

# «Διερεύνηση Λειτουργικής Συμπεριφοράς ενός Συστήματος Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας σε Ηλεκτρική Αποτελούμενου από Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας και Ηλεκτρονικούς Μετατροπείς Ισχύος»

*Δημήτριος Γκιαουράκης, Διπλ. Ηλ. Μηχ/κός, Υποψήφιος Διδάκτορας, Μέλος IENE, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, τηλ.: 2610-997351, Fax:2610-997362, e-mail: dgkiaourakis@ece.upatras.gr*

*Αθανάσιος Σαφάκας, Καθ. Δρ. -Μηχανικός, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, τηλ.: 2610-997351, Fax:2610-997362, e-mail: a.n.safacas@ece.upatras.gr*

*Επαμεινώνδας Μητρονίκας, Λέκτορας, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, τηλ.: 2610-996409, Fax:2610-997362, e-mail: e.mitronikas@ece.upatras.gr*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

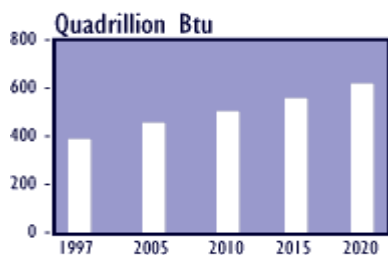
Η τεχνολογία “CASCADE” χρησιμοποιείται τον τελευταίο καιρό όλο και περισσότερο στα αιολικά πάρκα ανά τον κόσμο και αποτελεί ελκυστικό πεδίο επιστημονικής έρευνας. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της βασικής λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος με ιδιαίτερο βάρος στην ανάλυση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα αιολικά συστήματα με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας σε διάταξη “CASCADE”. Στην ασύγχρονη γεννήτρια του αιολικού συστήματος ο στάτης συνδέεται απευθείας με το ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο και ο δρομέας συνδέεται με αυτό μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος (EP-ΣΡ-EP). Με αυτούς τους μετατροπείς επιτυγχάνεται η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης συγκεκριμένης τιμής και συχνότητας (τιμές δικτύου).

Η διάταξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος αποτελείται από έναν ανορθωτή και έναν αντιστροφέα με ημιαγωγικά στοιχεία IGBT. Αυτοί οι μετατροπείς αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου των ηλεκτρικών μεγεθών της ανεμογεννήτριας, που χρησιμοποιούν την τεχνολογία «CASCADE» για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μέχρι πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου(της τάξεως 3m/s). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συγκεκριμένου συστήματος ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος EP-ΣΡ-EP, που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink καθώς και μια ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση αυτών. Το αιολικό σύστημα, το οποίο μελετάται, αποτελείται από έναν ανεμοκινητήρα, ο οποίος συνδέεται με την ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων και τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος με τοπολογία “CASCADE”. Τέλος, αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής όσον αφορά την αξιοποίησή της στα σύγχρονα αιολικά συστήματα και τονίζονται ιδιαίτερα τα οικονομικά οφέλη από τη χρήση αυτής.

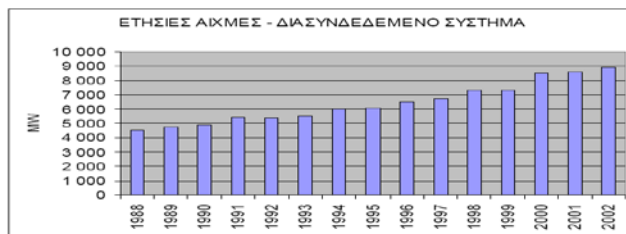
# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, η ανάγκη για κατανάλωση όλο και περισσότερης ενέργειας, καθώς και η ανάγκη χρήσης πηγών ενέργειας που να μην ρυπαίνουν το περιβάλλον, είναι γεγονός. Έτσι, λόγω της ισχυρής πίεσης από τις δυνάμεις που εκπροσωπούν την οικολογική αντίληψη, αλλά και της πίεσης για πιο «οικονομική» ενέργεια, ήδη οδηγηθήκαμε στη δημιουργία εγκαταστάσεων για χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, βιομάζα, γεωθερμική) αποφεύγοντας περεταίρω καθυστερήσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ερευνητικό-αναπτυξιακό καθώς και εμπορικό ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) και ειδικότερα για τη δημιουργία συστημάτων μέσω των οποίων μπορούν αυτές να αξιοποιηθούν κατά το βέλτιστο τρόπο. Ο όρος *ανανεώσιμες* αποδίδεται, διότι οι πηγές αυτές έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι ανανεώνονται διαρκώς λόγω της φύσης τους, συνεπώς είναι ανεξάντλητες και προσφέρονται δωρεάν στον άνθρωπο προς εκμετάλλευση. Οι περισσότερες από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι αποτέλεσμα της δράσης της ηλιακής ενέργειας, π.χ. ο αέρας, τα κύματα των θαλασσών, η θερμοκρασιακή διαφορά των θαλασσών κ.λπ. Η μέση ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι  $600 \text{ W/m}^2$ , αλλά φυσικά η εκμεταλλεύσιμη τιμή διαφέρει πολύ, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και άλλους παράγοντες.

Αφορμή για αυτό το έντονο ενδιαφέρον αποτέλεσε η πετρελαϊκή κρίση του 1973, η οποία κατέστησε σαφές διεθνώς, ότι τα αποθέματα του πετρελαίου, στο οποίο βασίζεται ως επί το πλείστον η παραγωγή τεράστιας ποσότητας αξιοποιήσιμης ενέργειας, είναι «πεπερασμένα» και «περιορισμένα». Άλλος ένας λόγος που οδήγησε στο έντονο ενδιαφέρον για τις Α.Π.Ε. είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Η εξέλιξη αυτή και στους δύο κλάδους δημιούργησε νέα δεδομένα στην ανθρωπότητα και είχε ως αποτέλεσμα την ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για ενέργεια, αλλά και την αρνητική συνέπεια ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή μιας μεγάλης ποικιλίας ρύπων, όπως οξείδια του θείου ( $\text{SO}_x$ ) και του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), άκαυστοι υδρογονάνθρακες ( $\text{HC}$ ) αλλά και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Στο σχήμα 1 απεικονίζεται η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση 1970–2025, ενώ στο σχήμα 2 οι ετήσιες αιχμές του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος 1988–2002.



Σχήμα 1. Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση 1970–2025 [28]



Σχήμα 2. Ετήσιες Αιχμές ελληνικού Διασυνδεδεμένου συστήματος 1988–2002 [30]

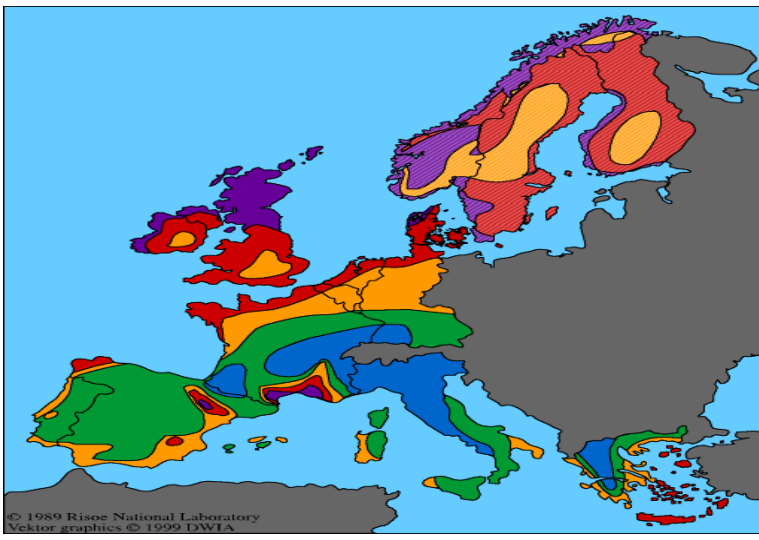
$$1 \text{ BTU} = 1055.06 \text{ J}$$

$$1 \text{ Quadrillion BTU} = 10^{15} \text{ BTU}$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι ένα ευπρόσδεκτο χαρακτηριστικό των Α.Π.Ε, είναι το γεγονός ότι οι τεχνολογίες εκμετάλλευσής τους βρίσκονται μέσα στις κατασκευαστικές δυνατότητες των τεχνολογικά αναπτυσσόμενων χωρών. Επομένως, εκτός από την προσφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο μιας χώρας, συνεισφέρουν σημαντικά, εφόσον αναπτυχθούν κατάλληλα, και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Ειδικά για την χώρα μας αποτελεί πρόκληση η δημιουργία μιας εθνικής βιομηχανίας για την εκμετάλλευση Α.Π.Ε., αν και έχουν σημειωθεί κάποιες προσπάθειες τα τελευταία χρόνια προς αυτήν την κατεύθυνση.

## 2. ΜΕΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟ ΝΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΧΩΡΟ

Στη χώρα μας έχει αρχίσει η εγκατάσταση, σε πολλά μέρη, ανεμογεννητριών, είτε για πειραματικούς σκοπούς είτε για κάλυψη των τοπικών και όχι μόνο-αναγκών για ενέργεια. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία που παρατίθενται παρακάτω, η χώρα μας έχει πλούσιο αιολικό δυναμικό και όλα τα εχέγγυα για την επίτευξη των στόχων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. και κυρίως από αιολική ενέργεια. Επίσης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αιολική ενέργεια κατέχει πολύ σημαντική θέση στις Α.Π.Ε. όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εφόσον ολοένα και περισσότερα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται ανά τον κόσμο.



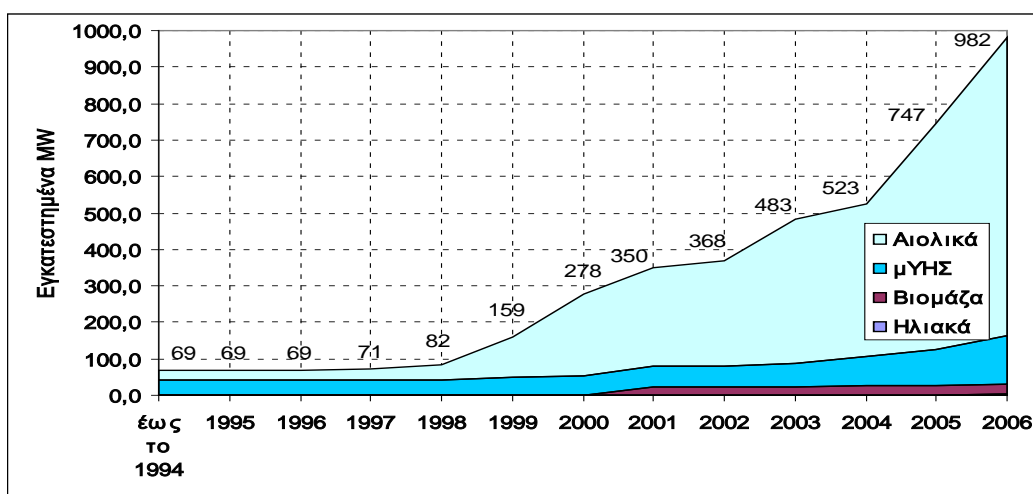
Σχήμα 3. Αιολικός χάρτης Δ. Ευρώπης [29]

### Υπόμνημα

	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							

Από τον παραπάνω χάρτη διαπιστώνουμε τη δικαιολογημένη ανάπτυξη των ανεμογεννητριών τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, αφού υπάρχει πλούσιο αιολικό δυναμικό προς εκμετάλλευση. Επίσης, έχει διαπιστωθεί από μελέτες ότι το σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας διαθέτει μέτριο προς υψηλό αιολικό δυναμικό, συνεπώς πρέπει να υπάρξει μαζική στροφή των επενδυτών προς αυτή την κατεύθυνση.

Στο σχήμα 4 που ακολουθεί, φαίνεται συγκεντρωτικά το ποσοστό συμμετοχής ανά κατηγορία Α.Π.Ε. στον ελληνικό χώρο. Ο πίνακας και το σχήμα προήλθαν από το Υπουργείο Ανάπτυξης και δείχνει τη διαχρονική εξέλιξη και τις τάσεις που επικρατούν. Άλλωστε τα παραπάνω στοιχεία δείχνουν την μεγάλη ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και γενικά της αιολικής ενέργειας, η οποία είναι η κυρίως αξιοποιούμενη μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην Ελλάδα φαίνεται ότι η αιολική ενέργεια κατέχει κυρίαρχη θέση μεταξύ των Α. Π. Ε. .



Σχήμα 4. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα με χρήση ΑΠΕ.

**ΠΗΓΗ : ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ( [www.ypan.gr](http://www.ypan.gr) )**

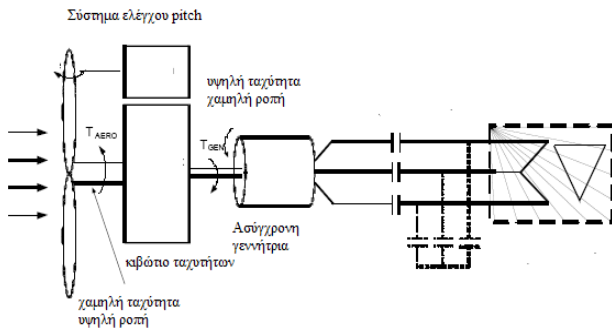
### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

#### 3.1 Σταθερή Ταχύτητα

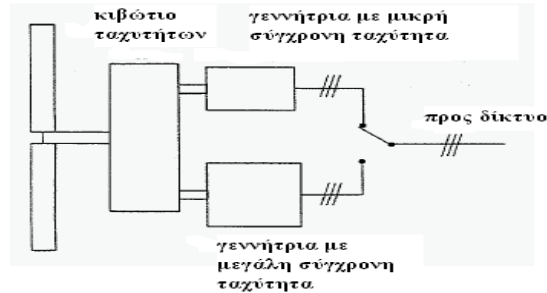
Μια Α/Γ με αυτή τη μέθοδο ελέγχου, αποτελείται από έναν Α/Κ και μια ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, που συνδέονται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η ολίσθηση των γεννητριών αυτής της κατηγορίας ποικίλλει ανάλογα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ, έτσι η ταχύτητα δεν είναι στην πραγματικότητα σταθερή, εντούτοις, δεδομένου ότι οι μεταβολές της ταχύτητας είναι πολύ μικρές (περίπου 1-2%), αναφέρεται συνήθως ως ανεμογεννήτρια «σταθερής ταχύτητας». Επίσης, η άεργος ισχύς των ασύγχρονων γεννητριών βραχυκυκλωμένου κλωβού σχεδόν πάντα προσφέρεται από πυκνωτές.

Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι η σχετικά απλή δομή του, επομένως το κόστος του τείνει να είναι χαμηλό. Αυτές οι Α/Γ πρέπει να είναι μηχανικά περισσότερο στιβαρές από άλλες, λόγω των υψηλότερων μηχανικών φορτίων, δεδομένου ότι η ταχύτητα του Α/Κ δεν μπορεί να ποικίλει. Οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του αέρα έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα διακυμάνσεις στη ροπή. Οι διακυμάνσεις ισχύος μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις τάσης, οι οποίες αντισταθμίζονται από πυκνωτές.

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα παρακάτω συστήματα:



Σχήμα 5. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ΣΣΣΣ με μία σύγχρονη ταχύτητα [26]

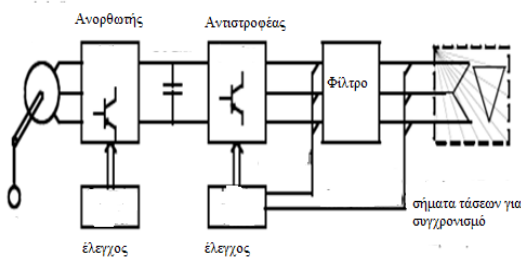


Σχήμα 6. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ΣΣΣΣ με δύο σύγχρονες ταχύτητες [27]

### 3.2 Μεταβλητή ταχύτητα

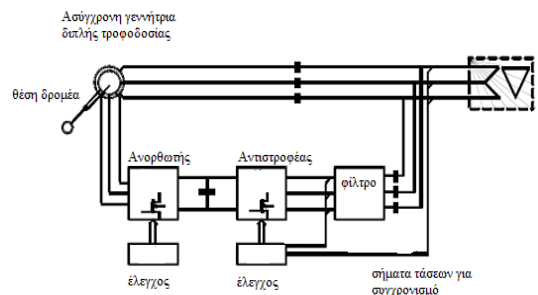
Οι Α/Γ με αυτόν τον τύπο ελέγχου έχουν αναπτυχθεί εντυπωσιακά τα τελευταία χρόνια. Η λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την απόζευξη της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου και της μηχανικής συχνότητας. Για αυτόν τον λόγο οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, όπως ένας μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη τάση, συνδυάζονται με τα προηγμένα συστήματα ελέγχου. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα συστήματα των σχημάτων 7 και 8:

α) Μετατροπή της συνολικής ισχύος



Σχήμα 7. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος με πλήρη μετατροπή [26]

β) Με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (Doubly-fed Induction Generator-DFIG)



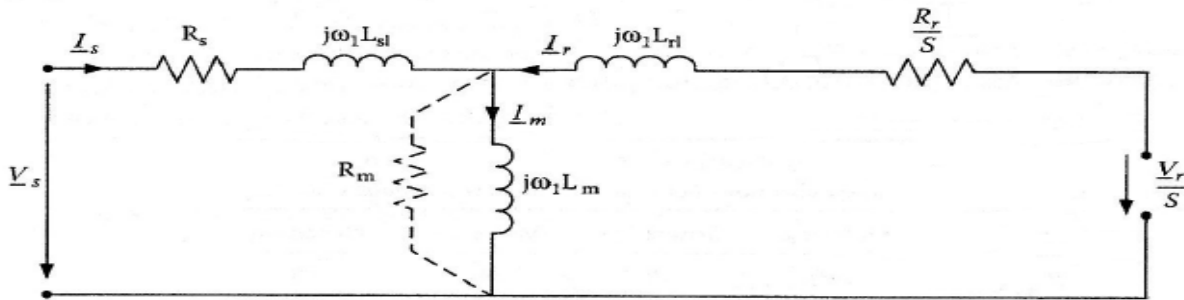
Σχήμα 8. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας [26]

### 3.2.1 Αιολικό σύστημα μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική με Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας (ΓΕΔΤ-DFIG)

Στο σχήμα 8 το σύστημα, που απεικονίζεται, αποτελείται από μια ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα με το τριφασικό δίκτυο και με τα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένα μέσω δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών με ένα μετατροπέα ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ. Αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς τάσεως (ΜΠΤ), που συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ο πυκνωτής μεταξύ των δύο μετατροπέων σταθεροποιεί την τάση (σχ. 8).

Η συμπεριφορά της γεννήτριας εξαρτάται από αυτούς τους μετατροπείς και τους ελεγκτές τους τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και σε συνθήκες σφαλμάτων. Οι μετατροπείς ελέγχουν την τάση του δρομέα κατά πλάτος και κατά φάση και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργούς και άεργου ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΕ/Τ, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μαγνήτισης, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 9 :



Σχήμα 9. Ισοδύναμο κύκλωμα DFIG στη μόνιμη κατάσταση.

Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει για μια ισοδύναμη φάση σε Υ και για υπολογισμούς μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση που η ΓΕ/Τ είναι συνδεδεμένη κατά Δ, η μηχανή μπορεί ακόμα να εκφραστεί με το ισοδύναμο αυτό. Σημειώνεται εδώ ότι, αν η τάση του δρομέα,  $V_r$  βραχυκυκλωθεί, το ισοδύναμο κύκλωμα για την ΓΕΔΤ μετατρέπεται στο τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα για μια μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Βασικό μέγεθος είναι η ολίσθηση, η οποία ορίζεται ως:

$$s = \frac{n_{syn} - n_{gen}}{n_{syn}} \quad (1)$$

όπου  $n_{syn}$  και  $n_{gen}$  είναι αντίστοιχα η σύγχρονη ταχύτητα και η ταχύτητα της γεννήτριας σε στροφές ανά λεπτό ( rpm ). Υποθέτοντας ότι όλες οι απώλειες στα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα μπορούν να αμεληθούν, η ισχύς μέσω του μετατροπέα ισχύος και η αποδιδόμενη ισχύς του στάτη,

βασισμένη στην ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο  $P_{grid}$  ή στη μηχανική ισχύ, μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$P_{rotor} \approx s \cdot P_{stator} \quad (2)$$

$$P_{stator} \approx P_{grid} / (1-s) = \eta_{gen} \cdot P_{mech} / (1-s) \quad (3)$$

όπου  $\eta_{gen}$  είναι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας. Η ισχύς αποδίδεται από το δρομέα και ρέει προς το δίκτυο μέσω του μετατροπέα ( $P_{rotor} > 0$ ) στην υπερσύγχρονη κατάσταση, ενώ ο στάτης πάντα τροφοδοτεί το δίκτυο ( $P_{grid} > 0$ ). Αν ληφθεί υπόψιν ότι η ολίσθηση λαμβάνει τιμές από 0.2-0.3 για αυτά τα συστήματα, γίνεται αντιληπτό ότι και η ισχύς που χρειάζεται να διαχειριστεί ο back-to-back μετατροπέας είναι περίπου το 30% της συνολικής ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη διαστασιολόγηση του μετατροπέα και άρα και μειωμένο κόστος.

Η παρουσία του μετατροπέα ισχύος επιτρέπει στη γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μία πιο ευέλικτη λειτουργία σε σχέση με μία γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης, πετυχαίνει απόζευξη της μηχανικής από την ηλεκτρική συχνότητα μέσω ρευμάτων μεταβλητής συχνότητας στο δρομέα, πάντα σύμφωνα όμως με την ταχύτητα του άξονα. Μέσω δαχτυλίων, ο μετατροπέας τροφοδοτεί τα τυλίγματα του δρομέα με τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας και έτσι μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της αέργου ισχύος, εφόσον η γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας είναι ικανή να παράγει ή να απορροφήσει άεργο ισχύ προς ή από το δίκτυο, με τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης. Επιπλέον, επιτυγχάνεται η απόζευξη του ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος του δρομέα. Επίσης, ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να μαγνητίσει τη μηχανή μέσα από το κύκλωμα του δρομέα, ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου.

### **3.2.1.1 Διάταξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική με ΓΔΕΤ-Ανάλυση και διερεύνηση της λειτουργικής του συμπεριφοράς**

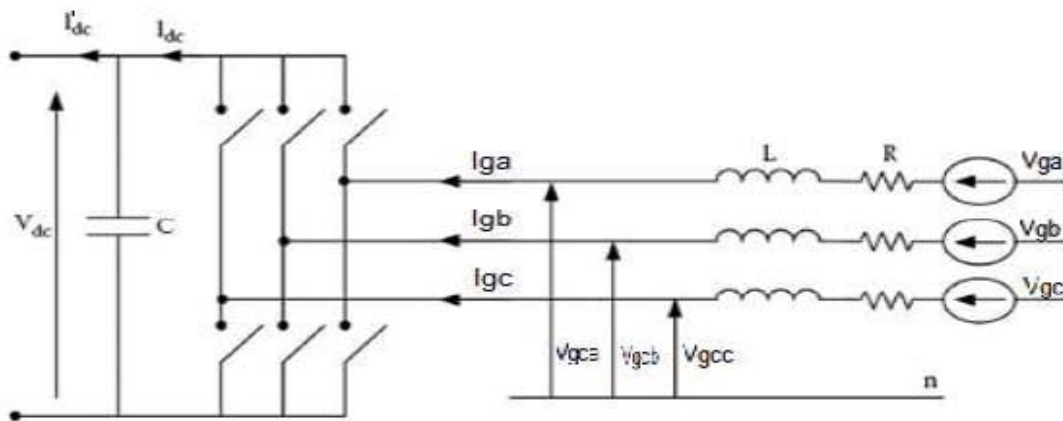
Η διάταξη αποτελείται από δύο επιμέρους μετατροπείς, το μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα (Rotor Side Converter - RSC) και τον μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου (Line Side Converter – LSC ή Grid Side Converter – GSC), καθένας από τους οποίους ελέγχεται ανεξάρτητα. Έχουμε δηλαδή τη κλασική τοπολογία μετατροπέα AC/DC/AC με τη δημιουργία DC link στη μέση με τη βοήθεια πυκνωτή. Και οι δύο μετατροπείς έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως ανορθωτές ή αναστροφείς, έχουμε δηλαδή έλεγχο τεσσάρων τεταρτημορίων.

Στο παρελθόν έχουν δοκιμαστεί και άλλες τοπολογίες μετατροπέων αλλά καμία δεν αποδείχθηκε τόσο επιτυχημένη όσο η παραπάνω [5]. Για παράδειγμα, η δημιουργία dc link με πηνίο (πηγή σταθερού ρεύματος) έχει τα μειονεκτήματα του μεγάλου κόστους του choke, του επιπλέον κυκλώματος που απαιτείται για πέρασμα και λειτουργία στη σύγχρονη ταχύτητα, χαμηλή απόδοση σε χαμηλές ολισθήσεις και την απαίτηση τετράγωνων κυματομορφών ρεύματος από το μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου. Επίσης, η χρήση κυκλομετατροπέα εμφανίζει έντονα αρμονικά ρεύματα και

απαιτεί επιπλέον κυκλώματα ελέγχου που να μπορεί να διορθώσουν το πρόβλημα, αλλά αυξάνουν τη πολυπλοκότητα του κυκλώματος.

Η βασική ιδέα του RSC, είναι ο έλεγχος της ενεργής και άεργου ισχύος ελέγχοντας το ρεύμα που εγχέουμε στο δρομέα, ενώ η κύρια εργασία του LSC είναι ο έλεγχος της τάσης του DC κλάδου (DC-link).

Ο μετατροπέας τάσης στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιεί ένα φίλτρο ισχύος με σκοπό να μειώσει τις αρμονικές ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10. Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ισχύος στη μεριά του δικτύου [6].

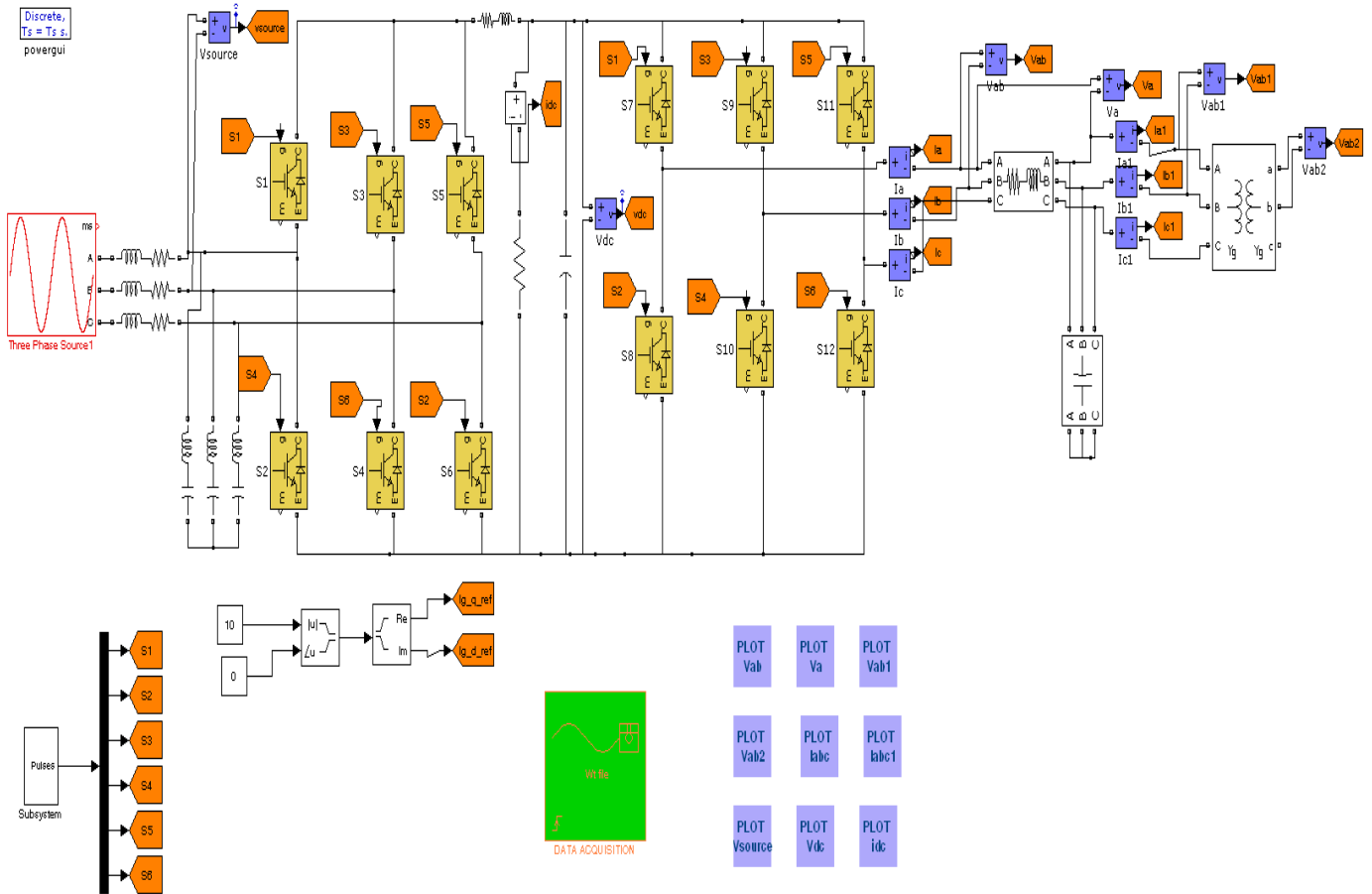
Στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι να κρατήσει την συνεχή τάση σε μια τιμή άσχετα με την ποσότητα και την κατεύθυνση της ισχύος του δρομέα και να εγγραφεί μια λειτουργία του μετατροπέα με μηδενική άεργο ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ανταλλάσσει ενεργή ισχύ μόνο με το δίκτυο και επομένως η μετάδοση της άεργης ισχύς από την ΓΕΔΤ στο δίκτυο γίνεται μόνο μέσω του στάτη. Η dc τάση και η άεργη ισχύ ελέγχονται έμμεσα από τον έλεγχο του ρεύματος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι να ελέγξει ανεξάρτητα την τιμή της ενεργή και άεργη ισχύς. Η ενεργή και άεργη ισχύς δεν ελέγχονται ευθέως αλλά έμμεσα ελέγχοντας το impressed ρεύμα του δρομέα.

### 3.2.1.1.1 Προσομοίωση του ηλεκτρονικού μετατροπέα του συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική -Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Τα παρακάτω σχήματα αναφέρονται στο μοντέλο που προσομοιώθηκε στο Simulink καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής.

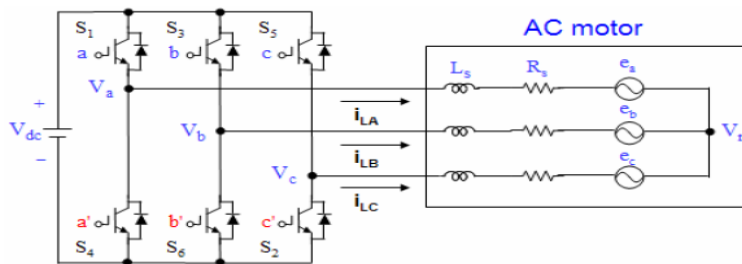




Σχήμα 11. Απεικόνιση μοντέλου μετατροπέα στο περιβάλλον Matlab/Simulink

**Παραμετρικά Στοιχεία Μοντέλου:**  $V=380V$ ,  $R=1\mu\Omega$ ,  $L=1\mu H$ ,  $L_{\text{φίλτρου}}=1mH$ ,  $C_{\text{φίλτρου}}=20mF$ ,  
 Ανορθωτής:  $V_{\text{εισ.ανορθ.}}=380V AC$ ,  $V_{\text{εξ.ανορθ.}}=512V$ ,  
 $R_{\text{σειρα}}=1m\Omega$ ,  $L=2mH$ ,  $R_{\text{par}}=24\Omega$ ,  $C_{DClink}=20mF$ ,  
 $R_{\text{φίλτρου}}=1\Omega$ ,  $L_{\text{φίλτρου}}=1\mu H$ ,  $C_{\text{φίλτρου}}=500\mu F$

Η τεχνική ελέγχου, που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο, είναι μια τροποποιημένη μορφή της τεχνικής Space Vector-PWM. Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι έχουμε το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 12. Αντιστροφέας με IGBT[6]

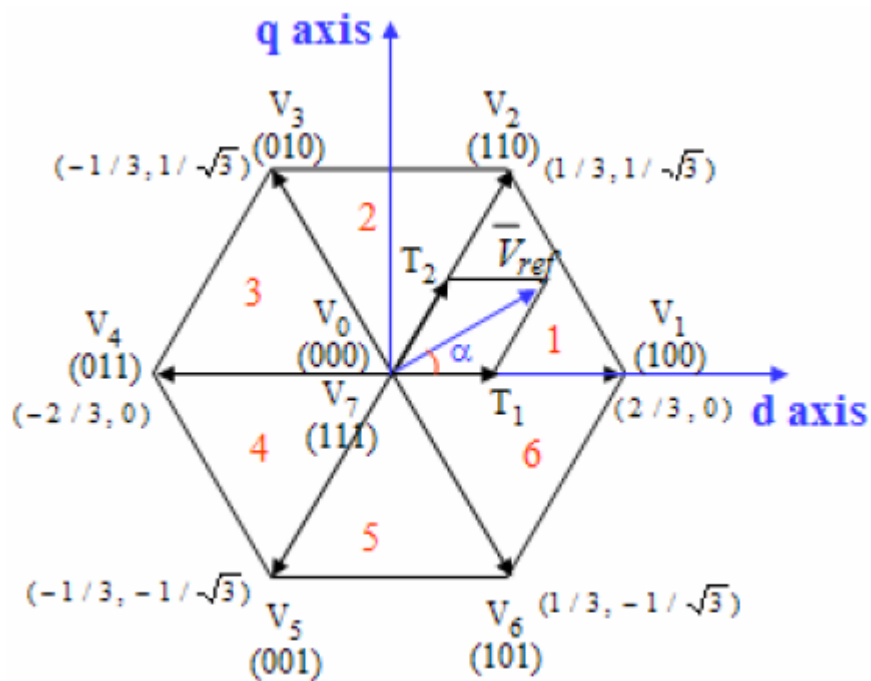
Όταν το πάνω τρανζίστορ είναι on, το αντίτιχο κάτω είναι off, άρα αρκούν οι καταστάσεις on off των τρανζίστορ  $S_1, S_3, S_5$  για να αποφασίσουμε ποια θα είναι η τάση εξόδου. Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Υπάρχουν, λοιπόν, 8 καταστάσεις on και off για τα πάνω τρανζίστορ. Οι καταστάσεις για τα κάτω τρανζίστορ είναι οι αντίθετες από αυτές των πάνω.

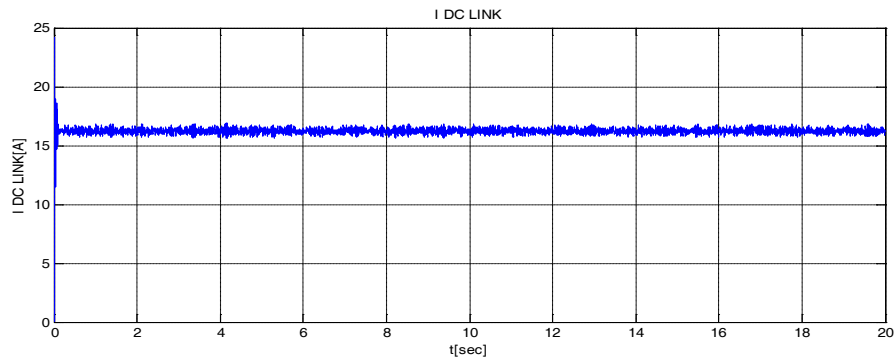
Στη συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου έχουμε μετασχηματισμό των τάσεων από το σύστημα abc στο σύστημα αβ και έπειτα στο σύστημα dq0 και καταλήγουμε στην παρακάτω απεικόνιση των διανυσμάτων:



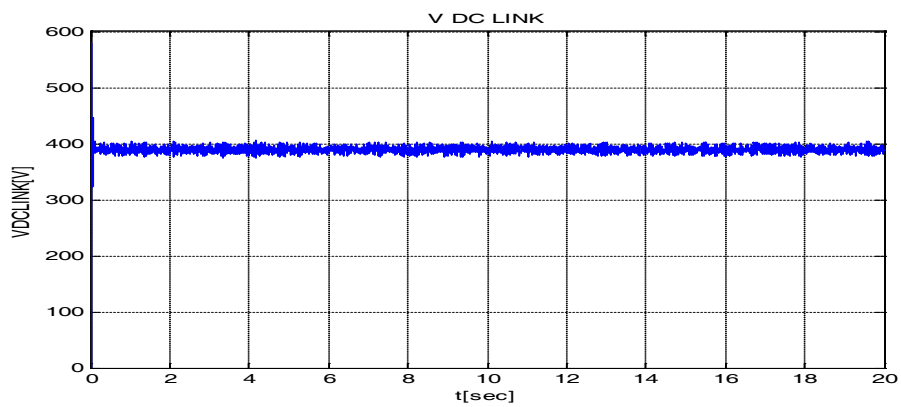
Σχήμα 13. Βασικά διανύσματα και τομείς.

Έπειτα, πρέπει να ακολουθήσουμε συγκεκριμένα βήματα για να δημιουργήσουμε την παλμοδότηση PWM. Πρώτα πρέπει να υπολογιστούν τα  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $V_{ref}$  και η γωνία  $\alpha$ , τα χρονικά διαστήματα  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_0$  καθώς και ο χρόνος αγωγής των τρανζίστορ ( $S_1$  έως  $S_6$ ). Έτσι καταλήγουμε διαγράμματα καταστάσεων αγωγής για έξι τομείς.

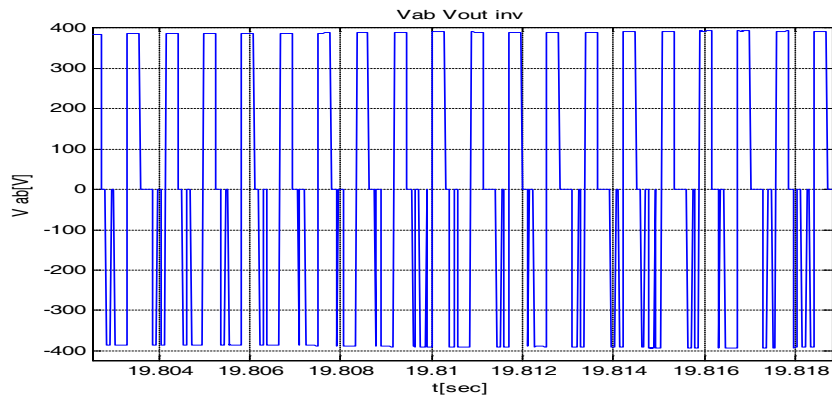
Προσομοιώνοντας το μοντέλο αυτό στο Simulink με τα παραπάνω δεδομένα, παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



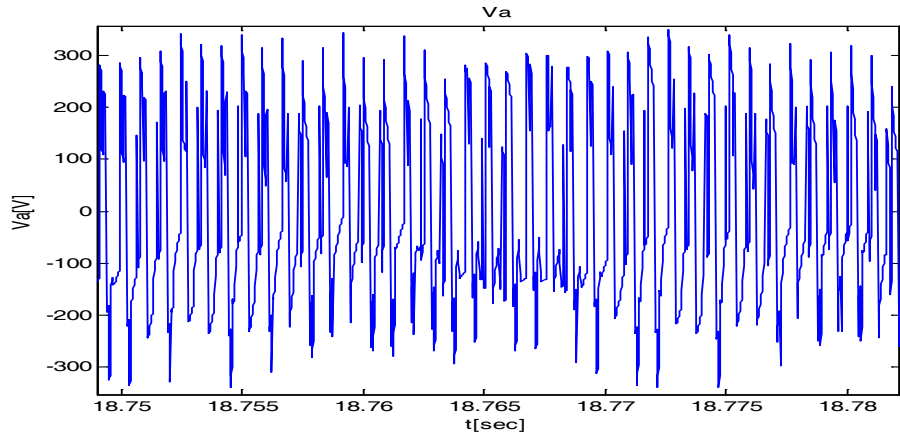
Σχήμα 14. Κυματομορφή του ρεύματος στον κλάδο συνεχούς τάσεως.



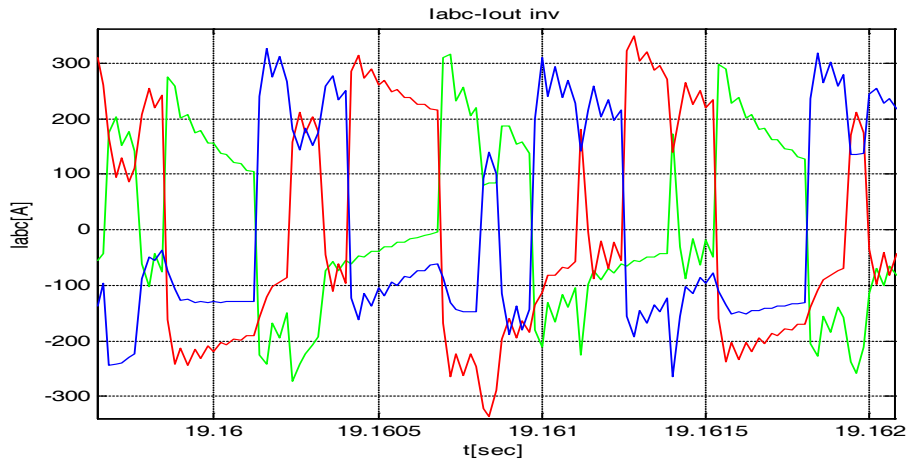
Σχήμα 15. Κυματομορφή συνεχής τάσεως.



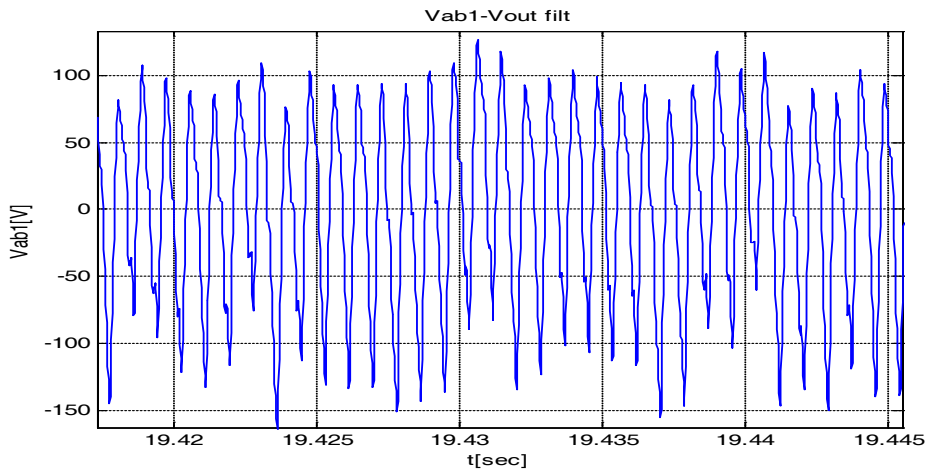
Σχήμα 16. Κυματομορφή τάσεως εφόδου αντιστροφεία.



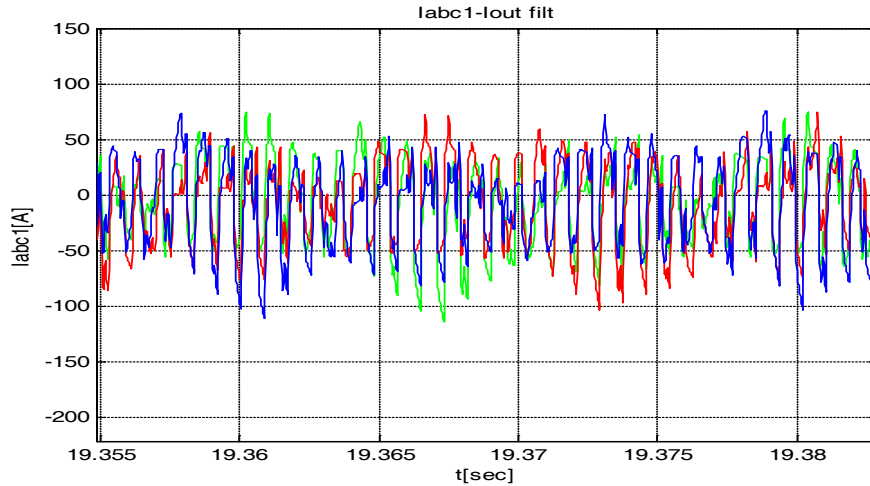
Σχήμα 17. Κυματομορφή Φασικής τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα.



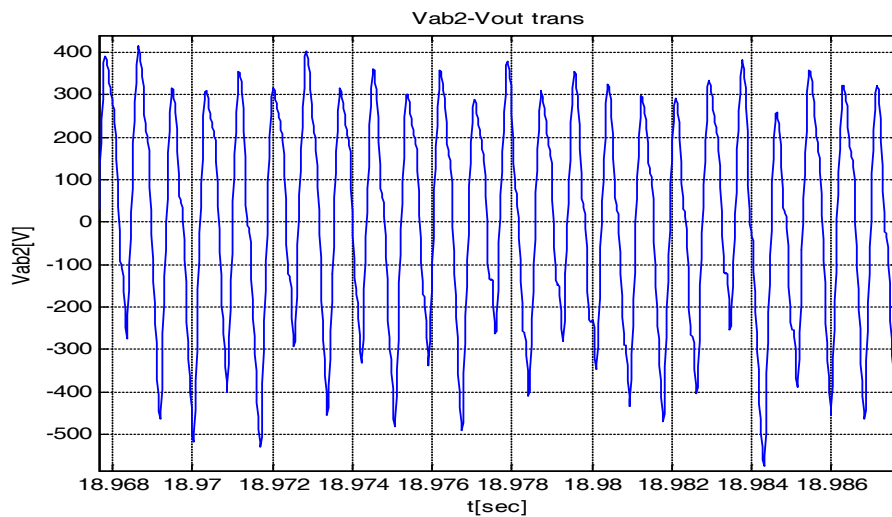
Σχήμα 18. Κυματομορφή Ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα.



Σχήμα 19. Κυματομορφή Τάσης στην έξοδο του φίλτρου.



Σχήμα 20. Κυματομορφή Ρεύματος στην έξοδο του φίλτρου.



Σχήμα 21. Κυματομορφή Τάσης στην έξοδο του μετασχηματιστή.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, διαπιστώνουμε ότι η χρήση της τεχνολογίας “CASCADE” στα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική έχει θετικές, αλλά και αρνητικές επιπτώσεις. Οι θετικές είναι, ότι έχουμε μεγαλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας καθόσον υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας σε μικρές ταχύτητες ανέμου. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι σε περίπτωση σφάλματος το σύστημα επανέρχεται σε μικρό χρονικό διάστημα (ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος είναι μικρός). Ακόμα, παρατηρούμε ότι οι κυματομορφές των βασικών μεγεθών (τάσεις και ρεύματα) είναι πολύ κοντά στις επιθυμητές (ημιτονοειδής μορφή). Επίσης, χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη τεχνολογία μπορούμε να πετύχουμε πολύ καλό έλεγχο του συστήματος. Έτσι, επιτυγχάνεται καλλίτερη μελέτη διαφόρων φαινομένων του συγκεκριμένου συστήματος, αλλά και εύρεση βέλτιστων λύσεων σε αυτά. Όμως, ένα μειονέκτημα που υπάρχει είναι ότι σε αυτά τα συστήματα εμφανίζονται ανώτερες αρμονικές στα

ρεύματα, οι οποίες είναι αρκετά έντονες σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Οι αρμονικές αυτές οφείλονται στη διακοπτική λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και αντιμετωπίζονται πλέον τοποθετώντας ένα φίλτρο μαζί με το μετατροπέα [16].

### 3.2.1.1.2 Φίλτρο Καταστολής Αρμονικών

Η διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα, έχει ως αποτέλεσμα έντονα αρμονικά ρεύματα, τα οποία στη περίπτωση του μετατροπέα που εξετάζουμε θα «μολύνουν» με αρμονικές το δίκτυο. Μιας και κάτι τέτοιο ως γνωστό είναι ανεπιθύμητο απαιτείται να χρησιμοποιηθεί φίλτρο για τον "καθαρισμό" των ρευμάτων. Τα δύο πιο διαδεδομένα φίλτρα γι' αυτόν τον σκοπό είναι τα απλά L φίλτρα και τα LC φίλτρα. Και τα δύο έχουν χαμηλοπερατή συμπεριφορά, με το μεν L να είναι πιο απλό και εύκολο στη δομή, αλλά να απαιτεί μεγαλύτερη επαγωγή ή υψηλότερη διακοπτική συχνότητα για την επιθυμητή εξασθένηση, το δε LC φίλτρο, προκαλεί καλύτερη εξασθένηση στις υψηλές συχνότητες, απαιτεί όμως πιο πολύπλοκο έλεγχο και σχεδιασμό. Στην παρούσα διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο LC. Για τον υπολογισμό των στοιχείων του ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

Επιλέγουμε τιμή για το L και το C. Μένει να εξετάσουμε την μέγιστη πτώση τάσης που μπορεί να προκαλέσει. Η μέγιστη ενεργός ισχύς για την οποία σχεδιάζουμε το μετατροπέα LSC χαρακτηρίζεται με P [W]. Έστω ότι επιλέγουμε τη φαινόμενη ισχύ του μετατροπέα S [VA]. Στη μέγιστη φόρτιση, λοιπόν, ο μετατροπέας μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

Το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα έχει τιμή I. Επομένως, ισχύει

$$V_2 = j\omega LI + V_1,$$

(5)

από όπου βρίσκουμε το  $V_1$ . Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την πτώση τάσης σύμφωνα με τον τύπο:

$$\frac{V_1 - V_2}{V_2} \quad (6)$$

και τη συγκρίνουμε με κάποια τιμή αναφοράς π. χ. 3% (αν είναι μικρότερο οι τιμές του φίλτρου είναι αποδεκτές).

### 3.2.1.2 Σύγκριση Συστημάτων Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας σε Ηλεκτρική-Ανάδειξη του ρόλου της ΓΕΔΤ στις εφαρμογές

Κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών (ΣΣΣΣΣ-ΣΣΜΣ), παρατηρούμε ότι οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας είναι απλές στην κατασκευή και έτσι τείνουν να είναι φτηνότερες από αυτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της μεταβλητής ταχύτητας. Εντούτοις, δεδομένου ότι δεν μπορούν να ακολουθήσουν την πάντα μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου, η

μετατροπή της ενέργειας δεν είναι τόσο αποδοτική όσο στα συστήματα σταθερής ταχύτητας. Όπως είναι γνωστό, ένας ανεμοκινητήρας έχει το μέγιστο συντελεστή ισχύος ( $C_p$ ) στην καθορισμένη από τον κατασκευαστή τιμή του λόγου ακροπτερυγίου του (tip speed ratio). Για τη λειτουργία με σταθερή ταχύτητα, αυτός ο μέγιστος συντελεστής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική με την τοπολογία «CASCADE».

Η τεχνολογία με ΓΕΔΤ εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα γι' αυτό και είναι ιδιαίτερος δημοφιλής επιλογή για μεγάλα αιολικά πάρκα. Μέσω του μετατροπέα, δίνεται η δυνατότητα ξεχωριστού ελέγχου της ενεργής και άεργης ισχύος που παράγει ή καταναλώνει η μηχανή. Με βάση τα αυστηρά πλαίσια απαιτήσεων που θέτουν οι διαχειριστές των δικτύων, αυτή η ιδιότητα αποδεικνύεται πάρα πολύ σημαντική για τις δυνατότητες στήριξης της τάσης του δικτύου.

Η ΓΕΔΤ δεν είναι απαραίτητο να μαγνητιστεί από το δίκτυο απαιτώντας άεργο ισχύ από αυτό, αλλά μπορεί να εξασφαλίσει το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης μέσα από το κύκλωμα του δρομέα (τροφοδοσία με κατάλληλα ρεύματα). Ως αποτέλεσμα, οι συστοιχίες των πυκνωτών που απαιτούνται από τις ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού να μην χρειάζονται εδώ με συνεπακόλουθο οικονομικό όφελος.

Η διαστασιολόγηση του μετατροπέα δεν σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με την επιθυμητό ποσοστό μεταβολής στη ταχύτητα λειτουργίας και επομένως με την ισχύ που μεταφέρεται μέσω του δρομέα. Δηλαδή, για μέγιστη διακύμανση ταχύτητας 30% πάνω και κάτω από τη σύγχρονη, ο μετατροπέας πρέπει να διαστασιολογηθεί μόνο στο 30% της συνολικής ισχύος της μηχανής (αφήνοντας και κάποιο περιθώριο ωστόσο για δυναμικά φαινόμενα) με συνεπακόλουθο οικονομικό κέρδος. Η επιλογή λοιπόν του εύρους ταχύτητας προέρχεται από την οικονομική αξιολόγηση του αυξημένου κόστους που απαιτείται για μεγαλύτερο εύρος ταχύτητας και της αυξημένης παραγόμενης ενέργειας που ένα τέτοιο εύρος προσφέρει.

Ένα σημαντικό επίσης πλεονέκτημα της ΓΕΔΤ είναι η διαδικασία εκκίνησης και συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο. Ο συγχρονισμός είναι γρήγορος και εύκολος γιατί μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε ταχύτητα  $\omega_T = \omega_1 (1 - |s_{max}|)$  ελέγχοντας το μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα και επιδιώκοντας να συγχρονίσει τις τάσεις του στάτη και του δικτύου τόσο σε μέτρο όσο και σε φάση. Η όλη διαδικασία είναι σύντομη μιας και τα ρεύματα του δρομέα ελέγχονται γρήγορα, χωρίς να απαιτείται κανένας έλεγχος και συμβολή του μηχανικού μέρους ελέγχου της μηχανής (pitch control).

Μειονέκτημα της γεννήτριας είναι η αναπόφευκτη χρήση δακτυλιδιών - ψηκτρών στο κύκλωμα του δρομέα, που πέρα από τις απώλειες που εισάγουν, η φθορά τους απαιτεί συχνό έλεγχο και συντήρηση. Επιπλέον, απαιτεί κυκλώματα αυξημένης προστασίας των μετατροπέων σε περιπτώσεις σφαλμάτων.

Στη συνέχεια, πρέπει να αναφερθεί ότι με βάση τα στοιχεία, που έχουν προκύψει από διάφορες μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με τα διάφορα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, έχει αναδειχθεί ότι ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννητριών, δηλαδή με χρήση ΓΕΔΤ, διαδραματίζει ολοένα και περισσότερο σημαντικό ρόλο στο κομμάτι της αιολικής ενέργειας. Τα στοιχεία αυτά είναι πχ. τα κατασκευαστικά στοιχεία του ανεμοκινητήρα, τα αντίστοιχα της γεννήτριας, των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται, καθώς και στοιχεία που αφορούν το

οικονομικό κομμάτι-με λίγα λόγια το κόστος των επιμέρους τμημάτων, αλλά και το συνολικό κόστος του εκάστοτε συστήματος. Όλα αυτά τα στοιχεία έχουν συγκεντρωθεί σε πίνακες, προκειμένου να γίνει η σύγκριση αυτή. Επίσης, έχουν γίνει μελέτες και για την αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών κυρίως με οικονομικά κριτήρια. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το σύστημα με ΓΕΔΤ είναι οικονομικό στην κατασκευή του, έχει λιγότερες απώλειες, άρα μεγαλύτερη απόδοση και καλύτερο λόγο απόδοση προς κόστος [18], [19]. Έτσι μπορούμε να δικαιολογήσουμε τα πλεονεκτήματα της χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας στα αιολικά πάρκα και ειδικά μεγάλης ισχύος, τα περισσότερα από τα οποία αναφέρθηκαν και παραπάνω. Επίσης, μπορεί να γίνουν εύκολα αντιληπτοί και οι λόγοι, που έχουν οδηγήσει στην ολοένα και μεγαλύτερη χρήση αυτής της τεχνολογίας στα αιολικά πάρκα που κατασκευάζονται τα τελευταία χρόνια και να δικαιολογηθεί το όλο και πιο έντονο ενδιαφέρον για επιστημονική έρευνα στο πεδίο αυτό.

### **3.2.1.3 Τύποι Αιολικών Συστημάτων**

Οι τύποι των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται παρακάτω είναι :

#### **Τύπος Α**

Τύπου Α είναι οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, συνδεδεμένες κατ' ευθείαν στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή. Επίσης, η σύνδεση με το δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί ομαλά μέσω ενός soft-starter. Ο τύπος αυτός είναι γνωστός και ως 'Δανική Ιδέα' (Danish Concept).

#### **Τύπος Β**

Στο τύπο αυτό ανήκουν ανεμογεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας μέσω της χρήσης εξωτερικών αντιστάσεων στο δρομέα. Έτσι η συνολική αντίσταση του δρομέα είναι μεταβαλλόμενη και η μεταβολή της ταχύτητας δεν ξεπερνά το 10%.

#### **Τύπος C**

Τύπου C, είναι οι ανεμογεννήτριες που εξετάσαμε στην παρούσα εργασία. Γνωστές όπως αναφέραμε και ως «Doubly-Fed Induction Generators (DFIGs)», περιλαμβάνουν γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα και μετατροπέα συχνότητας που συνδέει το δρομέα με το δίκτυο, διαστασιοποιημένος ωστόσο σε κλάσμα της συνολικής ισχύος της μηχανής. Μάλιστα το μέγεθος του μετατροπέα είναι ανάλογο με τη ρύθμιση ταχύτητας που επιθυμούμε. Συνήθως αυτή περιορίζεται στο +30% της βασικής.

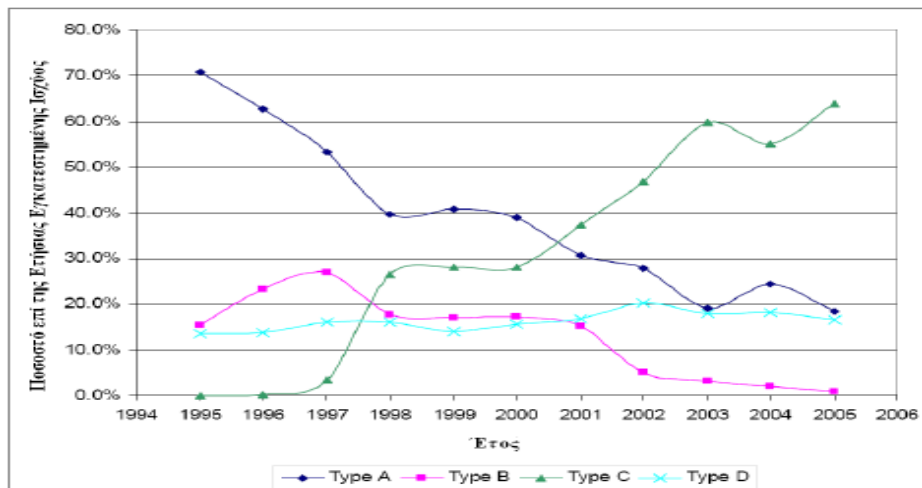
Βασίζεται στην, γνωστή από το μακρινότερο παρελθόν, ιδέα του Scherbius. Οι ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης (Doubly-Fed Induction Generators - εν συντομία DFIG) αποτελούν μεγάλο κομμάτι της αγοράς των ανεμογεννητριών όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες. Τα διαγράμματα έχουν παρθεί από την [14]. Η πρώτη του είδους ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε το 1996 από την εταιρία Tacke και είχε δυναμικότητα 1,5MW. Αμέσως μπήκαν στο παιχνίδι και οι άλλες



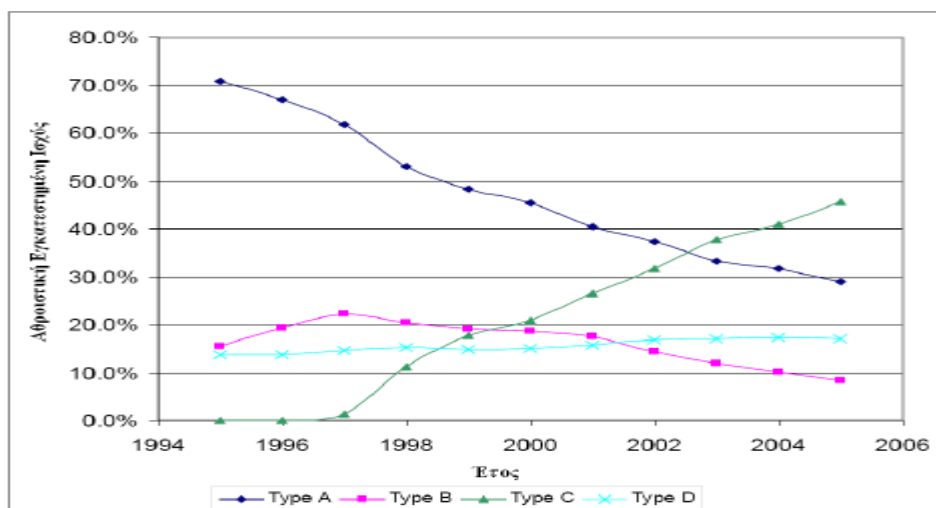
εταιρίες με μικρότερη ονομαστική ισχύ στην αρχή αλλά με το πέρασμα των χρόνων η ισχύ αυτή ολοένα και αυξάνεται. Από τα διαγράμματα γίνεται εμφανής ο κυρίαρχος ρόλος της DFIG στην αγορά.

## Τύπος D

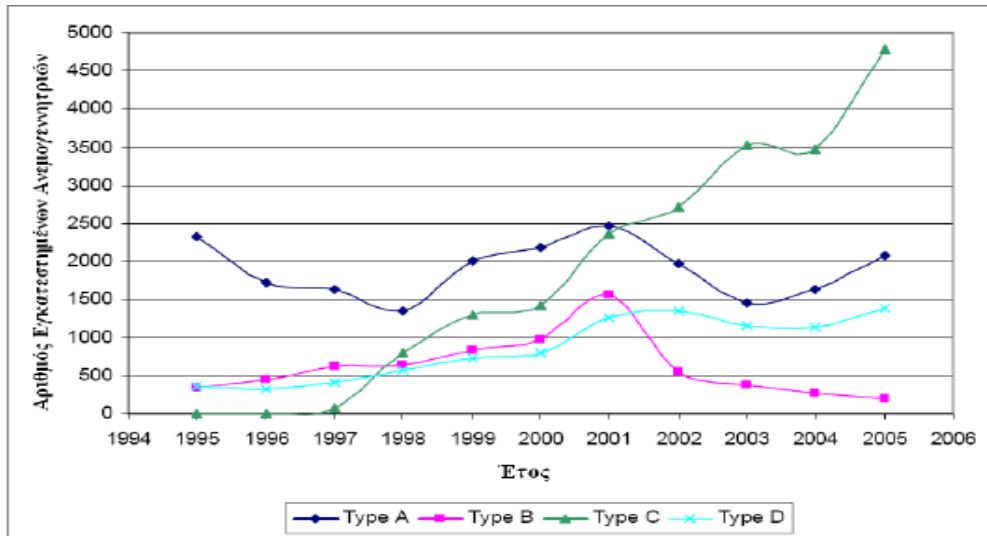
Στον τύπο αυτό περιλαμβάνονται οι ανεμογεννήτριες με έλεγχο ταχύτητας σε όλο το εύρος (από 0 έως 100% της σύγχρονης). Η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας μεταξύ στάτη και δικτύου. Η γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη, σύγχρονη με τύλιγμα στο δρομέα και σύγχρονη μόνιμου μαγνήτη. Πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου είναι η μέγιστη εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου και η δυνατότητα αποφυγής χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων. Μειονεκτεί ωστόσο εξαιτίας της απαίτησης μετατροπέα ισχύος διαστασιοποιημένο στη συνολική ισχύ της μηχανής, με αποτέλεσμα, να αυξάνει τόσο το κόστος αγοράς όσο και οι απώλειες στο μετατροπέα σε σχέση με τον τύπο C.



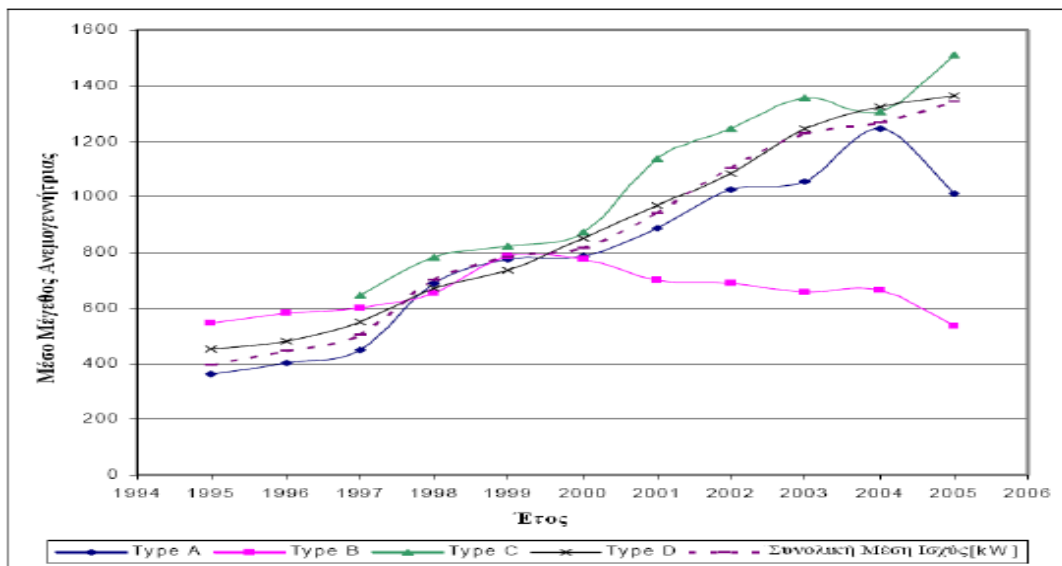
Σχήμα 22. Μερίδιο κάθε τύπου Α/Γ στη Συνολική Ετήσια Εγκατεστημένη Ισχύ[11]



Σχήμα 23. Αθροιστικό Μερίδιο στην Αγορά κάθε Τύπου Ανεμογεννήτριας με το Πέρασμα των Χρόνων[11]

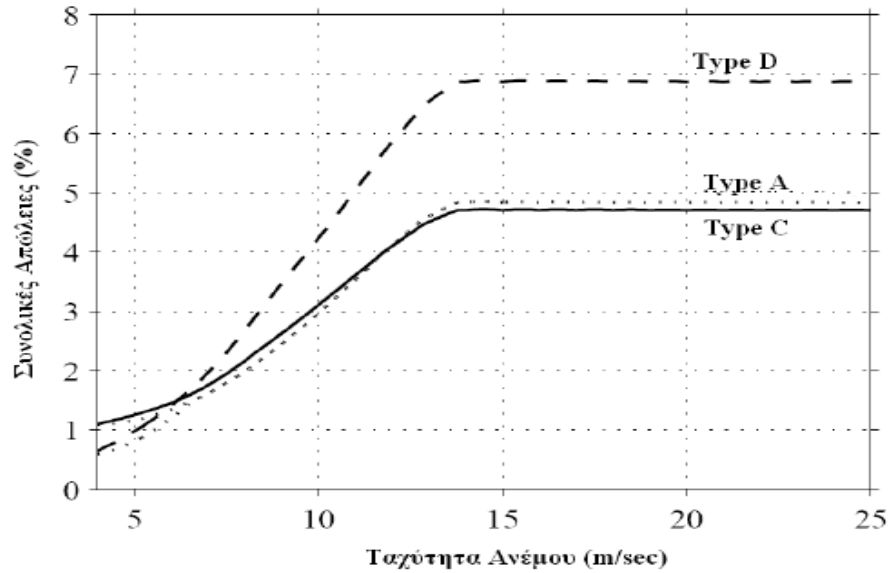


Σχήμα 25. Αριθμός Εγκατεστημένων Ανεμογεννητριών ανά Τύπο, ανά Έτος[11]

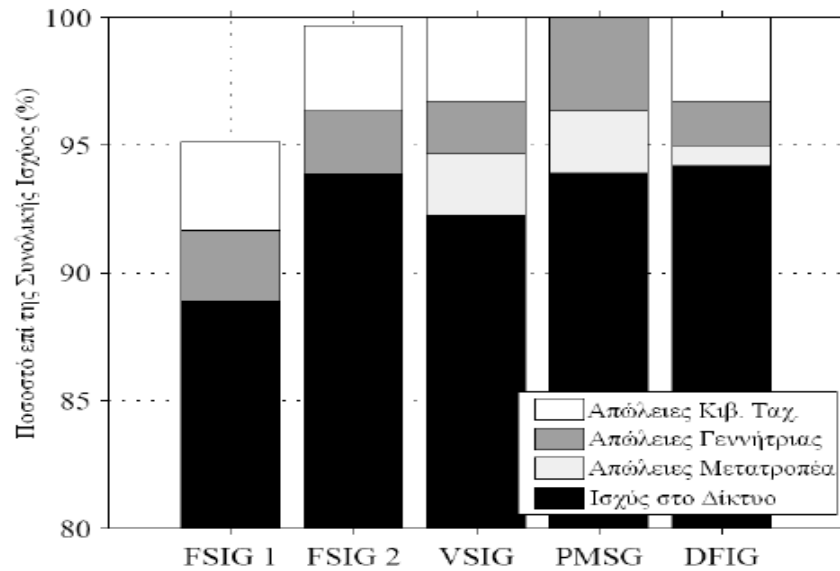


Σχήμα 26. Μέσο Μέγεθος Εγκατεστημένων Ανεμογεννητριών ανά Τύπο Μηχανής, ανά Έτος[11]

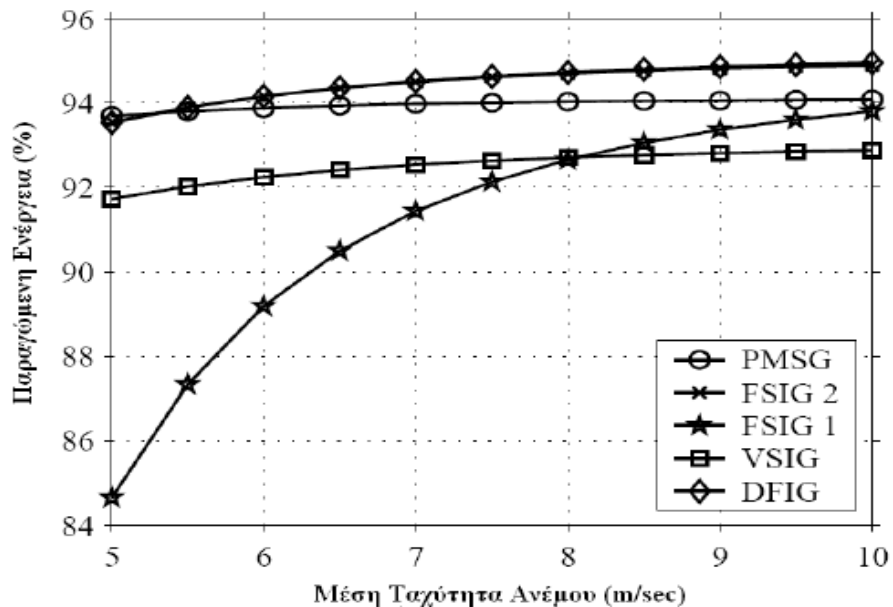
Οι ιδιαιτερότητες κάθε τύπου είναι λογικό να επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στη συνολική απόδοση του αιολικού συστήματος. Για παράδειγμα, ανεμογεννήτρια τύπου D έχει μειωμένες μηχανικές απώλειες λόγω μη χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων, αλλά έχει αυξημένες ηλεκτρικές απώλειες λόγω των απωλειών στο μετατροπέα ισχύος [23]. Παρατίθενται κάποια κατατοπιστικά διαγράμματα για τους τύπους των Α/Γ.



Σχήμα 27: Συνολικές Απώλειες ανά τύπο μηχανής. Οι απώλειες δίνονται ως ποσοστό της μέγιστης ισχύος στον άξονα της μηχανής [23]



Σχήμα 28: Κατανομή της αποσπώμενης από τον άνεμο ισχύος για μία μέση ταχύτητα 6m/sec. Το 100% αντιστοιχεί στην ισχύ για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή. **FSIG1**: Τύπου A, **FSIG2**: Τύπου A με μεταβλητό ζεύγος πόλων, **VSIG**: Τύπου D, **PMSG**: Τύπου D με Μόνιμους Μαγνήτες, **DFIG**: Τύπου C ([23])



Σχήμα 29: Αποδοτικότητα των Διαφόρων Τύπων Ανεμογεννητριών ως συνάρτηση της Μέσης Ταχύτητας Ανέμου. **FSIG1:** Τύπου A, **FSIG2:** Τύπου A με μεταβλητό ζεύγος πόλων, **VSI:** Τύπου D, **PMSG:** Τύπου D με Μόνιμους Μαγνήτες, **DFIG:** Τύπου C [23]

Οι μέχρι τώρα ενδείξεις της αγοράς καταδεικνύουν μεγάλη ζήτηση των τύπων C και D για το άμεσο μέλλον, ενώ το σύστημα pitch φαίνεται να εδραιώνεται ως το κυρίαρχο.

Οι λόγοι που προτιμούνται οι γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, ιδιαίτερα για μεγάλες ισχύεις είναι:

- Μειωμένα Μηχανικά Φορτία στην Ανεμο γεννήτρια (λιγότερο ανθεκτικές κατασκευές)
- Αυξημένη Μετατροπή Ενέργειας
- Μειωμένος Ακουστικός Θόρυβος
- Μεγάλες Δυνατότητες Ελέγχου που ίσως είναι και το κύριο μέλημα για μεγάλη αιολική διεύθυνση.

Τέλος, ο τύπος C φαίνεται να κυριαρχεί στην Αμερική, ενώ ο D είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στη Γερμανία.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε, αρχικά, μια αναφορά στις ΑΠΕ και στα αίτια που έχουν οδηγήσει στο έντονο ερευνητικό και επιχειρηματικό ενδιαφέρον για αυτές τα τελευταία χρόνια. Στις μέρες μας οι ΑΠΕ αποτελούν το βασικό μας όπλο για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και της ανεργίας. Εκτός αυτού, ειδικά στη χώρα μας, είναι ευνοϊκές οι συνθήκες ανάπτυξης των ΑΠΕ, εφόσον βρίσκεται σε πάρα πολύ καλή

γεωγραφική θέση, όπως αποδείχθηκε και από τα διάφορα στοιχεία που παρουσιάσηκαν για το αιολικό δυναμικό στη χώρα μας, αλλά και στον κόσμο.

Στη συνέχεια, έγινε μια αναφορά στα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας, που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στα αιολικά πάρκα ανά τον κόσμο και δώθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο σύστημα με Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας (ΓΕΔΤ-DFIG). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μια περιγραφή του συγκεκριμένου συστήματος και μελετήθηκε μέσω προσομοίωσης στο πρόγραμμα Matlab/Simulink η λειτουργική συμπεριφορά των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος (back-to-back AC-DC-AC converter), οι οποίοι αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της συγκεκριμένης τεχνολογίας («CASCADE»). Το μοντέλο, που αναπτύχθηκε στο Matlab/Simulink αποτελείται από έναν ανορθωτή και έναν αντιστροφέα με ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος IGBT με παραμετρικά στοιχεία από ένα πραγματικό αιολικό σύστημα. Με βάση τα αποτελέσματα από την προσομοίωση αυτή εξήχθησαν πολλά και σημαντικά συμπεράσματα για το τμήμα των μετατροπέων, αλλά κυρίως για τα πλεονεκτήματα από τη χρήση αυτών στα αιολικά συστήματα και ειδικά με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Παρατηρήθηκε, λοιπόν ότι με τη συγκεκριμένη τοπολογία μπορεί να επιτευχθεί αρκετά καλός έλεγχος του συστήματος (και σε μικρές ταχύτητες) και να παραχθεί στην έξοδο τάση συγκεκριμένης τιμής και συχνότητας. Εμφανίζονται κάποιες αρμονικές στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, αλλά είναι αρκετά μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται στην παραλλαγή της τοπολογίας με θυρίστορ και μπορούν να μειωθούν περαιτέρω με χρήση ενός φίλτρου. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι μετατροπείς διαστασιολογούνται για το 30% της συνολικής ισχύος με αποτέλεσμα να είναι μικρότεροι και φθηνότεροι, αλλά και ότι παρουσιάζουν μεγάλη ταχύτητα απόκρισης λόγω των στοιχείων IGBT, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι είναι μια εξαιρετική περίπτωση για χρήση στα αιολικά πάρκα.

Τέλος, παρατέθησαν διάφορα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία, τα οποία έχουν προκύψει από μελέτες που έχουν γίνει σχετικά για το συγκεκριμένο αιολικό σύστημα και ήταν ικανά, ώστε να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας («CASCADE»), αλλά και ο λόγος που η συγκεκριμένη τοπολογία γνωρίζει ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, καθώς και έντονο ενδιαφέρον για έρευνα. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι η σημαντική βελτίωση στην απόδοση ενός αιολικού συστήματος, το οποίο χρησιμοποιεί το σύστημα «CASCADE» και κυρίως η μείωση του κόστους του.

## **ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ/ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1]. Wind Power in Power Systems, Thomas Ackermann, John Wiley & Sons, Ltd [2] Variable Speed Generators, Ion Boldea, CRC Press
- [2]. Power Electronics for Modern Wind Turbines, Frede Blaabjerg & Zhe Chen, Morgan & Claypool Publishers
- [3]. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, Siengfried Heier, John Wiley & Sons, Ltd
- [4]. Ηλεκτρονικά Ισχύος, Α. Ν. Σαφάκας, Εκδ. Πανεπιστημίου Πατρών, 2004.

- [5]. R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher , "Doubly Fed Induction Generator using back-to -back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 143, pp. 231-241, May 1996
- [6]. R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", *IEE Proc., Electr. Power Appl.* -- September 1996 -- Volume 143, Issue 5, p.380-387
- [7]. Vladislav Akhmatov, "Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators, Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools", *Wind Engineering* Volume 26, Number 2/March 2002.
- [8]. Vladislav Akhmatov, "Variable-speed Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generators Part II: Power System Stability", *Wind Engineering* Volume 26, Number 3/May 2002.
- [9]. Vladislav Akhmatov, "Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators Part III: Model with the Back-to-back Converters", *Wind Engineering*, Volume 27, Number 2/ March 2003
- [10]. Vladislav Akhmatov, "Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators. Part IV: Uninterrupted operation features at grid faults with converter control coordination", *Wind Engineering* Volume 27, Number 6/ December 2003
- Yifan Tang and Longya Xu, "A flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol 10, No. 4, July 1995
- [11]. Anca D. Hansen & Lars H. Hansen, "Market Penetration of Wind Turbine Concepts over the Years", *:internet*
- [12]. E. Μητρονίκας, E. Τατάκης και Α. Σαφάκας, "Σύγχρονες Τεχνικές στο Διανυσματικό Έλεγχο Ασύγχρονων Κινητήρων", ΔΙΗΜΕΡΟ ΤΕΕ: «Τεχνολογία και βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος - βιομηχανικά ηλεκτρονικά», Αθήνα 28-29 Σεπτεμβρίου 2000.
- [13]. Schulz S., R. Doebbelin, and A. Lindemann (2009). Investigation of Coupling of EMC Disturbances in Doubly Fed Induction Generators. *PIERS Proceedings*. Moscow, Russia. August 18-21.
- [14]. Henk Polinder, *Member, IEEE*, Frank F. A. van der Pijl, Gert-Jan de Vilder, and Peter J. Tavner, "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator-Concepts for Wind Turbines", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 21, NO. 3, SEPTEMBER 2006
- [15]. S . MÜLLER, M. DEICKE, & R I K W. DE DONCKER, "DGIG for Wind Turbines- A virable alternative to ADJUST SPEED over a wide range at MINIMAL COST", *IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE*, MAY|JUNE 2002.
- [16]. S. Schulz, R. Doebbelin, and A. Lindemann: «Investigation of Coupling of EMC Disturbances in Doubly Fed Induction Generators», *PIERS Proceedings*, Moscow, Russia, August 18{21, 2009.
- [17]. R.A.F. Currie, G.W. Ault and J.R. McDonald, "Methodology for determination of economic connection capacity for renewable generator connections to distribution networks optimized by active power flow management", *IEE Proc.–Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 153, No. 4, July 2000.

- [18]. Shrestha G., Polinder H., Bang D.J., Ferreira J.A., “Review of Energy Conversion System for Large Wind Turbines”.
- [19]. D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, J.A. Ferreira, “Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines”.
- [20]. Simin Jiang, Jiangang Liang, Yadong Liu, Kazuo Yamazaki, Makoto Fujishima, “Modeling and Cosimulation of FPGA-Based SVPWM Control for PMSM”, 0-7803-9252-3/05/\$20.00 ©2005 IEEE.
- [21]. Satean Tunyasirirut, Sompong Srilad and Tianchai Suksri, “Comparison Power Quality of the Voltage Source Inverter type SVPWM and SPWM Technique for Induction motor Drive”, SICE Annual Conference 2008, August 20-22, 2008, The University Electro-Communications, Japan.
- [22]. RAMAN NAIR HARISH GOPALA PILLAI, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF EMBEDDED DSP CONTROLLERS FOR POWER ELECTRONIC APPLICATIONS”, THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, May 2006, MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL ENGINEERING.
- [23]. Adreas Petersson, "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines", Chalmers University of Technology, Sweden 2005, διδακτορική διατριβή.
- [24]. Τσούμας, Ι. (2007). Δυναμική ανάλυση και ανάπτυξη μεθόδων διάγνωσης σφαλμάτων ελεγχόμενου κινητηρίου συστήματος αποτελούμενου από ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα και ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Διδακτορική διατριβή. Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα, 2007.
- [25]. JIN-WOO JUNG, PH.D STUDENT, PROF. ALI KEYHANI, ADVISOR, “PROJECT #2 SPACE VECTOR PWM INVERTER”, FEBRUARY 20, 2005, διαδίκτυο.
- [26]. PIER PROJECT REPORT: «IMPACT OF PAST, PRESENT AND FUTURE WIND TURBINE TECHNOLOGIES ON TRANSMISSION SYSTEM OPERATION AND PERFORMANCE», MAY 2006.
- [27]. E. Muljadi, C.P. Butterfield, D. Handman: «Dual-Speed Wind Turbine Generation», Prepared for AYEА Windpower '96 Denver, Colorado, June 23-27, 1996.
- [28]. [www.windpower.org](http://www.windpower.org). Δικτυακός τόπος Δανέζικου Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας. 17/11/2006.
- [29]. <http://www.cres.gr> Δικτυακός τόπος Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 2006.
- [30]. [www.whyfiles.org](http://www.whyfiles.org), Δικτυακός τόπος, 2006.