση με τον βασικό και τον IPC 1p έλεγχο για όλες τις ταχύτητες ανέμου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα καθώς και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

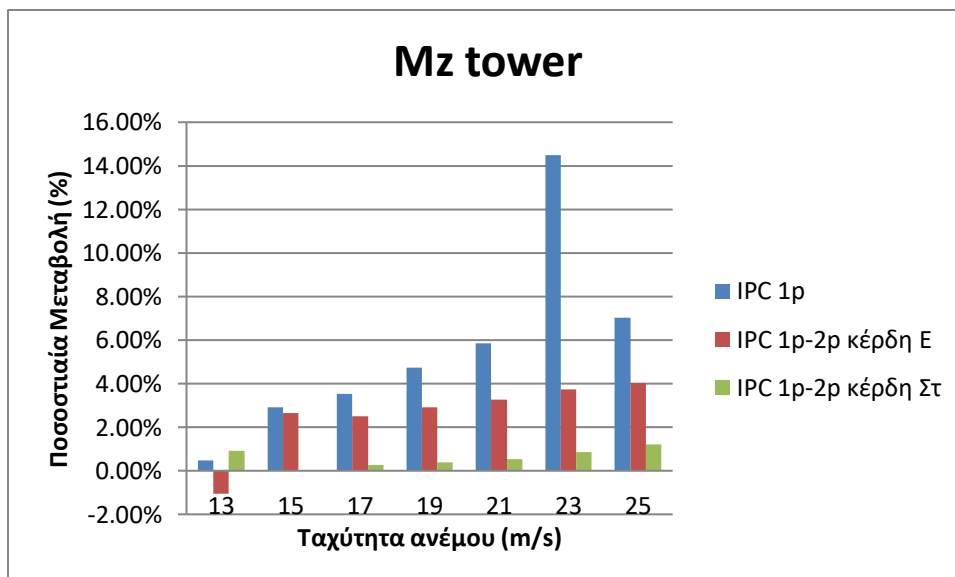
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPC 1p,2p Κέρδη Ε (% μεταβολή)	IPC 1p,2p Κέρδη ΣΤ (% μεταβολή)
13	Mflap	29127	-16,97%	-19,19%	-3,22%
	Mx tower	20268	-0,64%	2,97%	3,49%
	Mz tower	73768	0,46%	-1,04%	0,90%
15	Mflap	32986	-18,66%	-18,36%	-3,51%
	Mx tower	29248	-7,78%	-4,92%	-0,21%
	Mz tower	73004	2,92%	2,64%	0,02%
17	Mflap	34196	-18,08%	-18,24%	-5,56%
	Mx tower	35219	-7,33%	-5,47%	-0,52%
	Mz tower	77869	3,54%	2,49%	0,25%
19	Mflap	35785	-20,27%	-20,41%	-7,33%
	Mx tower	46888	-8,89%	-5,42%	0,41%
	Mz tower	86577	4,73%	2,91%	0,37%
21	Mflap	37265	-21,00%	-21,55%	-8,93%
	Mx tower	54908	-7,56%	-5,29%	0,65%
	Mz tower	96275	5,85%	3,28%	0,53%
23	Mflap	39067	-22,44%	-22,33%	-10,80%
	Mx tower	63349	-0,25%	-6,08%	0,72%
	Mz tower	106732	14,47%	3,74%	0,86%
25	Mflap	41013	-25,33%	-25,13%	-13,01%
	Mx tower	64616	-2,20%	-3,51%	1,33%

Mz tower	114146	7,04%	4,02%	1,20%
----------	--------	-------	-------	-------

Πίνακας 6.4.6: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων των Mflap, Mx tower, Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E (5η στήλη) και Στ (6η).



Διαγραμμα 6.4.7: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p με τα δύο διαφορετικά κέρδη E και Στ, σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη, στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1.



Διάγραμμα 6.4.8: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p με τα δύο διαφορετικά κέρδη E και Στ, σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι τα κέρδη E επιφέρουν μικρότερα ισοδύναμα φορτία στα περύγια σε όλες τις ταχύτητες σε σχέση με τον βασικό έλεγχο και στις περισσότερες σε σχέση με τον IPC 1p. Επίσης σε όλες τις ταχύτητες έχουν μικρότερα ισοδύναμα φορτία από τον IPC 1p όσον αφορά την Mz tower. Τα κέρδη Στ δεν πετυχαίνουν τόση μείωση στα φορτία των περυγιών οπότε παρουσιάζουν μεγαλύτερα ισοδύναμα φορτία από τον IPC 1p. Παράλληλα όμως πετυχαίνουν να διατηρήσουν την Mz tower σε πολύ κοντινά επίπεδα με το βασικό έλεγχο, παρουσιάζοντας μικρότερα ισοδύναμα φορτία τόσο από τον IPC 1p όσο και από τον IPC 1p-2p με κέρδη E.

Στην περίπτωση της ακραίας τύρβης όμως, είναι σημαντικότερη η μείωση της κόπωσης στα περύγια οπότε ο πρώτος συνδυασμός κερδών είναι ο καλύτερος.

Συνεπώς, αφού κέρδη E λειτουργούν σωστά στην περίπτωση της ακραίας τύρβης, πρέπει να ελεγχθεί αν το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση της κανονικής, έτσι ώστε να μπορέσουμε να τα εφαρμόσουμε καθολικά.

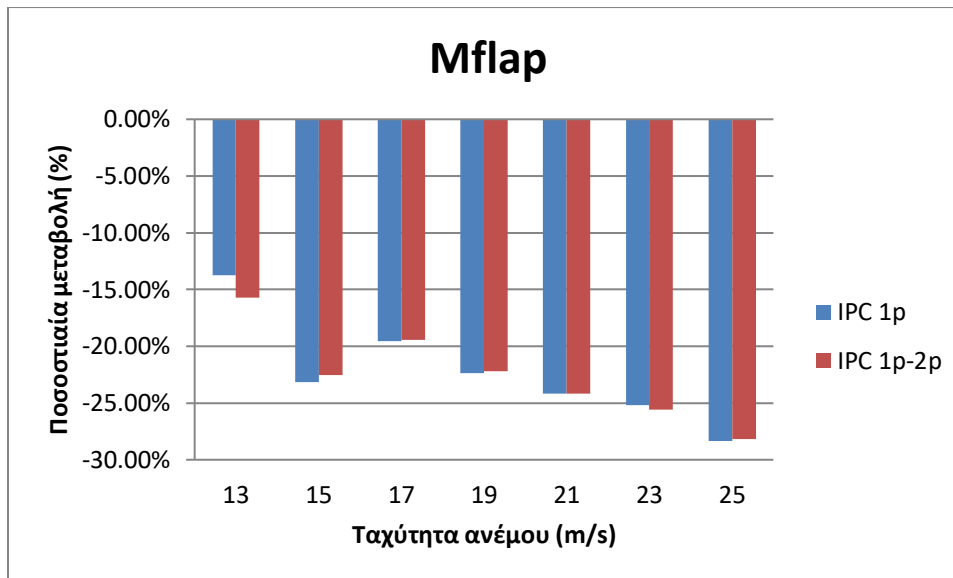
Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν δεκάλεπτες προσομοιώσεις σε όλες τις ταχύτητες για την πραγματοποίηση R1 ανέμου και για κανονική τύρβη. Ο παρακάτω πίνακας καθώς και τα διαγράμματα που ακολουθούν περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα.

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPC 1p-2p (% μεταβολή)
13	Mflap	22229	-13,75%	-15,70%
	Mx tower	14274	2,62%	8,02%
	Mz tower	51686	5,21%	4,40%
15	Mflap	25214	-23,15%	-22,56%
	Mx tower	20626	-9,39%	-6,19%
	Mz tower	51543	2,24%	1,34%
17	Mflap	26181	-19,57%	-19,46%
	Mx tower	25599	-7,93%	-4,96%
	Mz tower	56765	3,14%	2,33%
19	Mflap	28222	-22,39%	-22,18%
	Mx tower	34549	-9,66%	-6,11%
	Mz tower	65371	4,05%	2,40%
21	Mflap	30555	-24,15%	-24,15%
	Mx tower	42251	-9,50%	-6,78%
	Mz tower	74885	4,97%	2,46%
23	Mflap	33219	-25,21%	-25,58%

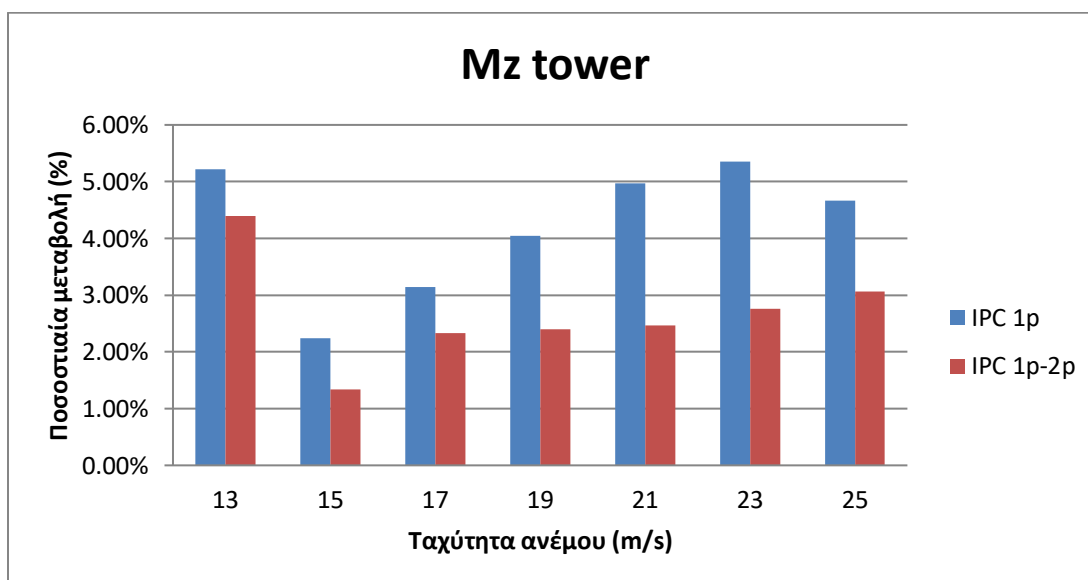


	Mx tower	49934	-9,06%	-6,02%
	Mz tower	85559	5,35%	2,76%
25	Mflap	35652	-28,36%	-28,16%
	Mx tower	53503	-5,70%	-4,42%
	Mz tower	94205	4,67%	3,06%

Πίνακας 6.4.7: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων των Mflap, Mx tower, Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E.



Διάγραμμα 6.4.9: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E.



Διάγραμμα 6.4.10: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPC 1p-2p σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s και πραγματοποίηση R1. IPC 1p-2p: κέρδη E.

Τα ισοδύναμα φορτία για την Mflap κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα για τον IPC 1p και τον IPC 1p-2p ενώ για την Mz tower υπάρχει μικρότερη αύξηση για τον IPC 1p-2p σε σχέση με τον βασικό έλεγχο, που όπως προαναφέραμε έχει μεγάλη σημασία στην περίπτωση της κανονικής τύρβης.

## 6.5 IPFC έλεγχος σε κανονική και ακραία τύρβη

### Κανονική τύρβη

Όπως και στην περίπτωση του IPC 1p-2p ελέγχου πραγματοποιήθηκαν δεκάλεπτες προσομοιώσεις στις ταχύτητες 13m/s - 25m/s και στις 3 πραγματοποιήσεις ανέμου ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αντίστοιχα ισοδύναμα φορτία τους με εκείνα του βασικού και του IPC 1p ελέγχου.

Τα κέρδη και τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση των παραγράφων 6.2 και 6.3 αντίστοιχα:

	Κέρδη 1p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )	Κέρδη 2p ( $\frac{rad}{kNm \cdot sec}$ )
Κέρδη B	Ki = $3,75 \cdot 10^{-10}$ Kp = $9,375 \cdot 10^{-10}$	Ki = $11,25 \cdot 10^{-10}$ Kp = $28,125 \cdot 10^{-10}$

Πίνακας 6.5.1: Κέρδη που χρησιμοποιήθηκαν για τον IPFC έλεγχο σε κανονική και ακραία τύρβη στις ταχύτητες 13-25m/s

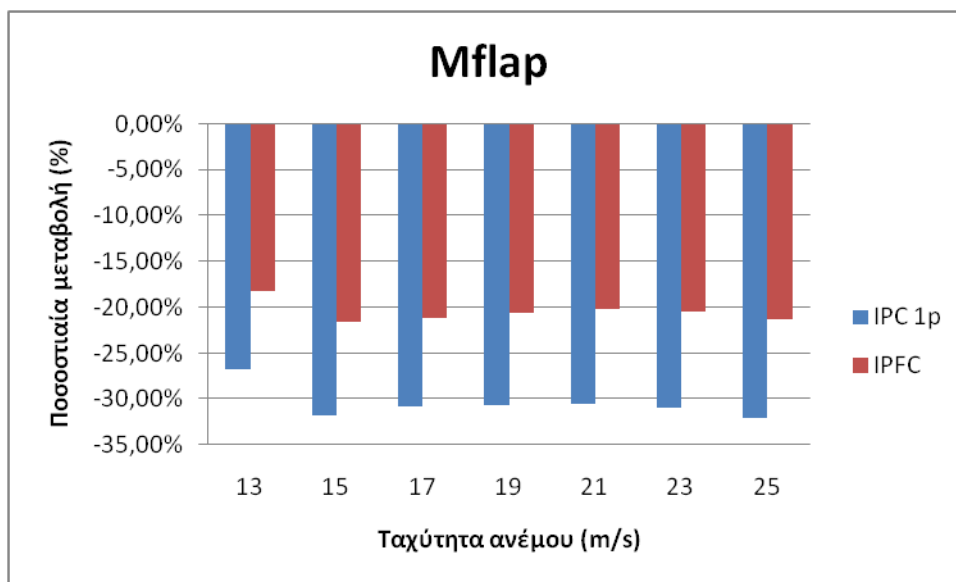
φίλτρα: τα αρχικά φίλτρα με την αφαίρεση των notch 1p,2p

Ο παρακάτω πίνακας καθώς και τα διαγράμματα που ακολουθούν περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων. (Τα ισοδύναμα φορτία είναι ο μέσος όρος των 3 πραγματοποιήσεων σε κάθε περίπτωση).

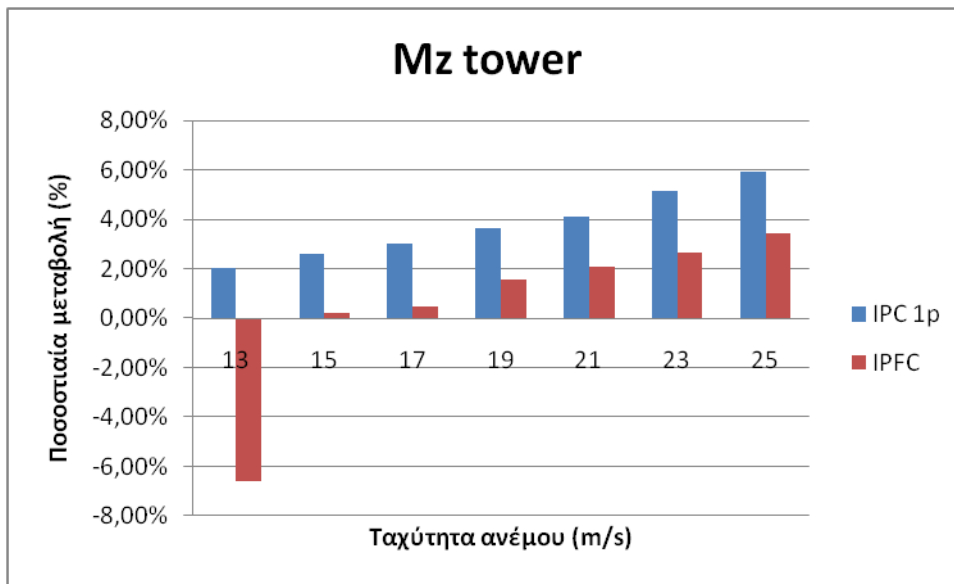
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPFC (% μεταβολή)
13	Mflap	24626	-26,73%	-18,31%
	Mx tower	13861	-6,44%	-4,63%
	Mz tower	52680	2,04%	-6,58%
15	Mflap	26547	-31,73%	-21,59%
	Mx tower	19221	-9,68%	-6,35%
	Mz tower	52877	2,62%	0,21%

17	Mflap	28403	-30,83%	-21,13%
	Mx tower	24424	-10,32%	-6,78%
	Mz tower	58219	2,99%	0,48%
19	Mflap	30294	-30,61%	-20,69%
	Mx tower	30620	-9,59%	-5,67%
	Mz tower	65545	3,62%	1,55%
21	Mflap	32489	-30,58%	-20,24%
	Mx tower	36881	-9,46%	-4,99%
	Mz tower	73785	4,09%	2,09%
23	Mflap	34956	-30,96%	-20,55%
	Mx tower	43641	-9,61%	-5,01%
	Mz tower	82773	5,13%	2,67%
25	Mflap	37542	-32,12%	-21,40%
	Mx tower	52584	-8,30%	-4,50%
	Mz tower	94101	5,94%	3,41%

Πίνακας 6.5.2: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.



Διάγραμμα 6.5.1: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflap των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.



Διάγραμμα 6.5.2: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε κανονική τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον IPFC έλεγχο, παρατηρούμε ότι τα ισοδύναμα φορτία για την Mflap είναι μικρότερα από τον βασικό έλεγχο αλλά μεγαλύτερα από τον IPC 1p σε όλες τις ταχύτητες.

Όσον αφορά την Mz tower στην ταχύτητα 13m/s παρουσιάζεται μείωση σε σχέση με τον βασικό έλεγχο, στις 15-17 m/s κυμαίνονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα ενώ στις υπόλοιπες ταχύτητες τα ισοδύναμα φορτία του είναι μεγαλύτερα. Σε σχέση με τον IPC 1p έλεγχο τα ισοδύναμα φορτία του IPFC είναι μικρότερα σε όλες τις ταχύτητες.

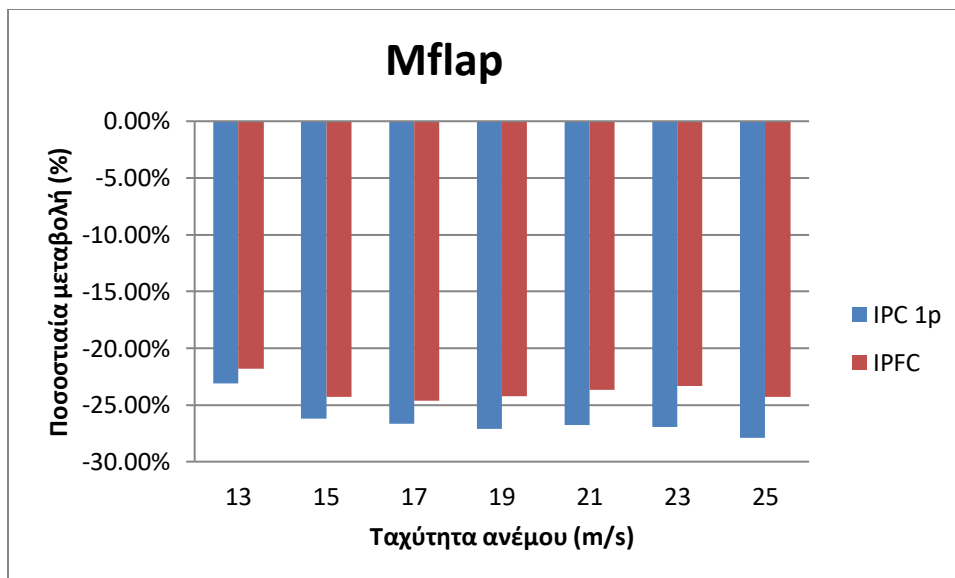
#### Ακραία τύρβη

Συνεχίζοντας με τον IPFC έλεγχο για την περίπτωση της ακραίας τύρβης, τα αποτελέσματα για δεκάλεπτες προσομοιώσεις σε όλες τις ταχύτητες συγκρινόμενα με βασικό και IPC 1p έλεγχο σε όλες τις πραγματοποιήσεις ανέμου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και στα διαγράμματα που ακολουθούν: (Τα ισοδύναμα φορτία είναι ο μέσος όρος των 3 πραγματοποιήσεων σε κάθε περίπτωση)

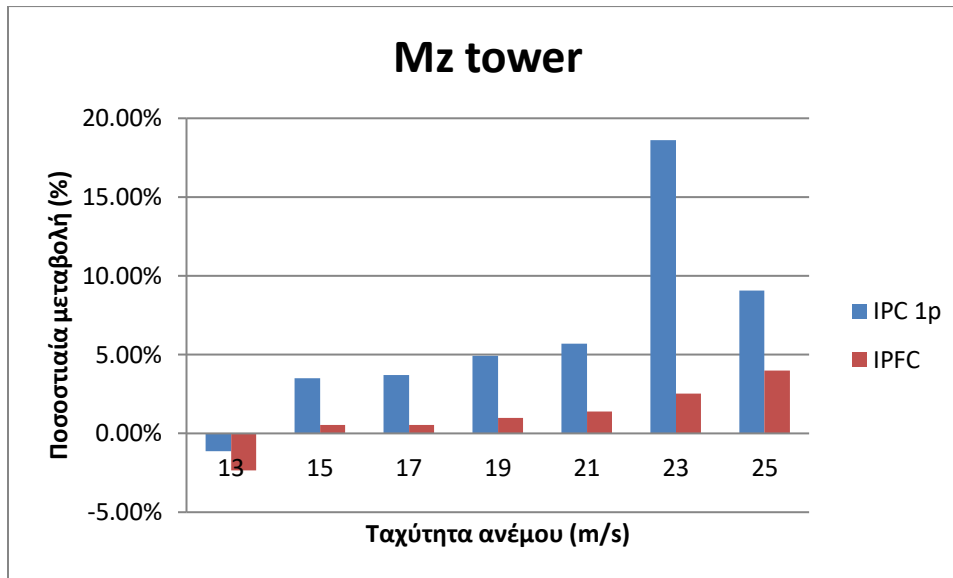
Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Ροπή	Βασικός έλεγχος (kNm)	IPC 1p (% μεταβολή)	IPFC (% μεταβολή)
13	Mflap	31137	-23,10%	-21,83%
	Mx tower	21986	-6,04%	-2,03%
	Mz tower	74893	-1,11%	-2,34%
15	Mflap	34595	-26,22%	-24,31%
	Mx tower	26950	-7,73%	-3,35%

	Mz tower	74501	3,51%	0,56%
17	Mflap	35968	-26,66%	-24,60%
	Mx tower	33165	-8,99%	-3,89%
	Mz tower	79367	3,72%	0,53%
19	Mflap	37323	-27,11%	-24,22%
	Mx tower	40334	-8,14%	-3,09%
	Mz tower	86503	4,92%	0,97%
21	Mflap	38957	-26,78%	-23,68%
	Mx tower	47282	-7,74%	-2,70%
	Mz tower	94661	5,70%	1,38%
23	Mflap	40580	-26,93%	-23,35%
	Mx tower	54696	-5,41%	-2,62%
	Mz tower	103052	18,61%	2,53%
25	Mflap	42611	-27,88%	-24,32%
	Mx tower	63278	-5,81%	-0,83%
	Mz tower	113919	9,06%	4,00%

Πίνακας 6.5.3: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) των Mflap,Mx tower,Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.



Διάγραμμα 6.5.3: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mflar ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC συνδυασμός κερδών B



Διάγραμμα 6.5.4: Ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων φορτίων (μέσοι όροι R1,R2,R3) της Mz tower των ελέγχων IPC 1p, IPFC σε σχέση με το βασικό έλεγχο σε ακραία τύρβη στις ταχύτητες ανέμου 13-25m/s. IPFC: κέρδη B.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα ισοδύναμων φορτίων παρατηρούμε ότι η Mflar μειώνεται αρκετά σε σχέση με το βασικό έλεγχο, παραμένει όμως λίγο υψηλότερη από τον IPC 1p σε όλες τις ταχύτητες. Τα ισοδύναμα φορτία της Mz tower σε σχέση με τον βασικό έλεγχο εκτός από την ταχύτητα 13m/s όπου υπάρχει μείωση, παρουσιάζουν μικρές αυξήσεις. Συγκριτικά με τον IPC 1p είναι μικρότερα σε όλες τις ταχύτητες.

Συνεπώς τα αποτελέσματα του IPFC ελέγχου είναι ικανοποιητικά γιατί επιφέρουν σε όλες τις περιπτώσεις μείωση της κόπωσης του πύργου σε σχέση με τον IPC 1p έλεγχο. Όσον αφορά τα πτερύγια, πιθανότατα θα μπορούσαμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη μείωση από τον IPC 1p, που δεν επιτεύχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία αν η ανάλυση της βαθμονόμησης των κερδών είχε γίνει για τον συγκεκριμένο έλεγχο. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν τα κέρδη που είχαν επιλεγεί για τον IPC 1p-2p. Έτσι, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση για τα ισοδύναμα φορτία της Mflar σε σχέση με τον βασικό έλεγχο αλλά παρέμειναν υψηλότερα σε σχέση με τον IPC 1p.

**Παράρτημα: Συναρτήσεις μεταφοράς φίλτρων δεύτερης τάξης:**

- Συνάρτηση μεταφοράς notch φίλτρων 2ης τάξης:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = G(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}$$

- Συνάρτηση μεταφοράς lowpass φίλτρων 2ης τάξης:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

# 7

## *Βιβλιογραφία:*

- [1] Theofanis Tsiantas, Dimitris I. Manolas, Theodore Machairas, Anargyros Karakalas, Vasilis A. Riziotis, Dimitrios Saravanos, Spyros G. Voutsinas. Assessment of fatigue load alleviation potential through blade trailing edge morphing.
- [2] Θεοφάνης Τσιάντας. Μείωση των φορτίων περύγισης σε δρομείς ανεμογεννητριών με χρήση μεταπτερυγίων μεταβλητής καμπυλότητας.
- [3] Christian Bak, Frederik Zahle, Robert Bitsche, Taeseong Kim, Anders Yde, Lars C. Henriksen, Anand Natarajan, Morten Hansen. Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine, DTU Wind Energy Report-I-0092
- [4] Hansen, M.H. and L.C. Henriksen, “Basic DTU wind energy controller,” DTU Wind Energy, Roskilde, Denmark, 2013.
- [5] Ervin Bossanyi, David Witcher, Tony Mercer. Controller for 5MW reference turbine, Report 11593/BR/04.
- [6] Nikos Spyropoulos. 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.

- [7] Dimitris I. Manolas, Giannis P. Serafeim, Panagiotis K. Chaviaropoulos, Vasilis A. Riziotis, Spyros G. Voutsinas, Assessment of load reduction capabilities using passive and active control methods on a 10MW-scale wind turbine
- [8] K. Orr. Data quality and systems theory. In *Communications of the ACM*, 41, 2, pp. 54-57, Feb. 1998.
- [9] Riziotis, V.A., Voutsinas, S.G., 2008, Dynamic stall modeling on airfoils based on strong viscous-inviscid interaction coupling, *J. Numerical Methods in Fluids*, 56, pp 185-208.