



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά μαθήματα ΠΠ

Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού

Ενότητα 7: Λειτουργία α/γ για ηλεκτροπαραγωγή

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Φυσικής



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



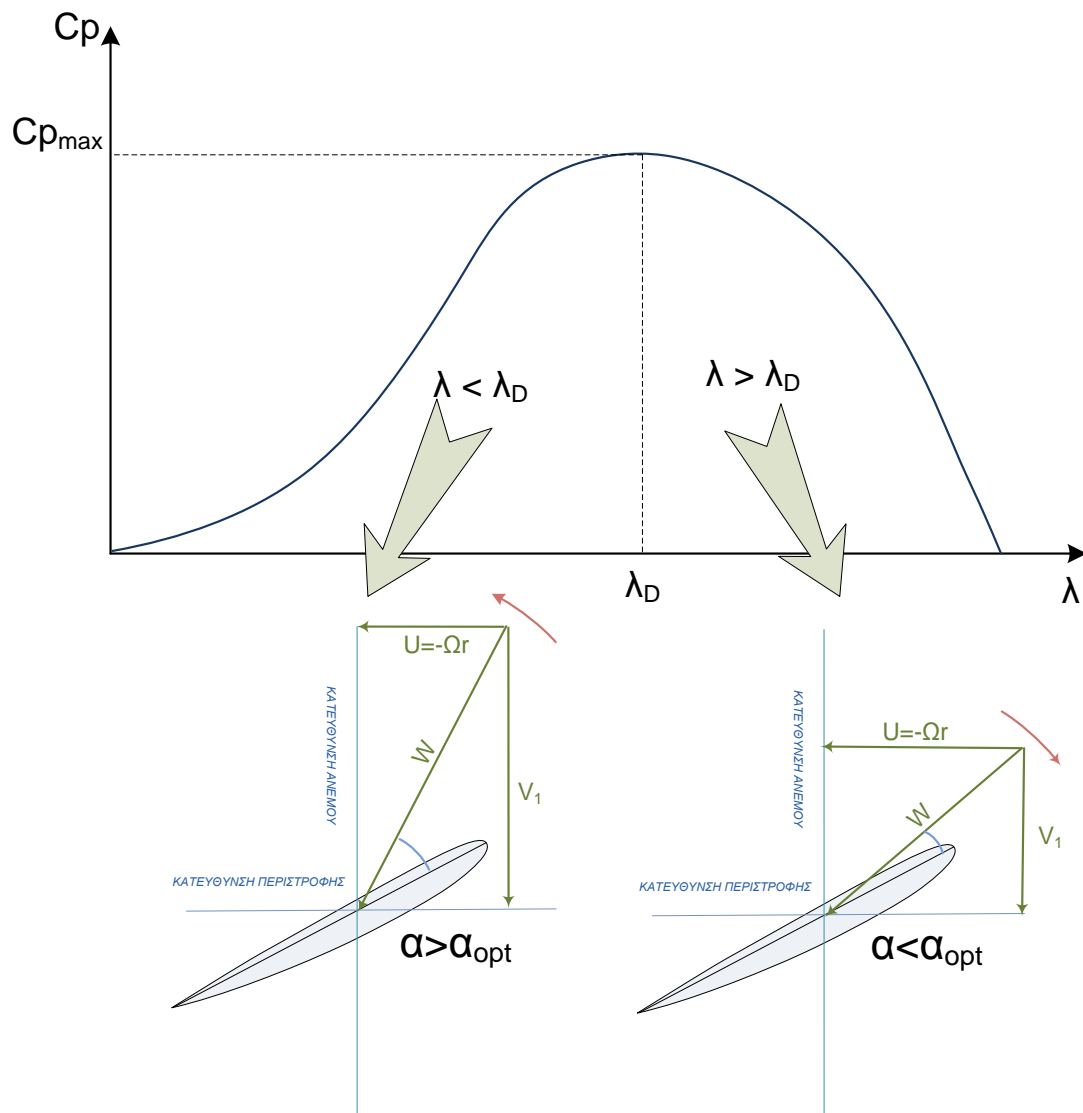
Σκοποί ενότητας

- Συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda)$
- Καμπύλη ισχύος $P(\Omega)$
- Καμπύλη $P(V)$ και ενεργειακοί υπολογισμοί
- Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος
 - Παθητικές μέθοδοι
 - Ενεργητικές μέθοδοι
- Ηλεκτρικές μηχανές: Σύγχρονες – Ασύγχρονες γεννήτριες
- Ηλεκτρικές μηχανές: Σταθερή και μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα
- Καμπύλες απόδοσης αιολικών μηχανών

Περιεχόμενα

- Συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda)$
- Καμπύλη ισχύος $P(\Omega)$
- Καμπύλη $P(V)$ και ενεργειακοί υπολογισμοί
- Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος
 - Παθητικές μέθοδοι
 - Ενεργητικές μέθοδοι
- Ηλεκτρικές μηχανές: Σύγχρονες – Ασύγχρονες γεννήτριες
- Ηλεκτρικές μηχανές: Σταθερή και μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα
- Καμπύλες απόδοσης αιολικών μηχανών

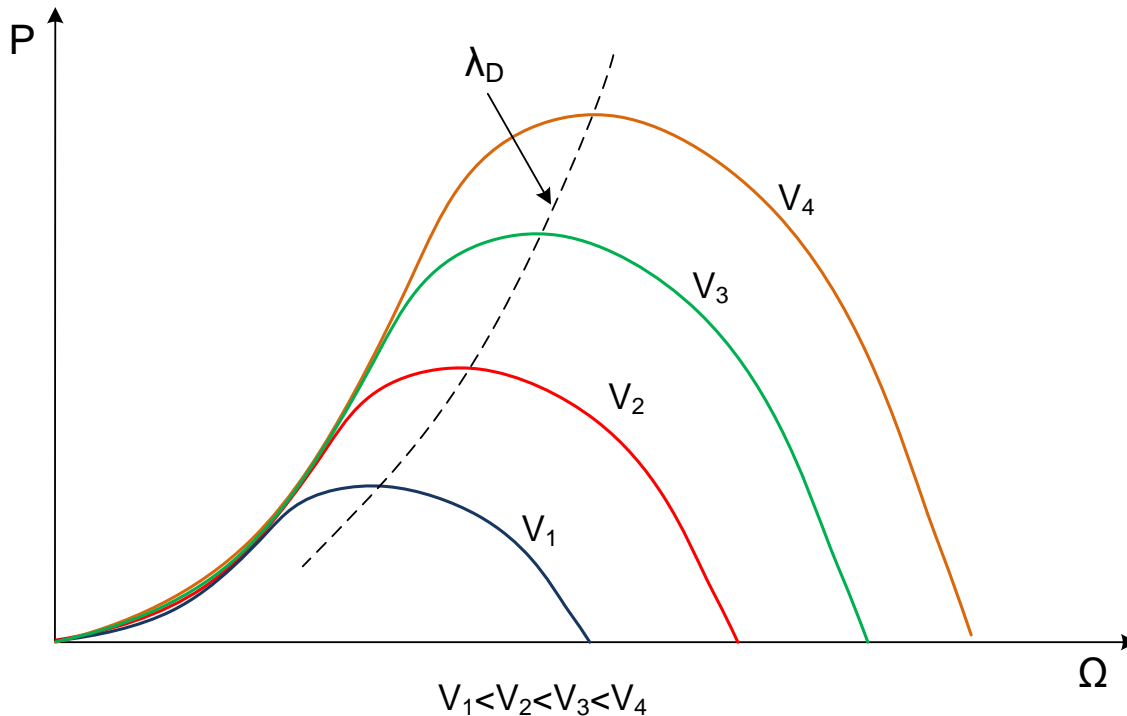
Συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda)$



- Η **μέγιστη τιμή** του συντελεστή ισχύος $C_{p, max}$ δίδεται για λ_D .
- Για $\lambda < \lambda_D$, που μπορεί να επέλθουν είτε με αύξηση της V_0 είτε με μείωση της Ω , η γωνία προσβολής **αυξάνεται** και η ισχύς μειώνεται.
- Για $\lambda > \lambda_D$, που μπορεί να επέλθουν είτε με μείωση της V_0 είτε με αύξηση της Ω , η γωνία προσβολής **ελαττώνεται** και η ισχύς μειώνεται και πάλι.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

Καμπύλη Ισχύος $P(\Omega)$



Από την καμπύλη $C_p(\lambda)$, μπορούμε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p V_0^3 A_1 \quad \lambda = \frac{\Omega R}{V_0} \text{ να}$$

κατασκευάσουμε τις καμπύλες λειτουργίας της μηχανής $P(\Omega)$ για διάφορες τιμές της ταχύτητας ανέμου: Για να παράγει η ανεμογεννήτρια τη μέγιστη ισχύ για κάθε τιμή της ταχύτητας ανέμου, **πρέπει να λειτουργεί στο σημείο λ_D** και συνεπώς η **γωνιακή ταχύτητα Ω πρέπει να μεταβάλλεται με την V .**

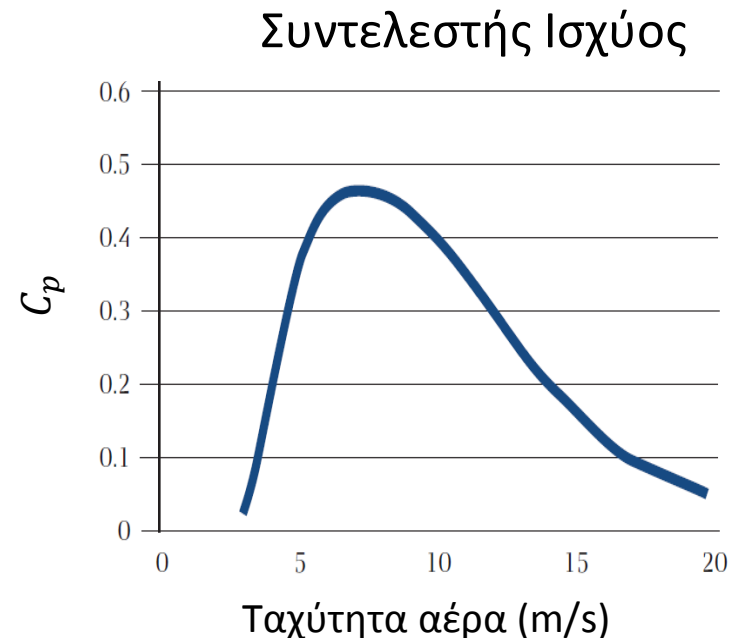
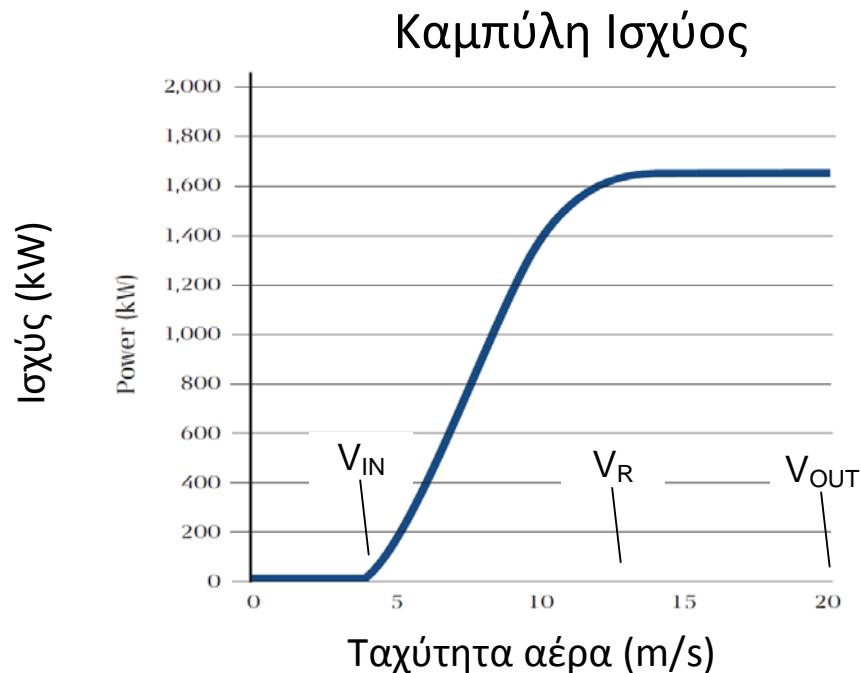
Για να παράγει η ανεμογεννήτρια τη μέγιστη ισχύ για κάθε τιμή της ταχύτητας ανέμου, **πρέπει να λειτουργεί στο σημείο λ_D** και συνεπώς η **γωνιακή ταχύτητα Ω πρέπει να μεταβάλλεται με την V .**

Ανάλογα με το **φορτίο** που συνδέεται στην Α/Γ αλλά και τους **μηχανισμούς ελέγχου της**, προκύπτει η καμπύλη $P(V)$.

Καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) και ενεργ. υπολογισμοί (1)

Υπάρχουν τρεις τιμές της ταχύτητας ανέμου που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας

- **Η ταχύτητα εισόδου (cut-in) V_{IN}** στην οποία αρχίζει να παράγεται ηλεκτρική ισχύς.
- **Η ονομαστική (rated) ταχύτητα V_R** στην οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς P_R και:
- **Η ταχύτητα εξόδου (cut-out) V_{OUT}** στην οποία σταματάει η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.



Καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) και ενεργ. υπολογισμοί (2)

Οι τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες χωρίζουν την καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) σε δύο περιοχές:

- **Την περιοχή μερικής ισχύος**, όπου $0 < P_{\eta\lambda} < P_R$ για ταχύτητες $V_{IN} < V < V_R$.
- **Την περιοχή ονομαστικής ισχύος**, όπου $P_{\eta\lambda} = P_R$ για ταχύτητες $V_R < V < V_{OUT}$.

Όπως ήδη αναφέραμε, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί διαφορετικά σε κάθε περιοχή και εφαρμόζονται διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου της:

- **Μεγιστοποίηση** της $P_{\eta\lambda}$ στην περιοχή μερικής ισχύος
- **Διατήρηση** της P_R σταθερής στην περιοχή ονομαστικής ισχύος.

$P_{\eta\lambda}$ από την ταχύτητα ανέμου στην περιοχή μερικής ισχύος μπορεί να εκφραστεί (κατά προσέγγιση) με την παρακάτω σχέση:

$$P_{\eta\lambda} (V) = P_R \frac{V^2 - V_{IN}^2}{V_R^2 - V_{IN}^2}, \quad V_{IN} \leq V \leq V_R$$

Η $P_{\eta\lambda}$ είναι ανάλογη του V^2 και όχι του V^3 όπως ισχύει για τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου

Καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) και ενεργ. υπολογισμοί (3)

Αυτή η **υστέρηση** οφείλεται στο γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με **μειωμένη απόδοση** τόσο στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου όσο και στη V_R λόγω **περιορισμών** που τίθενται από το ηλεκτρικό δίκτυο (πχ σταθερή τάση και συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος).

Η **ονομαστική ηλεκτρική ισχύς** που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

$$P_R = \frac{1}{2} \rho \left[\eta_{\mu\eta\chi} \eta_{\eta\lambda} C_p \right] V_R^3 \left((\pi R^2) \right) = \frac{1}{2} \rho \eta_{o\lambda} V_R^3 \left((\pi R^2) \right)$$

Οι ποσότητες μέσα στην αγκύλη εκφράζουν την συνολική απόδοση $\eta_{o\lambda}$ της μηχανής που εξαρτάται από:

- την **αεροδυναμική απόδοση C_p** κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική (περιστροφή του ρότορα),
- την **απόδοση $\eta_{\mu\eta\chi}$** του μηχανικού συστήματος μετάδοσης, δηλαδή των εφέδρανων (ρουλεμάν) και του κιβωτίου ταχυτήτων και
- την **απόδοση $\eta_{\eta\lambda}$** του ηλεκτρικού συστήματος (ηλεκτρογεννήτρια και ηλεκτρονικά ισχύος).

Καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) και ενεργ. υπολογισμοί (4)

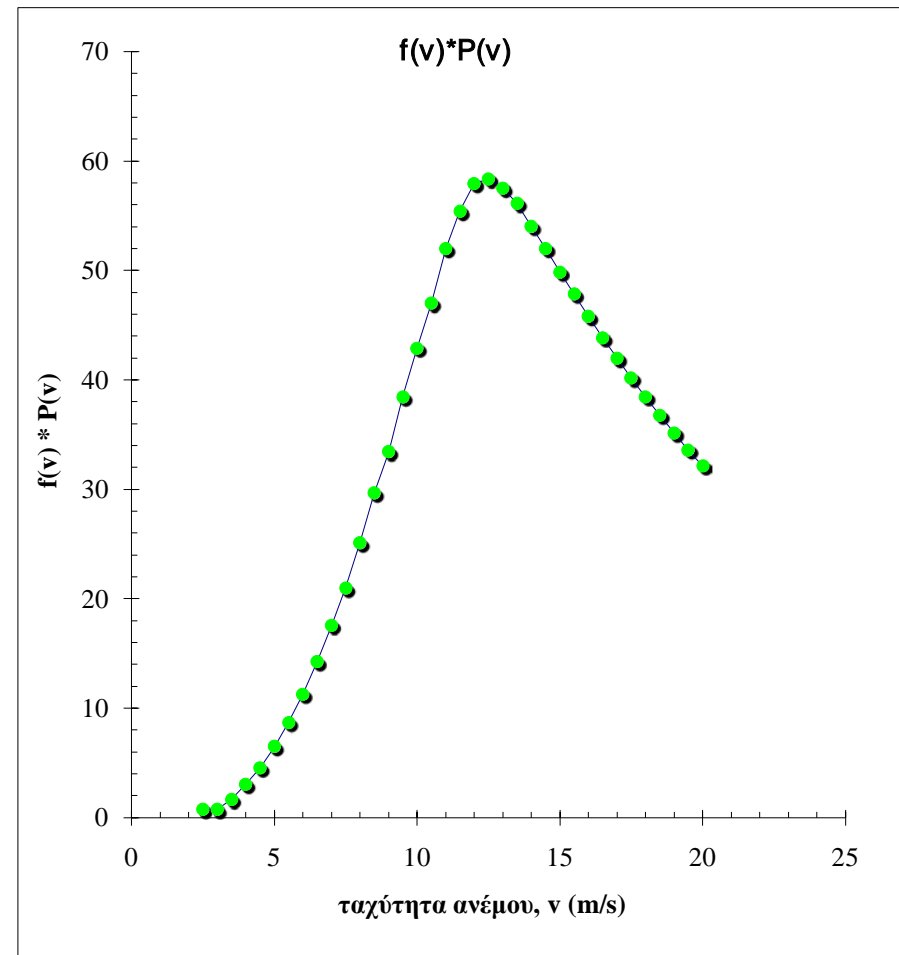
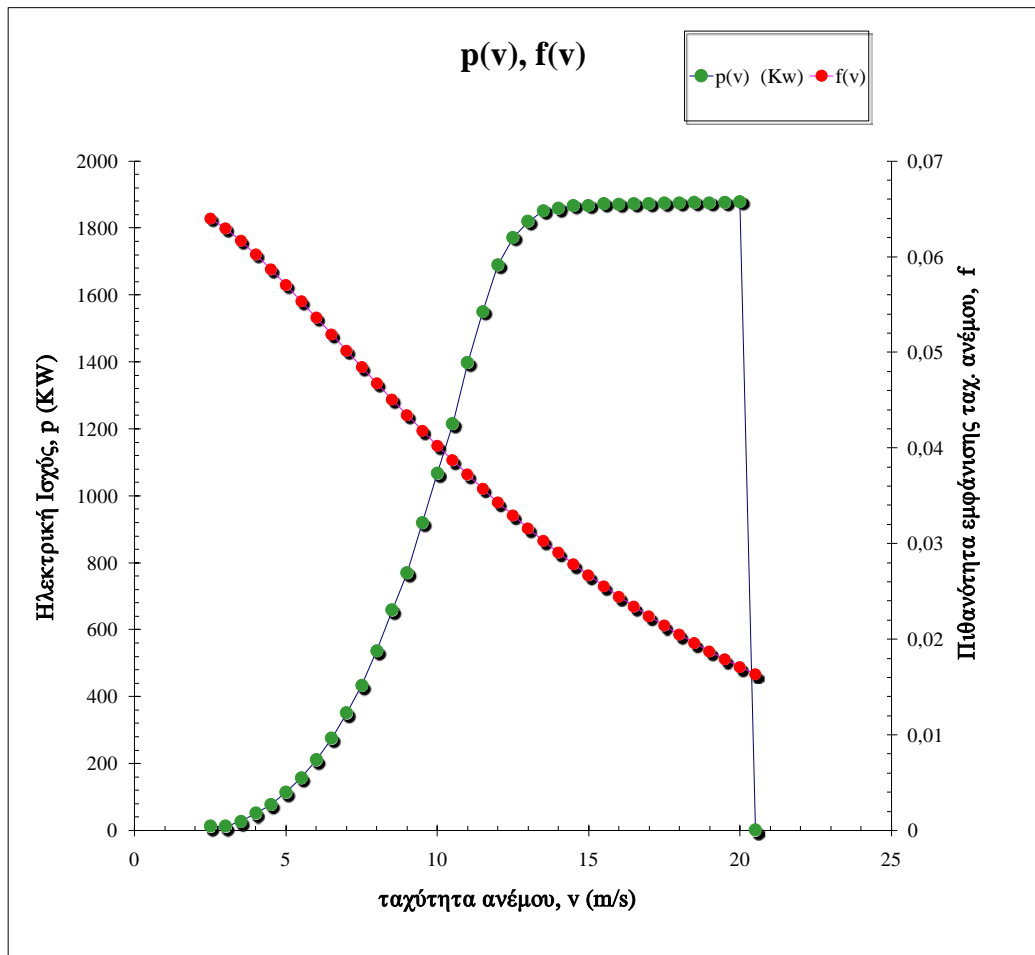
Για να βρούμε **πόση ενέργεια** παράγει μια ανεμογεννήτρια, είναι απαραίτητη η γνώση του **αιολικού δυναμικού** στην περιοχή εγκατάστασής της.

Χρειάζεται δηλαδή να έχουμε υπολογίσει την **πιθανότητα εμφάνισης των ταχυτήτων ανέμου $f(V)$** .

Με ολοκλήρωση παίρνουμε τη «μέση» **ισχύ P_{AV}** που παράγεται από τη μηχανή στο χρονικό διάστημα για το οποίο έχει υπολογιστεί η πιθανότητα $f(V)$:

$$P_{AV} = \int_{V_{IN}}^{V_{OUT}} f(V) P_{\eta\lambda}(V) dV$$

Καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) και ενεργ. υπολογισμοί (5)



Καμπύλη $P_{\eta\lambda}$ (V) και ενεργ. υπολογισμοί (6)

Η μέση ενέργεια σε kWh που παράγεται από τη μηχανή στο διάστημα ενός έτους είναι:

$$E_{AV} = P_{AV} \cdot 8.640h [kWh]$$

Για να βρούμε πόσο καλά προσαρμοσμένη είναι μια ανεμογεννήτρια σε ένα συγκεκριμένο αιολικό πεδίο, ορίζουμε τον **παράγοντα αποδοτικότητας (capacity factor) CF**:

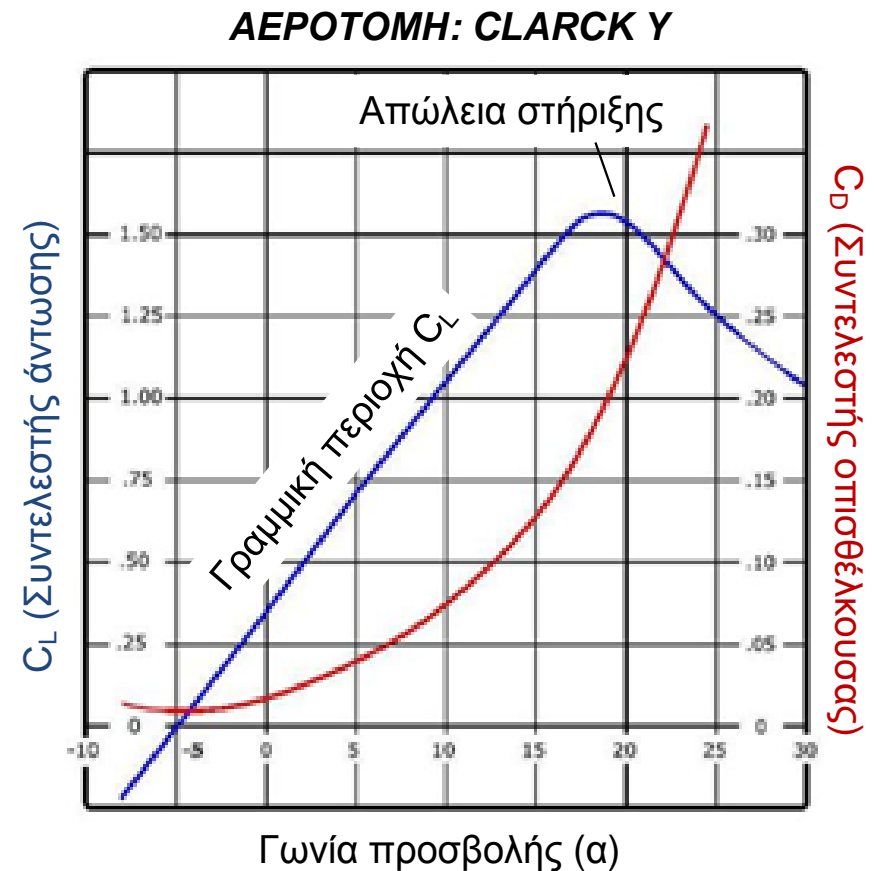
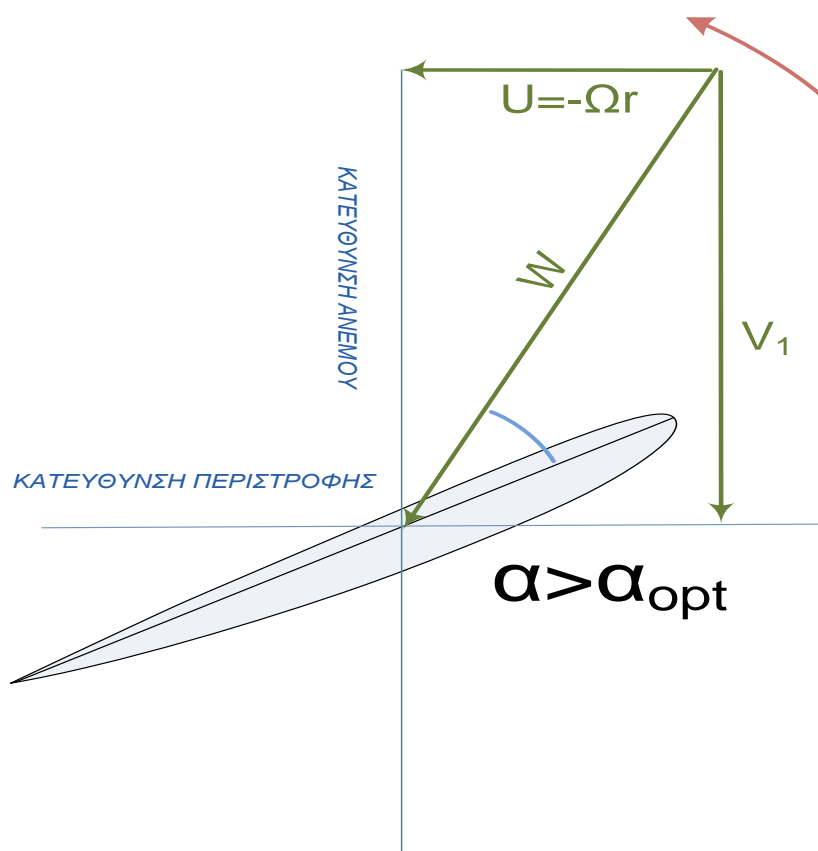
$$CF = \frac{P_{AV}}{P_R}$$

Ο λόγος CF μας δείχνει **ποιο ποσοστό του χρόνου** λειτουργεί η αιολική μηχανή στην πλήρη δυναμικότητά της, παράγει δηλαδή την ονομαστική ισχύ της. Για τις συνήθεις ηλεκτροπαραγωγές αιολικές μηχανές ο συντελεστής αυτός είναι της τάξης του **0,2 με 0,3**.

Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος

Παθητικές μέθοδοι (1)

Μέθοδος «απώλειας στήριξης» (stall control).



Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος

Παθητικές μέθοδοι (2)

Εφαρμόζεται μόνο σε μηχανές που λειτουργούν με **σταθερή ταχύτητα** περιστροφής του ρότορα. Παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα και έχει πλέον εγκαταλειφθεί.

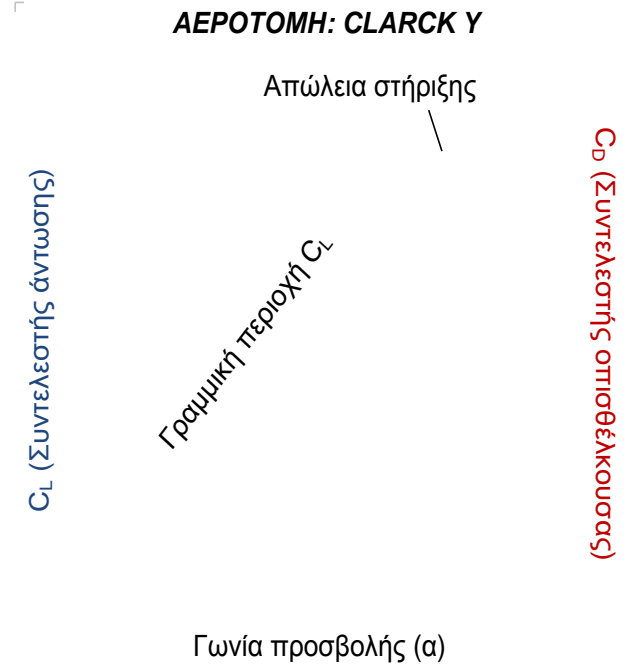
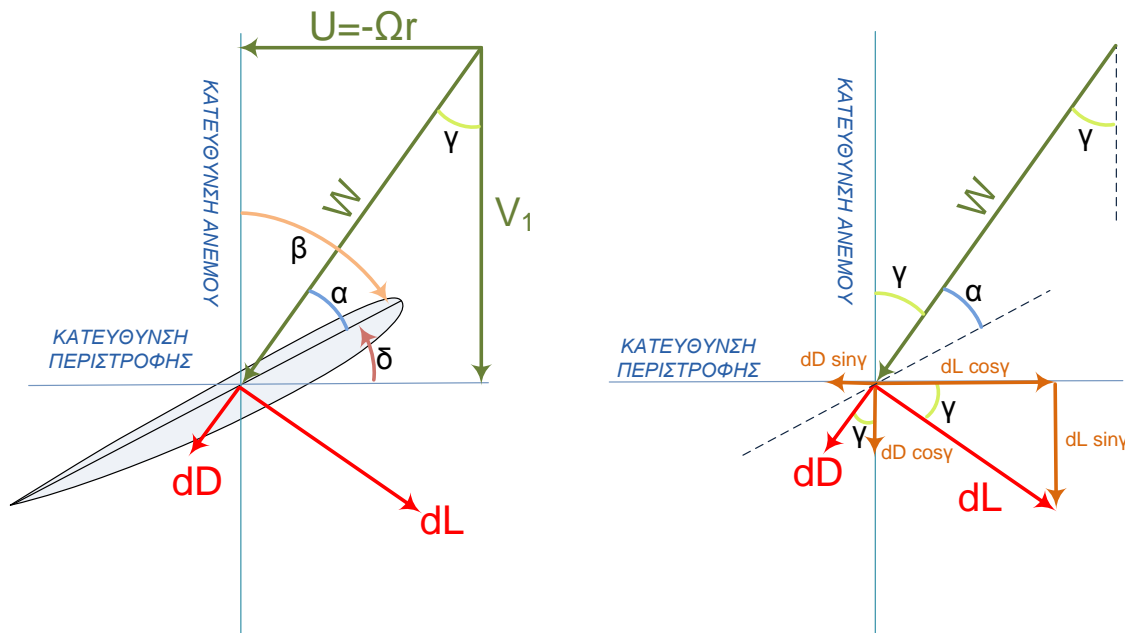
- **Αυξημένα φορτία** και **καταπόνηση** των πτερυγίων από κραδασμούς, λόγω της σημαντικής αύξησης της οπισθέλκουσας και της δημιουργίας τυρβώδους απορρεύματος.
- Δεν είναι δυνατός ο **ακριβής έλεγχος** της ισχύος αφού τα πτερύγια λειτουργούν στη μη γραμμική περιοχή του $C_L(\alpha)$. Έτσι η ηλεκτρική ισχύς τείνει να **ξεπερνά την P_R** για τιμές ταχύτητας ανέμου λίγο μεγαλύτερες από την ονομαστική και στη συνέχεια γίνεται μικρότερη της P_R όσο πλησιάζουμε τη V_{OUT} .
- Απαιτεί **αεροδυναμικό φρένο** στο ακροπτερύγιο για τον έλεγχο της μηχανής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, που δεν είναι απαραίτητο σε άλλες μεθόδους.
- Δεν είναι δυνατή η χρήση βελτιστοποιημένων πτερυγίων με αποτέλεσμα τη **μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης** της ανεμογεννήτριας.

Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος

Ενεργητικές μέθοδοι (1)

Μέθοδος «μεταβλητής γωνίας στρέψης» (pitch control)

Η πτέρυγα διαθέτει κατάλληλο **μηχανισμό** που της επιτρέπει να **περιστρέφεται** γύρω από το διαμήκη άξονά της. Όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά την ονομαστική, **αυξάνεται η γωνία στρέψης** της πτέρυγας δ , έτσι ώστε **να μειωθεί η γωνία προσβολής α** , η κινούσα δύναμη και ο συντελεστής ισχύος C_p



Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος

Ενεργητικές μέθοδοι (2)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Επιτρέπει τον **ακριβή έλεγχο** της ισχύος αφού λειτουργεί στη **γραμμική περιοχή** του $C_L(\alpha)$.
- Η μείωση της κινούσας δύναμης και της *Thrust* σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου **μειώνει τις φορτίσεις** και την καταπόνηση των πτερυγίων.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για **γρήγορη εκκίνηση** (με κατάλληλη στροφή των πτερυγίων), για το «**παρκάρισμα**» της μηχανής και ως **αεροδυναμικό φρένο** για το γρήγορο φρενάρισμα σε περίπτωση σφάλματος.
- Επιτρέπει τη χρήση **βελτιστοποιημένου προφίλ** πτέρυγας.
- Εφαρμόζεται και για **μεταβλητή ταχύτητα** περιστροφής του ρότορα.

Το μόνο της μειονέκτημα είναι το **σχετικά υψηλό κόστος** των μηχανισμών περιστροφής.

Μηχανισμοί ελέγχου της παραγόμενης ισχύος

Ενεργητικές μέθοδοι (3)

Μια πρόσφατη παραλλαγή της μεθόδου μεταβλητής γωνίας είναι η **«ενεργός απώλεια στήριξης» (active stall)**, στην οποία η πτέρυγα μεταβάλλει τη γωνία στρέψης δ όπως και πριν, αλλά προς **αντίθετη κατεύθυνση** (δηλαδή μείωση του δ), με αποτέλεσμα να **αυξάνεται η γωνία προσβολής α** και τελικά να εμφανίζεται απώλεια στήριξης.

Το **πλεονέκτημα** της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτούνται **πολύ μικρές μεταβολές της γωνίας στέψης**, της τάξης των μερικών μοιρών, ενώ η μέθοδος μεταβλητής γωνίας απαιτεί στρέψη της πτέρυγας μέχρι και 20° .

Παρουσιάζει όμως **όλα τα μειονεκτήματα** της παθητικής μεθόδου **stall** και δεν έχει κερδίσει ακόμη έδαφος.

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι για τις **μικρές ανεμογεννήτριες** χρησιμοποιούνται **μηχανικά μέσα** ελέγχου της ισχύος:

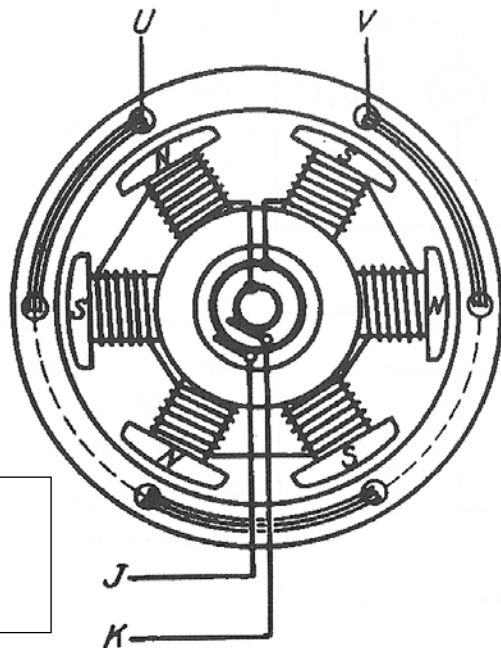
- **Προοδευτική απώλεια του προσανεμισμού του ρότορα**, ο οποίος παύει να είναι κάθετος στον άνεμο, με χρήση κατάλληλα διαμορφωμένης «ουράς».
- **Καμπύλωση των πτερυγίων για μείωση της επιφάνειάς τους**. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται «αεροελαστικά» πτερύγια από σύνθετα υλικά.

Ηλεκτρικές μηχανές:

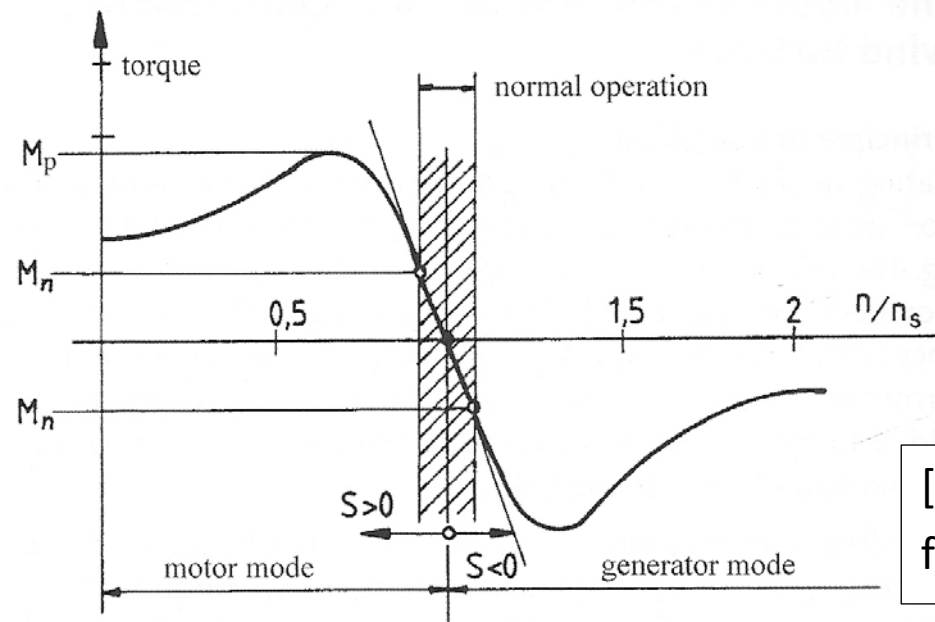
Σύγχρονες – Ασύγχρονες γεννήτριες

Σύγχρονες γεννήτριες: . Η συχνότητα $\nu_{\eta\lambda}$ του ρεύματος αυτού εξαρτάται από τη γωνιακή

ταχύτητα περιστροφής Ω του άξονα: $\nu_{\eta\lambda} = K \frac{\Omega}{2\pi}$



[1] p. 276
(fig. 10.12)



[1] p. 300
fig. 10.29

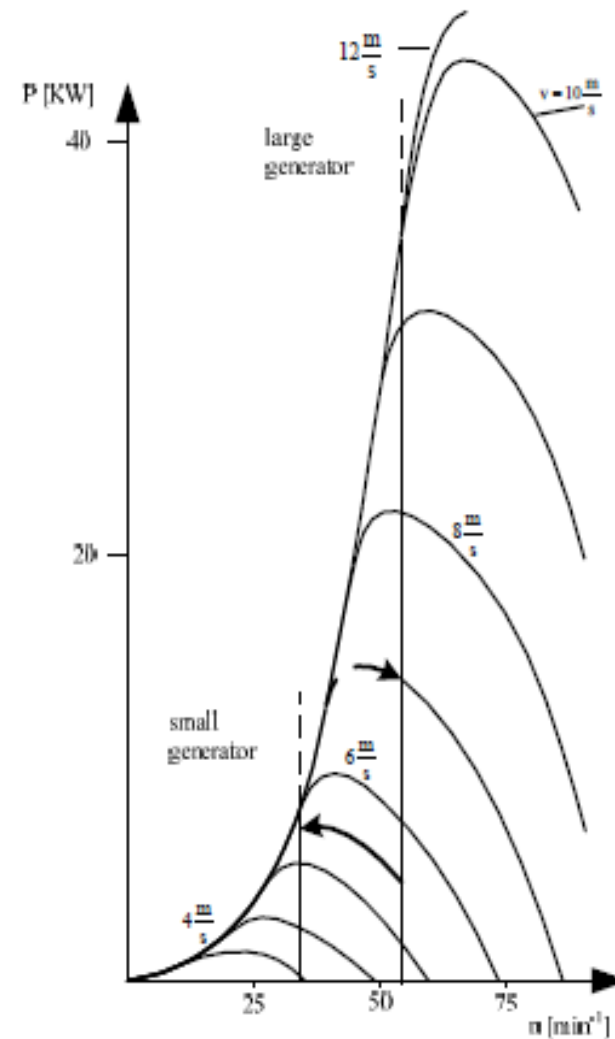
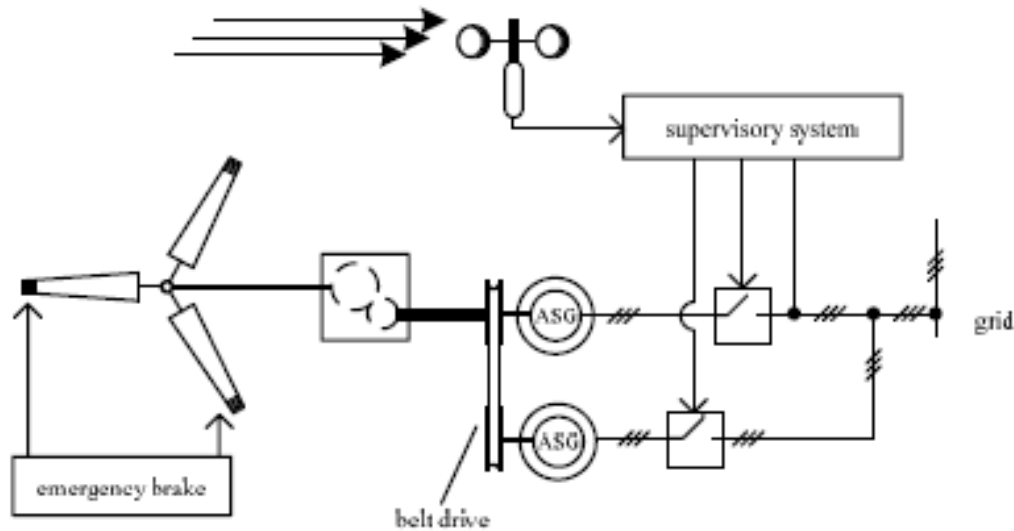
Διάταξη τυλιγμάτων ηλεκτρικής μηχανής και διάγραμμα ροπής για ασύγχρονη μηχανή.

Ασύγχρονες γεννήτριες. Με βραχυκύκλωση των ακροδεκτών J, K του ρότορα η σύγχρονη γεννήτρια μετατρέπεται σε ασύγχρονη

Ηλεκτρικές μηχανές: Σταθερή και μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα (1)

Σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

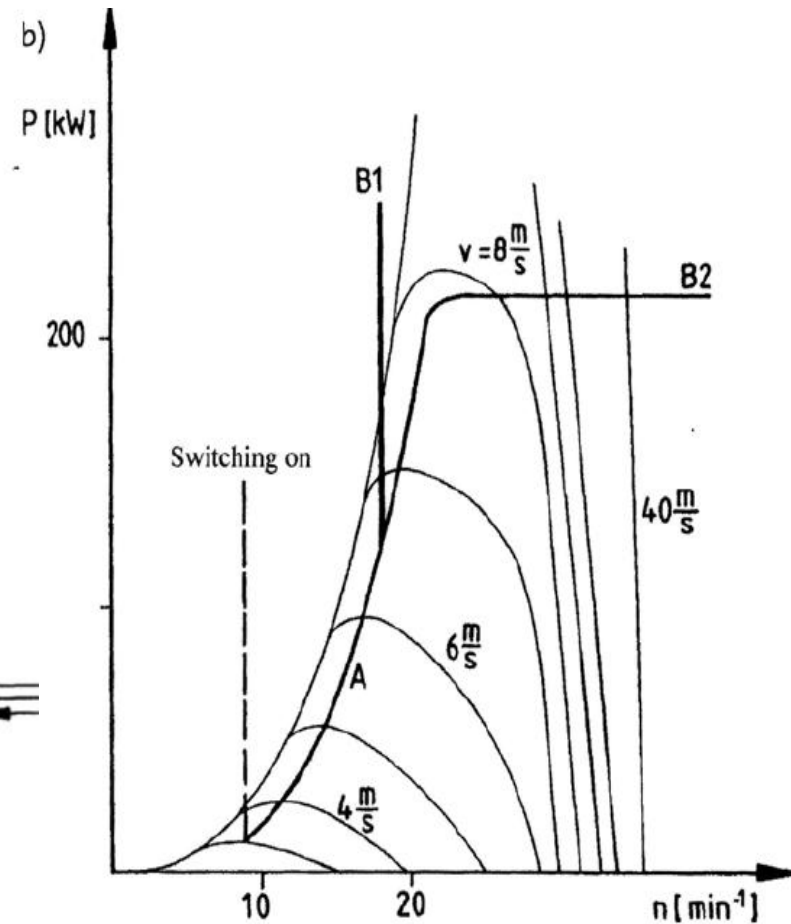
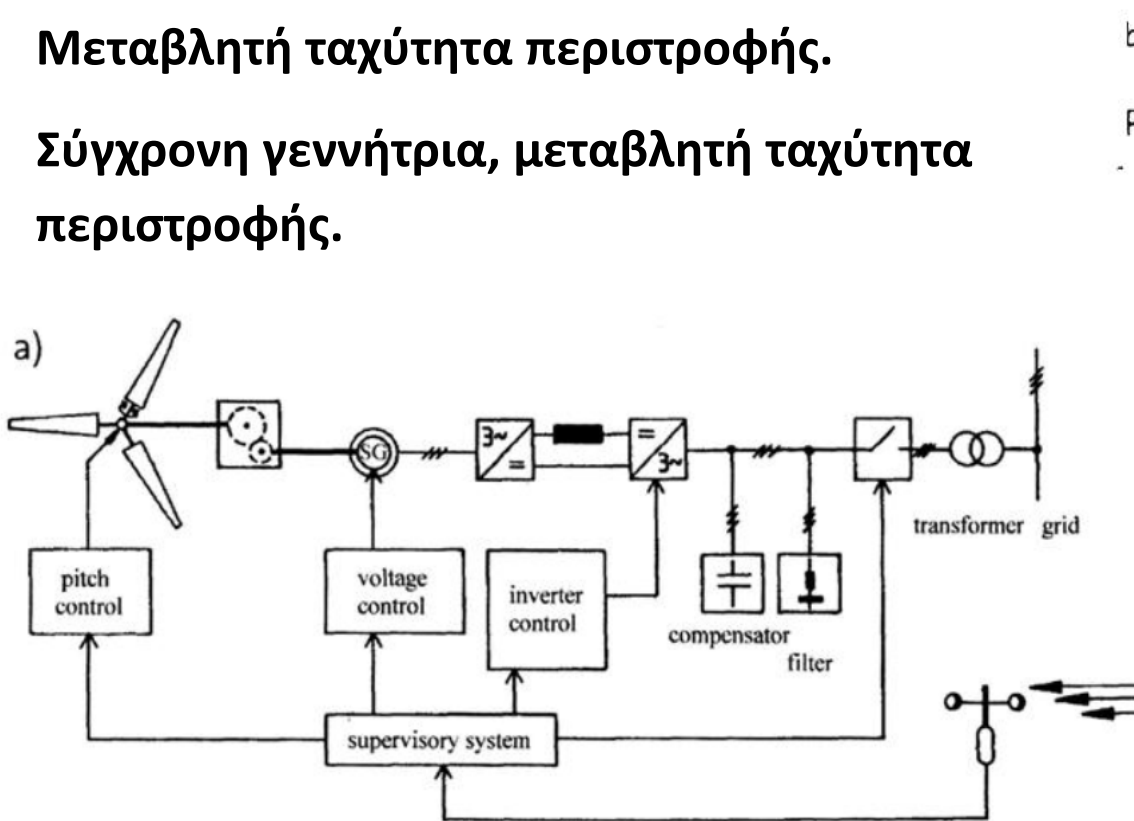
Το δανέζικο μοντέλο (Danish concept).



Ηλεκτρικές μηχανές - Σταθερή και μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα (2)

Μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής.

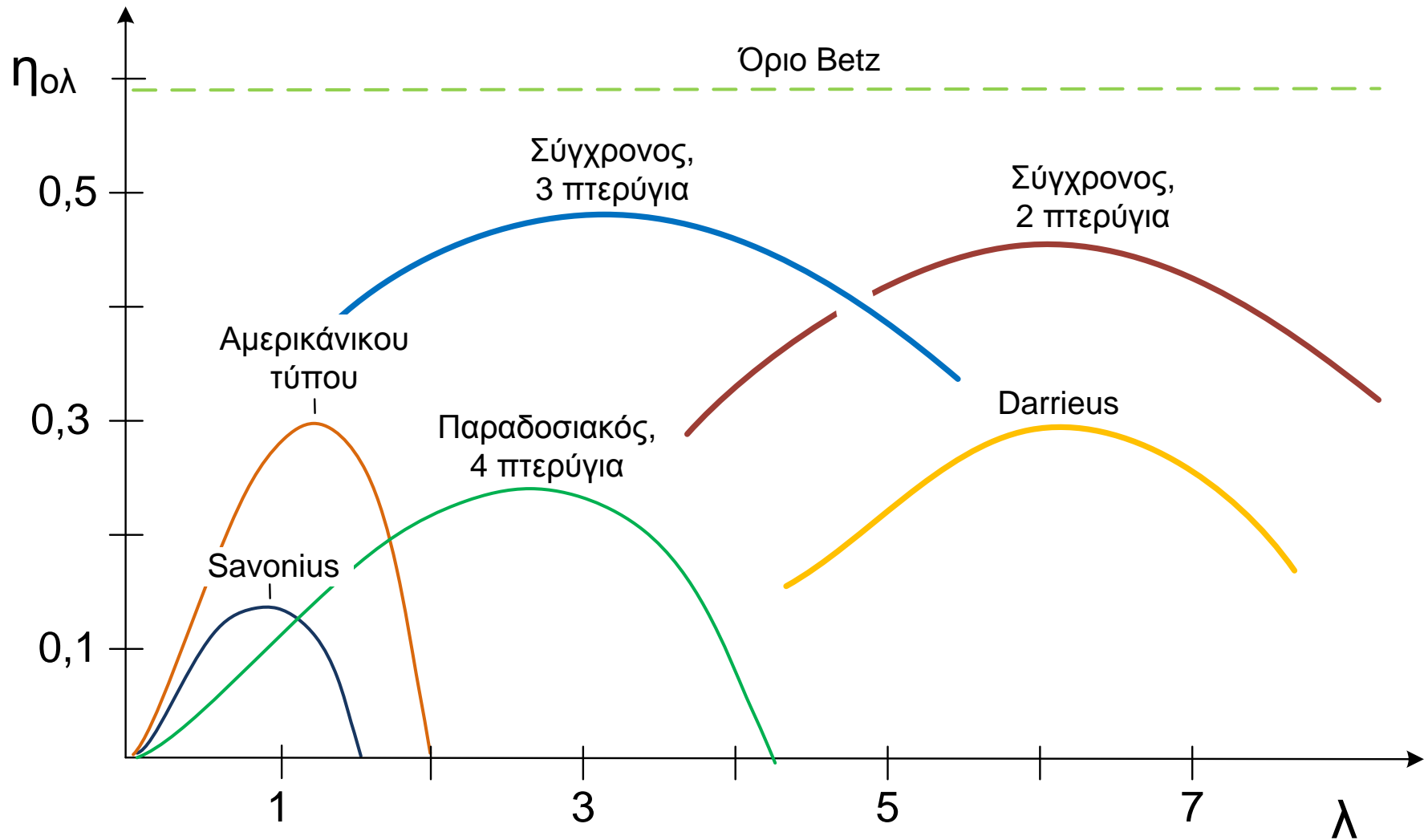
Σύγχρονα γεννήτρια, μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής.



A: Operation at the rotor's optimum capacity

B: Power input limiting
B1: Converter keeps speed constant, power input is limited by stall control
B2: Converter limits power input, pitch control prevents rotor acceleration

Καμπύλες απόδοσης αιολικών μηχανών



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.

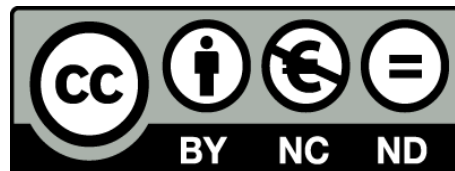
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015**. «**Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού, Ενότητα: Λειτουργία α/γ για ηλεκτροπαραγωγή**» Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2015**. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1954&id=4291>

Σημείωμα Αδειοδότησης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

- R. Gash, J. Twele (Eds): “*Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation*”, 2002, Solarpraxis A.G., ISBN: 1-902916-37-9