

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

Ένταξη Ανεμογεννητριών στα Δίκτυα Ηλεκτρισμού

9.1 Εισαγωγή – Ενέργεια Ανέμου

Η κινητική ενέργεια του ανέμου ανά μονάδα όγκου είναι:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (9.1)$$

όπου: ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και v η ταχύτητα του ανέμου.

Η παροχή αέρα, όταν ο άνεμος περνά μέσα από μία επιφάνεια A κάθετη προς την ταχύτητα v , είναι:

$$Q_A = \rho A v \quad (9.2)$$

επομένως, η ισχύς του ανέμου που περνά μέσα από την επιφάνεια A είναι:

$$W_A = Q_A \frac{1}{2} v^2 = \rho A v \frac{1}{2} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (9.3)$$

Οι μονάδες στο διεθνές σύστημα MKSA είναι: ρ σε $[\text{kg}/\text{m}^3]$, v σε $[\text{m}/\text{s}]$, W_A σε $[\text{Watt}]$ και A σε $[\text{m}^2]$. Μια τυπική τιμή πυκνότητας αέρα, στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι: $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$, με την οποία η (9.3) γράφεται:

$$W_A = 0,6 A v^3 \quad (9.4)$$

επομένως, η ισχύς του ανέμου ανά μονάδα επιφάνειας, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα αέρα $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$, ως άνω, είναι:

$$W = W_A / A = 0,6 v^3 \quad (9.5)$$

Η ενέργεια του ανέμου που περνά μέσα από την επιφάνεια A , ως άνω, στη χρονική περίοδο t είναι:

$$E_A = \frac{1}{2} \rho A \int_0^t v^3 dt \quad (9.6)$$

9.2 Μετατροπή Αιολικής Ενέργειας – Όριο Betz

Ο Γερμανός A. Betz απέδειξε ότι υπάρχει ένα άνω όριο στο βαθμό αξιοποίησης της ενέργειας του ανέμου (αιολικής) από μία ανεμομηχανή. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας (όριο Betz) είναι:

$$c_p = 16/27 = 59,3 \% \quad (9.7)$$

επομένως, η αξιοποιήσιμη ισχύς του ανέμου, μέσα από μία επιφάνεια A ως άνω, είναι:

$$W_{AA} = c_p W_A \quad (9.8)$$

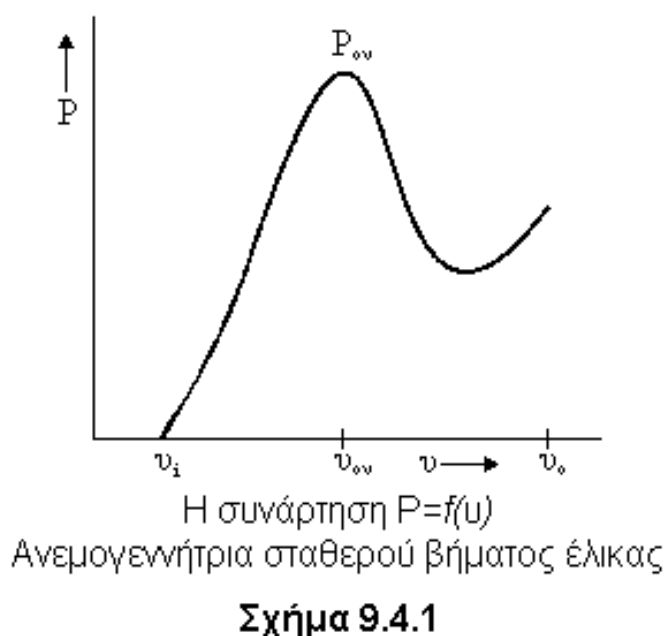
9.3 Βαθμός απόδοσης ανεμομηχανής

Λαμβάνοντας υπόψη το ως άνω όριο Betz, ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμομηχανής γράφεται:

$$\eta = (\text{Ισχύς εξόδου})/W_{AA} = (27/16)(\text{Ισχύς εξόδου})/W_A = (27/16)(P_A/W_A) \quad (9.9)$$

9.4 Ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια είναι μία ανεμομηχανή με ηλεκτρική γεννήτρια. Η ανεμογεννήτρια αποδίδει ηλεκτρική ισχύ από μία ελάχιστη ταχύτητα ανέμου και πάνω (ταχύτητα σύμπλεξης: v_i). Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς έχει ένα μέγιστο (P_{ov}) και η μεταβολή της, ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, για ανεμογεννήτρια με σταθερό βήμα (βλ. επόμενη § 9.5), φαίνεται στο πιο κάτω Σχήμα 9.4.1,



όπου: v_{ov} είναι η ταχύτητα ανέμου που αντιστοιχεί στην P_{ov} και v_o είναι η ταχύτητα ανέμου στην οποία πρέπει, για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, να τίθεται εκτός (ταχύτητα αποκοπής). Για ανεμογεννήτρια με ρυθμιζόμενο βήμα έλικας (βλ. επόμενη § 9.5) η ισχύς εξόδου μπορεί να διατηρείται περίπου ίση με P_{ov} δια $v \geq v_{ov}$.

Παράδειγμα 9.4.1

Να βρεθεί η ισχύς του ανέμου που περνά (κάθετα) από την επιφάνεια που σαρώνει η φτερωτή ανεμογεννήτριας με διάμετρο 20 m, αν η ταχύτητα του ανέμου είναι 13 m/s και η πυκνότητα του αέρα είναι $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Λύση:

Από την εξίσωση (9.4) έχουμε:

$$W_A = 0,6(\pi D^2/4)13^3 = 414 \text{ kW}.$$

Παράδειγμα 9.4.2

Αν η ανεμογεννήτρια του προηγούμενου παραδείγματος (9.4.1) αποδίδει ηλεκτρική ισχύ 100 kW σε ταχύτητα ανέμου 13 m/s, να υπολογίσετε το βαθμό απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

Λύση:

Από την εξίσωση (9.9) έχουμε:

$$\eta = (27/16)(100\text{kW}/414\text{kW}) = 0,242(27/16) = 41\%.$$

9.5 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

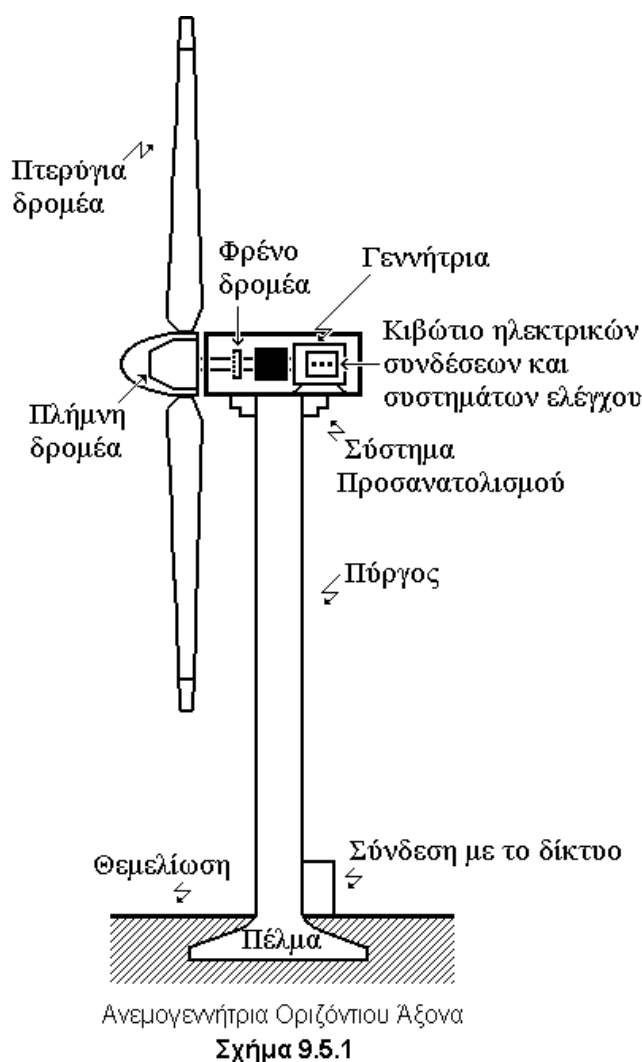
Ο πιο συνήθης τύπος ανεμογεννήτριας είναι ο «οριζόντιου άξονα» (βλ. σχήμα 9.5.1 στην επόμενη σελίδα). Δύο κύριες διαστάσεις της ανεμομηχανής είναι: το ύψος στην πλήμνη του δρομέα = H και η διάμετρος της φτερωτής έλικας (ή διάμετρος δρομέα) = D. Ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας είναι:

- Η ονομαστική ισχύς P_{ov} : η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς εξόδου συνεχούς λειτουργίας,
- Ο τύπος της γεννήτριας: ασύγχρονη (επαγωγική) ή σταθερών στροφών ή σύγχρονη,
- Ο αριθμός πτερυγίων: συνήθως 3 ή 2,
- Ο τύπος ρύθμισης της ισχύος εξόδου: με σταθερό βήμα, και με ρυθμιζόμενο βήμα έλικας,
- Η ταχύτητα σύμπλεξης: v_i , που αναφέρεται σε ταχύτητα ανέμου στο ύψος H, όπως ορίστηκε στο εδάφιο 9.4,
- Η ταχύτητα αποκοπής: v_o , που και αυτή αναφέρεται σε ταχύτητα ανέμου στο ύψος H, όπως ορίστηκε στο εδάφιο 9.4,
- Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου v_{ov} , όπως ορίστηκε στο εδάφιο 9.4, αναφέρεται επίσης στο ύψος H,
- Η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Παράδειγμα 9.5.1

Για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας ENERCON-40 είναι:

- $P_{ov} = 500 \text{ kW}$
- $H = 44 \text{ m}$
- $D = 40,3 \text{ m}$
- Τύπος ανεμογεννήτριας: Σύγχρονη
- Αριθμός πτερυγίων: 3
- Ρύθμιση ισχύος με σταθερή βηματική γωνία
- $v_i = 2,5 \text{ m/s}$
- $v_o = 25 \text{ m/s}$
- $v_{ov} = 12,5 \text{ m/s}$
- Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής δρομέα = 36 rpm.



9.6 Ένταξη ανεμογεννητριών στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ένταξη ανεμογεννητριών στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), συνήθως ως αιολικά πάρκα, αποτελεί σήμερα μία πραγματικότητα, ιδιαίτερα στα ελληνικά νησιά – όπως για παράδειγμα στην Κρήτη το ενδιαφέρον νέων ανεξάρτητων παραγωγών ενέργειας είναι έντονο. Κατά τη γραφή του παρόντος, στην Κρήτη υπάρχουν σε λειτουργία αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος περίπου 85 MW που παράγουν περίπου 10% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί. Σε ό,τι ακολουθεί θα εξετάσουμε δύο σημαντικές πτυχές του θέματος: την Οικονομική και την Τεχνική, οι οποίες είναι απαραίτητες για την τεχνικοοικονομική εκτίμηση της σκοπιμότητας εγκατάστασης ανεμογεννητριών.

9.7 Οικονομική εκτίμηση επενδύσεων εγκαταστάσεων Σταθμών Παραγωγής

Η εκτίμηση της σκοπιμότητας επενδύσεων για εγκαταστάσεις Σταθμών Παραγωγής (ΣΠ) ηλεκτρικής Ενέργειας πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα σχετικά οικονομικά στοιχεία. Για την αναγωγή κεφαλαίων, που αναφέρονται σε διαφορετικούς χρόνους, σε κοινό χρόνο αναφοράς, χρησιμοποιούμε την έννοια της «Παρούσας Αξίας»: ΠΑ. Η Παρούσα Αξία: ΠΑ ενός κεφαλαίου K που υπάρχει στο n έτος ($n > 0$: στο μέλλον, $n < 0$: στο παρελθόν) είναι:

$$ΠΑ = K/(1+r)^v \quad (9.10)$$

όπου r το επιτόκιο αναγωγής.

Ο υπολογισμός της «Παρούσας Αξίας»: ΠΑ μίας σειράς n ετήσιων δόσεων σταθερού ποσού: Δ , γίνεται ως συνάρτηση του επιτοκίου r ως εξής:

$$ΠΑ = \Delta[(1+r)^{-1} + (1+r)^{-2} + \dots + (1+r)^{-n}] \quad (9.11)$$

δηλαδή, αθροίζοντας:

$$ΠΑ = \Delta[1 - (1+r)^{-n}]/r \quad (9.12)$$

Για την επιλογή της οικονομικά συμφέρουσας λύσης μεταξύ δύο ή περισσότερων ειδών ΣΠ, πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Το κόστος εγκατάστασης (επένδυση κεφαλαίου). Στο κόστος των μηχανολογικών εγκαταστάσεων περιλαμβάνεται και ο εξοπλισμός για τον καθαρισμό των καυσαερίων συμβατικών θερμικών μονάδων – εφόσον προβλέπεται η εγκατάστασή του
- Οι ετήσιες σταθερές δαπάνες λειτουργίας (λ.χ.: μισθοί μόνιμου προσωπικού, φόροι, ασφάλειες, ενοίκια, κόστος βασικής συντήρησης, κτλ.)
- Το κόστος καυσίμου
- Τα λοιπά μεταβλητά λειτουργικά έξοδα (λ.χ.: κόστος ανταλλακτικών και λιπαντικών, συντήρησης, κτλ.)
- Ο συντελεστής φόρτισης (σε ετήσια βάση) του ΣΠ
- Ο χρόνος ζωής του ΣΠ και τα τυχόν κόστη ανακαίνισης
- Το εξωτερικό κόστος από περιβαλλοντική ρύπανση (π.χ. κόστος εξ αιτίας εκπομπών CO_2).

Παράδειγμα 9.7.1

Για την επιλογή εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (που προβλέπεται να λειτουργήσουν μετά από μια οκταετία) συνολικής ισχύος 100 MW(e), να γίνει οικονομική σύγκριση των περιπτώσεων μονάδων Λιγνίτη και Αιολικών με τα εξής δεδομένα: σταθερό επιτόκιο αναγωγής 5 % και:

Α) Λιγνιτικός Σταθμός:

- Τιμή προμήθειας ΣΠ: 0.75 ευρώ/W χωρίς τους τόκους κατά τη διάρκεια κατασκευής. Η τιμή συμφωνείται πληρωτέα ως ακολούθως: το 25 % καταβάλλεται 8 χρόνια πριν την παράδοση του έργου, το 50 % 4 χρόνια πριν την παράδοση του έργου, το 15 % με την παράδοση του έργου και το υπόλοιπο 10 % ένα χρόνο μετά την έναρξη λειτουργίας με τη διαπίστωση καλής λειτουργίας.
- Οι σταθερές δαπάνες λειτουργίας είναι 4,6 λπτ./Wa (a: annum)
- Το κόστος καυσίμου είναι: 2,2 λπτ./kWh
- Τα λοιπά μεταβλητά λειτουργικά έξοδα του ΣΠ είναι 0,6 λπτ./kWh
- Ο συντελεστής φόρτισης του ΣΠ είναι 75 % σε ετήσια βάση
- Ο χρόνος ζωής του ΣΠ είναι 40 χρόνια.

B) Αιολικός Σταθμός:

- Τιμή προμήθειας και εγκαταστάσεων: 1,8 ευρώ/W χωρίς τους τόκους κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η τιμή συμφωνείται πληρωτέα ως ακολούθως: το 60 % καταβάλλεται ένα χρόνο πριν την παράδοση του έργου, το 25 % κατά την παράδοση του ΣΠ και το υπόλοιπο 15 % ένα χρόνο μετά την έναρξη λειτουργίας.
- Οι σταθερές δαπάνες λειτουργίας είναι 1,2 λπτ./Wa
- Τα μεταβλητά λειτουργικά έξοδα του ΣΠ είναι 0,6 λπτ./kWh
- Ο συντελεστής φόρτισης του ΣΠ είναι 25 % σε ετήσια βάση
- Ο χρόνος ζωής του ΣΠ είναι 25 χρόνια και το κόστος ανακαίνισης είναι 50 % της τιμής προμήθειας του ΣΠ.

Λύση:

Είναι φανερό ότι ο χρόνος έναρξης λειτουργίας είναι ανεξάρτητος από την επιλογή του είδους σταθμού και λαμβάνεται ως χρόνος αναφοράς για τον υπολογισμό κάθε ΠΑ.

Για να κάνουμε την οικονομική σύγκριση των δύο εναλλακτικών λύσεων θα υπολογίσουμε την ΠΑ του συνολικού κόστους καθεμιάς, κεφαλαιοποιώντας τις κάθε είδους δαπάνες, ανά W εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή:

A) Λιγνιτικός Σταθμός («ΣΑΝ»):

- Εφαρμόζοντας την εξίσωση (9.10), η ΠΑ της προμήθειας του ΣΠ είναι:

$$ΠΑ_{\text{ΠΙ}} = (0,25 \times 1,05^8 + 0,5 \times 1,05^4 + 0,15 + 0,1/1,05) \times 0,75 \text{ ευρώ/W} = 0,917 \text{ ευρώ/W}$$

- Η ΠΑ των σταθερών δαπανών λειτουργίας του ΣΠ στη διάρκεια της ζωής του, των $n=40$ ετών, υπολογίζεται με εφαρμογή του τύπου (9.12), ως εξής:

$$ΠΑ_{\Sigma\Delta} = [4,6 \times (1 - 1,05^{-40}) / 0,05] \text{ λπτ./W} = 78,9 \text{ λπτ./W}$$

Επομένως, η ΠΑ του συνολικού κόστους προμήθειας και σταθερών δαπανών λειτουργίας (για ζωή 40 ετών) του λιγνιτικού ΣΠ είναι:

$$ΠΑ_{\Sigma\text{ΑΝ}} = (91,7 + 78,9) \text{ λπτ./W} = 1,706 \text{ ευρώ/W}$$

Στη συνέχεια, επιμερίζουμε ανά έτος το συνολικό αυτό κόστος, λύοντας την εξίσωση (9.12) ως προς Δ , και βρίσκουμε:

$$\Delta_{\Sigma\text{ΑΝ}} = ΠΑ_{\Sigma\text{ΑΝ}} \times 0,05 / (1 - 1,05^{-40}) = 9,941 \text{ λπτ./Wa}$$

Τέλος, θα εκφράσουμε την επίπτωση των πιο πάνω συνολικών δαπανών για τον συγκεκριμένο ΣΠ στη διαμόρφωση του κόστους της παραγόμενης kWh. Δηλαδή, θα διαιρέσουμε το τελευταίο αποτέλεσμα δια του αριθμού των παραγόμενων kWh σε ένα έτος ανά W εγκατεστημένης ισχύος, ο οποίος είναι:

$$[8760 \times 0,75 / 1000] \text{ kWh/Wa} = 6,57 \text{ kWh/Wa}$$

και κατ' αυτό τον τρόπο θα πάρουμε:

$$K_{\Sigma AN} = 9,941 \text{ (λπτ./Wa)} / 6,57 \text{ (kWh/Wa)} = 1,51 \text{ λπτ./kWh}$$

θα προσθέσουμε τέλος το κόστος καυσίμου και τα λοιπά μεταβλητά έξοδα παραγωγής της kWh και θα έχουμε το συνολικό κόστος παραγωγής για τον λιγνιτικό ΣΠ:

$$K_{\Sigma AN} = 1,51 + 2,2 + 0,6 = 4,31 \text{ λπτ./kWh}$$

Σημειώνουμε εδώ ότι το κόστος αυτό δεν περιλαμβάνει οποιοδήποτε εξωτερικό κόστος. Δηλαδή, υποτίθεται εδώ ότι οι εκπομπές CO₂ του θεωρούμενου ΣΠ θα βρίσκονται μέσα στα υφιστάμενα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της ηλεκτρικής επιχείρισης. Αν το τελευταίο αυτό δεν συμβαίνει, θα πρέπει να προστεθεί η αντίστοιχη επιβάρυνση εξ αιτίας της αγοράς προσθέτων δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ ή εξ αιτίας προστίμων υπέρβασης των ορίων (βλ. το 5^ο Θέμα για Εξάσκηση στο τέλος του κεφαλαίου). Επίσης, στο πιο πάνω κόστος δεν περιλαμβάνεται αντιρρυπαντικός εξοπλισμός για τα καυσαέρια (ηλεκτροστατικά φίλτρα, κλπ)

B) Αιολικός Σταθμός (ΑΣ):

Ομοίως, στην περίπτωση αυτή, υπολογίζουμε τα διάφορα κόστη:

Παρούσα αξία τιμής προμήθειας και εγκαταστάσεων αιολικού πάρκου:

$$ΠΑ = (0,6 \times 1,05 + 0,25 + 0,15/1,05) \times 180 \text{ λπτ./W} = 1,841 \text{ ευρώ/W για 25 έτη ζωής.}$$

Εάν, τώρα, θέλουμε να βασίσουμε τη σύγκριση των δυο ΣΠ σε 40 χρόνια ζωής, τότε, πρέπει να θεωρήσουμε ότι ο Αιολικός Σταθμός ανακαινίζεται με τη συμπλήρωση 25 χρόνων (για άλλα 25 χρόνια ζωής), οπότε το κόστος ανακαίνισης είναι:

$$K_{AN} = 50\% \times ΠΑ_{\text{ΤΠ}} = 92 \text{ λπτ./W}$$

όμως, η δαπάνη αυτή έχει χρόνο αναφοράς το 25^ο έτος, και επομένως η ΠΑ του κόστους ανακαίνισης είναι, σύμφωνα με τον τύπο (9.10):

$$ΠΑ_{KA} = K_{AN}/1.05^{25} = 27,2 \text{ λπτ./W}$$

Τέλος, από αυτή τη δαπάνη της ανακαίνισης, θα πρέπει να αφαιρέσουμε την Απομένουσα Αξία της εγκατάστασης του αιολικού σταθμού στο τέλος των 40 ετών της συνολικής του λειτουργίας, δηλαδή, αξία που αντιστοιχεί σε 10 χρόνια ζωής:

$$AA = K_{AN} \times (10/25) = 36,8 \text{ λπτ./W}$$

της οποίας η ΠΑ είναι:

$$ΠΑ_{AA} = AA/1,05^{40} = 5,2 \text{ λπτ./W}$$

Επομένως, η ΠΑ της τιμής προμήθειας και των καθαρών εξόδων ανακαίνισης, για συνολικό χρόνο λειτουργίας 40 ετών, είναι:

$$ΠΑ_T = ΠΑ_{ΤΠ} + ΠΑ_{ΚΑ} - ΠΑ_{ΑΑ} = 2,06 \text{ ευρώ/W}$$

Για τις σταθερές δαπάνες λειτουργίας θα έχουμε εδώ:

$$ΠΑ_{ΣΔ} = [1,2 \times (1 - 1,05^{-40}) / 0,05] \text{ λπτ./W} = 20,6 \text{ λπτ./W}$$

ενώ, για τα μεταβλητά λειτουργικά έξοδα, είναι εδώ:

$$ΠΑ_{ΜΕ} = [0,6 \times 8760 \times 0,25 \times (1 - 1,05^{-40}) / (0,05 \times 1000)] \text{ λπτ./W} = 22,5 \text{ λπτ./W}$$

Επομένως, η ΠΑ του συνολικού κόστους (για ζωή 40 ετών) του Αιολικού Σταθμού είναι:

$$ΠΑ_{ΑΣ} = (206 + 20,6 + 22,5) \text{ λπτ./W} = 2,492 \text{ ευρώ/W}$$

και επιμερίζοντας το συνολικό αυτό κόστος ανά έτος, έχουμε:

$$\Delta_{ΑΣ} = 249,2 \times 0,05 / (1 - 1,05^{-40}) = 14,5 \text{ λπτ./Wa}$$

Πρέπει τέλος να εκφράσουμε το κόστος του έργου υπό μορφή κόστους που αντιστοιχεί στην παραγόμενη kWh. Βρίσκουμε πρώτα τις παραγόμενες kWh σε ένα έτος ανά W εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή:

$$[8760 \times 0,25 / 1000] \text{ kWh/Wa} = 2,19 \text{ kWh/Wa}$$

και διαιρούμε το προτελευταίο αποτέλεσμα δια του τελευταίου, βρίσκουμε το κόστος της παραγόμενης kWh του αιολικού σταθμού:

$$K_{ΑΣ} = 14,5 / 2,19 = 6,6 \text{ λπτ./kWh}$$

9.8 Εισαγωγή στις Επιπτώσεις Ανεμογεννητριών στο ΣΗΕ

Η ένταξη Αιολικής Παραγωγής σε ένα ΣΗΕ και ιδιαίτερα σε ένα αυτόνομο σύστημα (λ.χ. νησιού χωρίς διασύνδεση με ηπειρωτικό σύστημα) προϋποθέτει την προσεκτική εξέταση τεχνικών ζητημάτων, όπως:

A) Στο επίπεδο του συνολικού συστήματος:

- Ευστάθεια συστήματος
- Έλεγχος συχνότητας
- Ικανότητα προσαρμογής στις αυξομειώσεις της ηλεκτρικής ζήτησης
- Τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού

B) Στο επίπεδο της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας:

- Ρύθμιση τάσης, απώλειες δικτύου
- Ποιότητα ηλεκτρικής παροχής (αναλαμπή, αρμονικές τάσης)
- Διαβάθμιση προστασιών
- Προδιαγραφές εξοπλισμού

Ένα αιολικό πάρκο συνδέεται συνήθως δια μέσου ενός διανομέα ευθείας (“express”) με το υπόλοιπο δίκτυο. Η τάση διασύνδεσης εξαρτάται από τη συνολική ισχύ του αιολικού πάρκου, συνήθως είναι MT: 20 kV ενώ τα μεγάλα αιολικά πάρκα μπορούν να διασυνδεθούν στην YT των 150 kV. Ο υπολογισμός της ρύθμισης τάσης στις γραμμές διασύνδεσης μπορεί να γίνει με εφαρμογή των όσων εκτέθηκαν στην παράγραφο 6.2 (βλ. το έκτο κεφάλαιο) ή προσεγγιστικά με βάση τα ισχύοντα για τις κοντές γραμμές.

Ένα πρόβλημα των ανεμογεννητριών είναι η απορρόφηση άεργης ισχύος από το δίκτυο. Αυτό εκτιμάται ως ένας πιθανός επιβαρυντικός παράγοντας στα οικονομικά της αιολικής παραγωγής στο απελευθερωμένο καθεστώς των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

9.9 Κατασκευαστικά και Λειτουργικά Θέματα Ανεμογεννητριών

Το σχήμα 9.5.1 δείχνει ένα απλό σκαρίφημα ανεμογεννήτριας (Α/Γ) οριζόντιου άξονα. Η Α/Γ αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη:

- το δρομέα που αποτελείται από 2 ή 3 πτερύγια κατασκευασμένα από κατάλληλο υλικό, λ.χ. ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια είναι προσαρμοσμένα στην πλήρη είτε σταθερά, είτε με δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, μεταβάλλοντας έτσι το βήμα.,
- το σύστημα μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών – το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην ταχύτητα της ανεμογεννήτριας. Το τμήμα αυτό της Α/Γ χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή και στη συντήρησή του. Λόγω των εξαιρετικά δυσμενών μηχανικών καταπονήσεων του (εξ αιτίας των κρουστικών χαρακτηριστικών της πνοής του ανέμου), συχνά εμφανίζονται σ αυτό το σύστημα καταστροφικές βλάβες ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μέτριας ποιότητας κατασκευής και ελλιπούς συντήρησης. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών υπερέχουν ως προς το πρόβλημα αυτό,
- την γεννήτρια: σύγχρονη ή ασύγχρονη με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του κιβωτίου ταχυτήτων, σε όσους τύπους Α/Γ το έχουν, μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου,
- το σύστημα πέδησης που είναι ένα σύνθετο δισκόφρενο τοποθετημένο στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας,
- το σύστημα προσανατολισμού που αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να δείχνει προς τον προσπίπτοντα κατά μέτωπο άνεμο,
- τον πύργο που στηρίζει την Α/Γ. Ο πύργος είναι σωληνωτός ή σπανιότερα δικτυωτός και θεμελιώνεται με μεταλλικό πέλμα και οπλισμένο σκυρόδεμα στο έδαφος,
- τον ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου της λειτουργίας και συγχρονισμού με το δίκτυο.

Οι διακυμάνσεις στην παραγόμενη ισχύ μιας Α/Γ οφείλονται:

- στις αυξομειώσεις της ταχύτητας του ανέμου,

- στο φαινόμενο της “σκιάς του πύργου” της Α/Γ, και
- στο διαφορικό της κατακόρυφης κατανομής ταχύτητας του ανέμου.

Ειδικότερα, το φαινόμενο της σκιάς του πύργου της Α/Γ προξενεί αυξομειώσεις στην αποδιδόμενη ισχύ με συχνότητα που μπορεί να προσδιοριστεί στην περίπτωση ανεμογεννητριών με σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Αυτή η συχνότητα διακυμάνσεων παραγόμενης ισχύος ονομάζεται συνήθως “συχνότητα 3p”, από το γεγονός ότι συνήθως ο δρομέας της Α/Γ έχει 3 πτερύγια και επομένως σε κάθε περιστροφή του δρομέα συμβαίνουν τρεις σκιάσεις όταν τα τρία πτερύγια περνούν ένα-ένα διαδοχικά πλάϊ από το σώμα του πύργου. Οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου της Α/Γ προκαλούν αυξομειώσεις της τάσης του δικτύου γειτονικά στην Α/Γ εξ αιτίας των οποίων μπορεί να εμφανίζεται αναλαμπή.

Η λειτουργία των Α/Γ συνοδεύεται από θόρυβο. Για παράδειγμα, μια Α/Γ των 300 kW όταν λειτουργεί με άνεμο 8 m/s προκαλεί θόρυβο επιπέδου 45 dBA σε απόσταση 200 m. Ο θόρυβος πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη στο στάδιο χωροθέτησης νέων αιολικών πάρκων. Τελευταία γίνεται προσπάθεια διάδοσης της θαλάσσιας χωροθέτησης αιολικών πάρκων (κοντά στις ακτές), η διασύνδεση των οποίων γίνεται με υποθαλάσσια καλώδια.

Ένα επίσης σοβαρό πρόβλημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η αντικεραιυνική προστασία των ανεμογεννητριών και ιδιαίτερα των πτερύγων της.

Είναι αυτονόητο ότι η λειτουργία της Α/Γ δεν μπορεί να προγραμματίζεται με βεβαιότητα, λόγω της αβεβαιότητας της εμφάνισης του ανέμου. Επομένως, η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε ένα ΣΗΕ δεν μπορεί να υπολογίζεται ως μέρος της εξασφαλισμένης ισχύος παραγωγής του Συστήματος. Επομένως, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε ένα ΣΗΕ στοχεύει κυρίως στην υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων (πολλές φορές εισαγόμενων) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στην συνεπακόλουθη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης που θεωρείται επίσης, από την οικονομική άποψη, ένα σημαντικό “εξωτερικό κόστος” (βλ., για παράδειγμα, το 5^ο Θέμα για Εξάσκηση πιο κάτω).

Θέματα για Εξάσκηση

1. Μια ανεμογεννήτρια 500 kW(e) έχει συνολικό κόστος εγκατάστασης 300 εκατομμύρια δραχμές. Αν στα 15 χρόνια της απόσβεσης της επένδυσης η ανεμογεννήτρια παράγει κατά μέσον όρο 1.414.220 kWh/έτος και εάν το επιτόκιο είναι 8% και τέλος αν τα λοιπά έξοδα λειτουργίας (μισθοί προσωπικού, συντήρηση, φόροι, ασφάλειες, κλπ) θεωρηθούν ως ποσοστό 6,3% του επενδυμένου κεφαλαίου, να υπολογίσετε το κόστος της παραγόμενης kWh. (Ηλεκτρολόγοι ΤΕΙΚ 1997)
2. Να χαρακτηρίσετε ως σωστή ή λάθος (με δικαιολόγηση) καθεμιά από τις πιο κάτω προτάσεις:
 - I. Ο άνεμος είναι ανέξοδος και επομένως η αιολική παραγωγή ηλεκτρισμού δεν κοστίζει
 - II. Χίλιες δραχμές που έχει κάποιος σήμερα στην τσέπη του αξίζουν το ίδιο με χίλιες δραχμές που προβλέπει να πάρει μετά είκοσι χρόνια
 - III Με επιτόκιο 10%, χίλιες δραχμές που θα πάρετε μετά από ένα χρόνο από σήμερα, αξίζουν όσο 909 δραχμές σήμερα

IV Οι ανεμογεννήτριες και οι άλλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με Α.Π.Ε. έχουν καλύτερες οικονομικές προοπτικές επιλογής των, όταν συνυπολογίζεται το εξωτερικό κόστος εκπομπών διοξειδίου άνθρακα

V Μια μακροχρόνια αύξηση των τιμών πετρελαίου είναι θετικός παράγοντας στην ανάπτυξη της αιολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

(Ηλεκτρολόγοι TEIK 1999)

3. Μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και ρυθμιζόμενου βήματος, έχει διάμετρο έλικας 20 m και ύψος στον άξονα του δρομέα 20 m. Η Α/Γ επιτυγχάνει την ονομαστική της ισχύ εξόδου: 100 kW με ταχύτητα ανέμου: 13m/s όταν η πυκνότητα αέρα είναι $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ – η οποία θεωρείται σταθερή. Να υποθέσετε ότι από την ταχύτητα σύμπλεξης της Α/Γ των 5 m/s, έως την ταχύτητα ονομαστικής ισχύος των 13 m/s, η ισχύς εξόδου της Α/Γ δίδεται από το δύωνυμο:

$$P(kW) = A + Bv^3$$

όπου η ταχύτητα του ανέμου v είναι σε m/s. Να υπολογίσετε:

I. Την ισχύ εξόδου της Α/Γ στην ταχύτητα ανέμου των 10 m/s

II. Το βαθμό απόδοσης της ανεμομηχανής στην ταχύτητα αυτή των 10 m/s.

(Ηλεκτρολόγοι TEIK 1999)

4. Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης του δρομέα της Α/Γ του προηγούμενου θέματος ($3^{ου}$), κατά τη διάρκεια ενός έτους, αντιστοιχεί στην επόμενη κατανομή (Weibull):

$$p(v \geq V) = \exp\left(-\frac{V^2}{49}\right)$$

όπου p είναι το ποσοστό του χρόνου στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου είναι τουλάχιστο V (m/s). Να υπολογίσετε:

I. Για πόσες ώρες το έτος μπορεί η Α/Γ να λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο.

II. Πόση ηλεκτρική ενέργεια θα παράγει η Α/Γ υπό πλήρες φορτίο.

(Ηλεκτρολόγοι TEIK 1999)

5. Στην περίπτωση που μια επιχείριση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποφασίζει να λειτουργήσει ως μονάδα βάσης μια ατμοηλεκτρική μονάδα άνθρακα ισχύος 1000 MW πέραν του ετήσιου δικαιώματος εκπομπής αερίων θερμοκηπίου, δηλαδή, διοξειδίου του άνθρακα, να υπολογίσετε το προκύπτον πρόσθετο εξωτερικό κόστος παραγωγής της kWh από αυτόν τον Ατμο-Ηλεκτρικό Σταθμό (ΑΗΣ), εξ αιτίας του προστίμου βλαπτικών εκπομπών ίσου προς: 100 ευρώ/τόννο CO_2 . Δίδεται ότι ο ΑΗΣ άνθρακα 1000 MW παράγει σε ετήσια βάση 10 εκατομμύρια τόννους διοξειδίου του άνθρακα.

(Ηλεκτρολόγοι TEIK 2005)

Βιβλιογραφία

- [1] T. Kovarik, C. Pipher, J. Hurst, *Wind Energy*, Domus Books, Chicago 1979
- [2] F.R. Eldridge, *Wind Machines*, Van Nostrand Reinhold Co., New York 1980.