

Αιολικά Συστήματα

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την κατανόηση της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας είναι αυτό της λαμβανόμενης ισχύος από τον άνεμο. Θεωρώντας μια αέρια μάζα m στιγμιαίας ταχύτητας $v(t)$, τότε η κινητική ενέργεια του ανέμου υπολογίζεται ως

$$W_k(t) = \frac{1}{2}mv^2(t) \quad (0.1)$$

Επίσης, θεωρώντας A το εμβαδόν της επιφάνειας του διαπερνά ο άνεμος και ρ την πυκνότητα της αέριας μάζας, τότε η ανά μονάδα χρόνου μάζα του αέρα είναι

$$m(t) = \rho Av(t) \quad (0.2)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (0.1) και (0.2) λαμβάνεται η στιγμιαία ισχύς του ανέμου ως

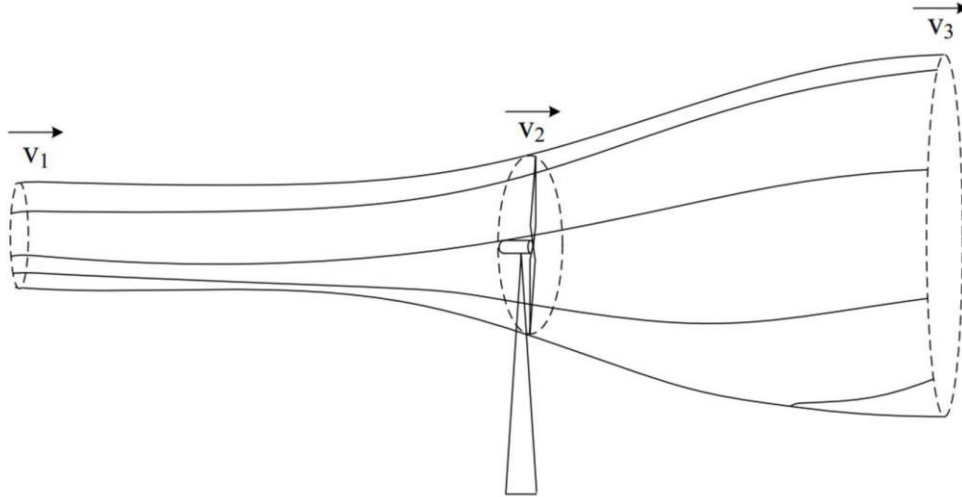
$$P_{av} = \frac{1}{2}\rho Av^3(t) \quad (0.3)$$

Στην πραγματικότητα, μόνο ένα κλάσμα της διαθέσιμης ισχύος ανέμου μπορεί να δεσμευθεί από τον ανεμοκινητήρα, διότι αφενός ο άνεμος απομακρύνεται από τον ανεμοκινητήρα με κάποια ταχύτητα, αφετέρου τα πτερύγια του ανεμοκινητήρα προκαλούν εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο παρακάμπτει τον ανεμοκινητήρα χωρίς να τον διαπεράσει. Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής ισχύος C_p ενός ανεμοκινητήρα ως εξής

$$C_p = \frac{P_m}{P_{av}} \quad (0.4)$$

όπου P_m είναι η μηχανική ισχύς που παράγεται.

Θεωρώντας το ρότορα του ανεμοκινητήρα ως δίσκο που ενεργεί πάνω στον άνεμο μειώνοντας τη στατική του πίεση, τότε ο αέρας που πλησιάζει το δίσκο έχει ταχύτητα v_1 , μετά το ρότορα η ταχύτητα του είναι v_3 , ενώ ισχύει ότι $v_3 < v_1$.



Εικόνα 0.1 Σωλήνας ροής του ανεμοκινητήρα.

Η εικόνα 0.1 απεικονίζει το σωλήνα ροής του ανεμοκινητήρα που ορίζεται από τη διάμετρο του ρότορα. Για να ισχύει η διατήρηση της μάζας μέσα στο σωλήνα ροής, θα πρέπει η διάμετρος του σωλήνα να μεγαλώνει μετά το ρότορα. Η στοιχειώδης αέρια μάζα ανά μονάδα χρόνου που ρέει μέσα στο σωλήνα ροής διατηρείται σταθερή και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\frac{dm}{dt} = \rho \pi R_T^2 v_2 \quad (0.5)$$

όπου R_T είναι η ακτίνα των πτερυγίων του ανεμοκινητήρα και v_2 είναι η ταχύτητα του ρευστού διαμέσου του δίσκου.

Η διαφορά της κινητικής ενέργειας πριν και μετά το δίσκο δίνει ως

$$W_{\alpha/\kappa}(t) = \frac{1}{2} m [v_1^2(t) - v_3^2(t)] \quad (0.6)$$

οπότε η ισχύς που δεσμεύεται από το δίσκο υπολογίζεται ως

$$P_m = dW_{\alpha/\kappa}(t)/dt = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} [v_1^2(t) - v_3^2(t)] = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^2 v_2 [v_1^2(t) - v_3^2(t)] \quad (0.7)$$

Επειδή όμως η ενέργεια $W_{\alpha/\kappa}$ ισούται με το γινόμενο της ορμής της αέριας μάζας επί την ταχύτητα της, δηλαδή

$$W_{\alpha/\kappa}(t) = m [v_1(t) - v_3(t)] v_2(t) \quad (0.8)$$

μέσω της τελευταίας σχέσης και της (0.6) κανείς καταλήγει στην εξής

$$v_2(t) = \frac{1}{2}[v_1(t) + v_3(t)] \quad (0.9)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (0.9) στη (0.7)

$$P_m = \frac{1}{4}\rho\pi R_T^2[v_1(t) + v_3(t)][v_1^2(t) - v_3^2(t)] = \frac{1}{4}\rho\pi R_T^2 v_1(t) \left[1 + \frac{v_3(t)}{v_1(t)} - \left(\frac{v_3(t)}{v_1(t)}\right)^2 - \left(\frac{v_3(t)}{v_1(t)}\right)^3 \right] \quad (0.10)$$

Έτσι, εφόσον ισχύει ότι $A = \pi R_T^2$ και κάνοντας χρήση των σχέσεων (0.3) και (0.4), ο συντελεστής ισχύος δίνεται από τη σχέση

$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3(t)}{v_1(t)} - \left(\frac{v_3(t)}{v_1(t)}\right)^2 - \left(\frac{v_3(t)}{v_1(t)}\right)^3 \right] \quad (0.11)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος, C_p^{max} , υπολογίζεται η παράγωγος της (0.11) που μηδενίζεται, οπότε προκύπτει ότι

$$\frac{dC_p}{dt} = 0 \Rightarrow 1 - 2\frac{v_3(t)}{v_1(t)} - 3\left(\frac{v_3(t)}{v_1(t)}\right)^2 = 0 \Rightarrow \frac{v_3(t)}{v_1(t)} = \frac{1}{3} \quad (0.12)$$

ενώ με αντικατάσταση του παραπάνω αποτελέσματος στη σχέση (0.11) λαμβάνεται το θεωρητικό μέγιστο του συντελεστή ισχύος

$$C_p^{max} = \frac{16}{27} \cong 0.593 \quad (0.13)$$

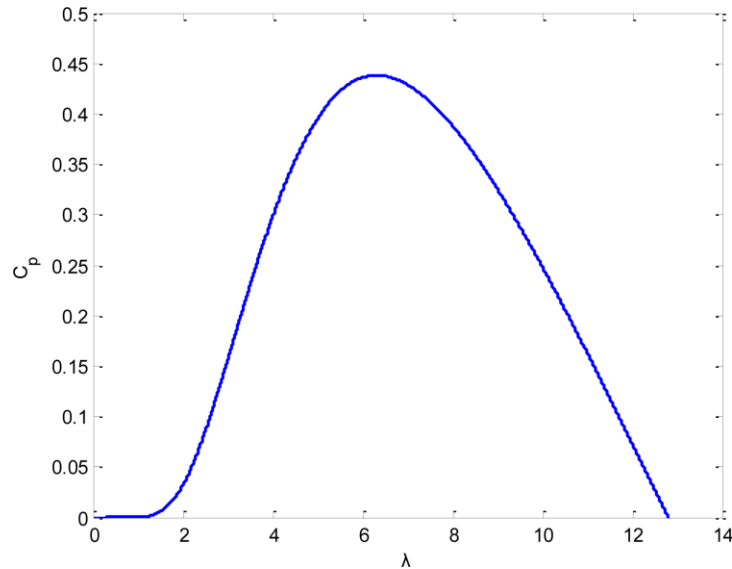
Η μέγιστη αυτή θεωρητική τιμή είναι γνωστή ως όριο του Betz. Στην πράξη όμως λόγω μηχανικών τριβών, στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών, η τιμή του C_p δεν ξεπερνά το 0.5.

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος των ανεμοκινητήρων είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip-speed ratio, TSR), που δίνεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{\omega_{rot} R_T}{v_{wind}} \quad (0.14)$$

όπου ω_{rot} είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων και v_{wind} είναι η ταχύτητα του ανέμου.

Ο συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται άμεσα από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , όπως για παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 0.2.



Εικόνα 0.2 Διάγραμμα του συντελεστή ισχύος C_p ως προς το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ .

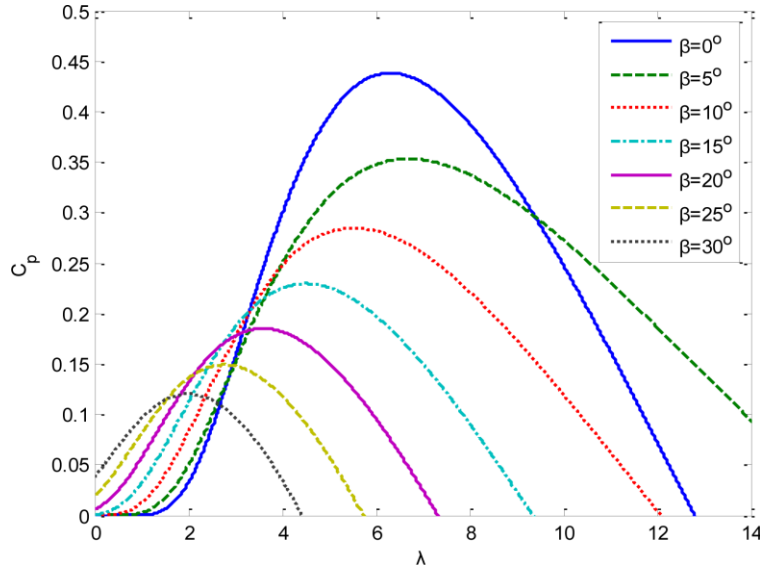
Ωστόσο, στη γενική περίπτωση ο συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται τόσο από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ όσο και από τη γωνία βήματος πτερυγίου (pitch angle) β . Έτσι, για κάθε ταχύτητα ανέμου, η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα του ανεμοκινητήρα πρέπει να λαμβάνει τιμές που να βελτιστοποιούν τα λ και β , προκειμένου να επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Για δεδομένα λ και β , ένας συνήθης προσεγγιστικός τύπος [85] για τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος είναι ο ακόλουθος

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{166}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (0.15)$$

όπου το λ_i δίνεται από τη σχέση

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (0.16)$$

Με βάση τις τελευταίες δύο σχέσεις είναι δυνατόν να σχεδιαστεί το διάγραμμα που εμπλέκει τον συντελεστή C_p με τα λ και β . Κάνοντας χρήση του λογισμικού πακέτου MATLAB, λαμβάνεται το διάγραμμα της εικόνας 0.3.



Εικόνα 0.3 Διάγραμμα του συντελεστή ισχύος C_p ως προς το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , για διάφορες τιμές του συντελεστή β .

Πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς ο τύπος υπολογισμού του συντελεστή ισχύος (0.15) είναι προσεγγιστικός, παρατηρείται στο Σχήμα 0.3 πως για τιμές της γωνίας βήματος πτερυγίου άνω των 20° ο συντελεστής ισχύος λαμβάνει μη μηδενικές τιμές για μηδενικό λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου. Ωστόσο, για μηδενική γωνία βήματος πτερυγίου, ο τύπος (0.15) δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Εύκολα παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή C_p αντιστοιχεί σε γωνία $\beta = \beta_{opt} = 0^\circ$, ενώ για αυτή την τιμή της γωνίας β οι βέλτιστες τιμές για τα C_p , λ και λ_i είναι

$$C_p^{opt} = 0.4382 \quad (0.17)$$

$$\lambda_{opt} \cong 6.325 \text{ και } \lambda_i^{opt} \cong 8.1233 \quad (0.18)$$

Έτσι, γίνεται κατανοητό πως για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει μια μοναδική βέλτιστη γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων ω_{rot}^{opt} , προκειμένου να επιτυγχάνεται η λειτουργία με βέλτιστο συντελεστή ισχύος C_p^{opt} , η οποία υπολογίζεται μέσω της (0.14) ως εξής

$$\omega_{rot}^{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R_T} v_{wind} \quad (0.19)$$

Η μηχανική ισχύς που λαμβάνεται από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^2 C_p(\lambda, \beta) v_{wind}^3 \quad (0.20)$$

ενώ η μηχανική ισχύς που δεσμεύεται μέσω του στρεφόμενου ρότορα από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση

$$P_m = \omega_{rot} T_{aero} \quad (0.21)$$

οπότε συνδυάζοντας τις τελευταίες δύο σχέσεις λαμβάνεται η σχέση της ροπής στο ρότορα του ανεμοκινητήρα

$$T_{aero} = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^3 C_T(\lambda, \beta) v_{wind}^2 \quad (0.22)$$

όπου $C_T = C_p/\lambda$, είναι ο συντελεστής ροπής.

Από τη σχέση (0.22), για τις βέλτιστες τιμές β_{opt} και λ_{opt} ορίζεται η βέλτιστη τιμή της ροπής, T_{aero}^{opt} , η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα ανέμου ως εξής

$$T_{aero}^{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^3 C_T(\lambda_{opt}) v_{wind}^2 \quad (0.23)$$

όπου $C_T(\lambda_{opt}) = C_p^{opt}/\lambda_{opt}$, είναι ο βέλτιστος συντελεστής ροπής, μέσω του οποίου η (0.23) γράφεται ισοδύναμα ως

$$T_{aero}^{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^3 \frac{C_p^{opt}}{\lambda_{opt}^3} (\omega_{rot}^{opt})^2 \quad (0.24)$$

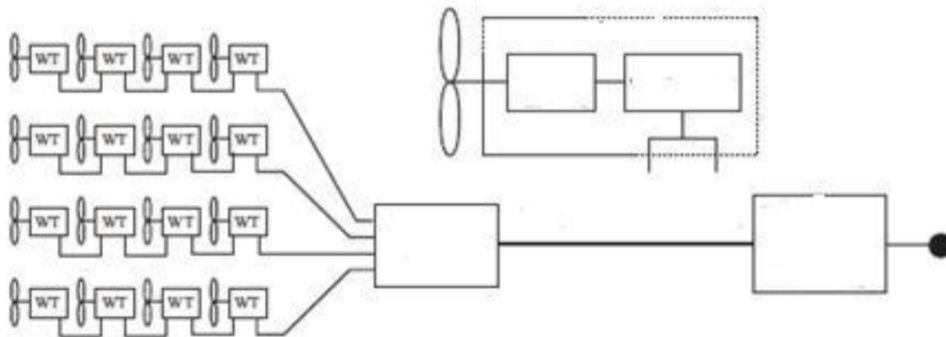
Από τις σχέσεις (0.21) και (0.24) γίνεται κατανοητό ότι προκειμένου να επιτευχθεί λειτουργία μέγιστης απομάστευσης ισχύος, P_m^{max} , πρέπει το σύστημα του ανεμοκινητήρα να λειτουργεί με τη βέλτιστη ταχύτητα ω_{rot}^{opt} .

Αιολικά Πάρκα

Προκειμένου να αυξηθεί η παραγόμενη ενέργεια και να αξιοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο μια περιοχή με καλά ανεμολογικά χαρακτηριστικά, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν μαζί σαν σύνολο και να αποτελέσουν ένα αιολικό πάρκο. Τα αιολικά πάρκα υπάρχουν τόσο στη στεριά όσο και στη θάλασσα συνήθως κοντά σε ακτές και για αυτό ονομάζονται και υπεράκτια (offshore) [79].

Διατάξεις Αιολικών Πάρκων

Ένα σχεδιάγραμμα που περιγράφει με γενικό τρόπο τις διατάξεις αιολικών πάρκων, φαίνεται στην εικόνα 0.4.



Εικόνα 0.4 Γενικό διάγραμμα διάταξης αιολικών πάρκων.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, κάθε αιολικό πάρκο αποτελείται από διάφορα στοιχεία όπως τις ανεμογεννήτριες, το τοπικό δίκτυο των ανεμογεννητριών, ένα σημείο σύζευξης όλων των ανεμογεννητριών, ένα σύστημα μεταφοράς και ένα σημείο σύνδεσης με το δίκτυο. Το τοπικό δίκτυο των

ανεμογεννητριών συνδέει τις ανεμογεννήτριες στο σημείο σύζευξης όλων των ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες συνδέονται ακτινικά. Στο σημείο σύζευξης η τάση αυξάνεται σε μια τιμή κατάλληλη για τη μεταφορά. Τότε η ενέργεια μεταφέρεται μέσω του συστήματος μεταφοράς στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο. Στο σημείο διασύνδεσης γίνεται ρύθμιση των επιπέδων τάσης, της συχνότητας και της αέργου ισχύος με βάση τις απαιτήσεις του δικτύου.

Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Στη θάλασσα σπάνια υπάρχουν περίοδοι απόλυτης ηρεμίας του ανέμου και αν υπάρξουν διαρκούν για πάρα πολύ λίγο. Οπότε όπως είναι λογικό οι ανεμογεννήτριες αναμένεται να έχουν μεγαλύτερη απόδοση στη θάλασσα από ότι στη στεριά. Το αιολικό δυναμικό ακόμα και στα ρηχά νερά (5 με 15 m βάθος) γύρω από όλη την Ευρώπη θα μπορούσε θεωρητικά να καλύψει με την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ όλη την Ευρώπη και μάλιστα με πολλαπλάσια ενέργεια από αυτή που απαιτείται [93].

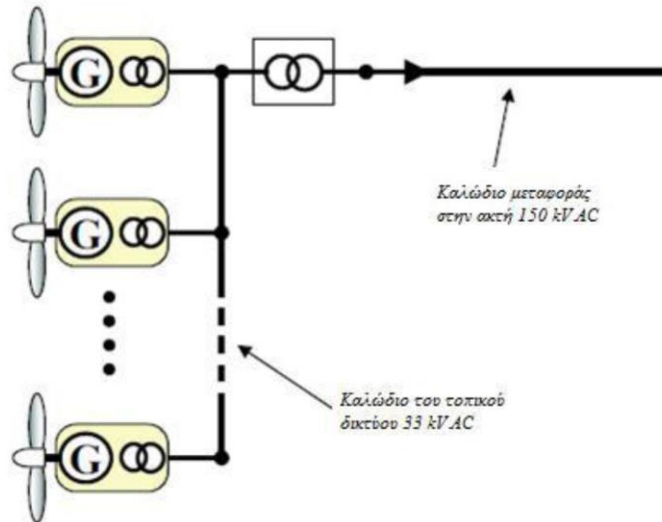
Ένας από τους βασικούς λόγους για τον οποίον άρχισε να αναπτύσσεται η ιδέα των αιολικών πάρκων στη θάλασσα, είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πολλά κατάλληλα μέρη στη στεριά για τη δημιουργία αιολικών πάρκων. Εξίσου σημαντικός λόγος είναι το γεγονός ότι συνήθως οι άνεμοι στη θάλασσα έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από ότι στη στεριά. Μια αύξηση κοντά στο 20% στη ταχύτητα των ανέμων σε κάποια απόσταση από τη στεριά είναι πολύ σύνηθες φαινόμενο. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι η ενέργεια αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας, μπορεί να μας δώσει απόδοση ενέργειας ακόμα και 73% περισσότερη. Οικονομικά βελτιστοποιημένες ανεμογεννήτριες, πιθανόν δίνουν περίπου 50% περισσότερη ενέργεια στη θάλασσα από ότι στη στεριά.

Ένα ακόμα επιχείρημα υπέρ των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, είναι το γεγονός ότι συνήθως η επιφάνεια της θάλασσας είναι επίπεδη και ήρεμη. Οπότε η ταχύτητα του ανέμου δεν αυξάνεται τόσο πολύ με το ύψος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας, όπως συμβαίνει στη στεριά. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να είναι πιο οικονομικό να χρησιμοποιηθούν πιο μικροί πύργοι (άρα και πιο οικονομικοί) για θαλάσσια αιολικά πάρκα. Βέβαια το όφελος αυτό αντισταθμίζεται από το αυξημένο κόστος θεμελίωσης και πάκτωσης των πύργων στο βυθό.

Η διαφορά στη θερμοκρασία ανάμεσα στην επιφάνεια της θάλασσας και στον αέρα είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη στην στεριά, ιδιαίτερα στη διάρκεια της ημέρας. Οπότε όπως είναι λογικό, ο άνεμος στη θάλασσα έχει λιγότερες αναταράξεις από ότι στη στεριά. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρότερη μηχανική καταπόνηση των ανεμογεννητριών που αυξάνει κατά πολύ τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών.

Ας δούμε ένα παράδειγμα από ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Το σχεδιάγραμμα του συγκεκριμένου πάρκου φαίνεται στην εικόνα 0.5. Σε μεγάλα αιολικά πάρκα ισχύος μεγαλύτερης των 100 MW συνήθως χρησιμοποιούνται εσωτερικά ac δίκτυα των 30 με 33kV. Συνήθως στο κέντρο αυτών των πάρκων βρίσκεται μια πλατφόρμα με μετασχηματιστή 30/150 kV (και όσα άλλα λειτουργικά στοιχεία χρειάζονται). Η σύνδεση με τη ξηρά γίνεται μέσω υποβρυχίων καλωδίων των 150 kV ac τάσης. Τα υποθαλάσσια καλώδια επιβάλλεται να θαφτούν στο βυθό προκειμένου να μειωθούν οι κίνδυνοι να καταστραφούν από διάφορους παράγοντες όπως παραδείγματος χάρη από δίκτυα ψαρέματος. Τα καλώδια έχουν μεγάλες χωρητικότητες οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα αναλόγως των παραμέτρων του δικτύου και της απόστασης από την ακτή. Αν η απόσταση από το δίκτυο που βρίσκεται στη στεριά είναι αρκετά μεγάλη, π.χ. μεγαλύτερη από 100 km [94], τότε η επικρατούσα εναλλακτική λύση που χρησιμοποιείται είναι η

σύνδεση του πάρκου με μια γραμμή υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (high voltage direct current (HVDC) link)

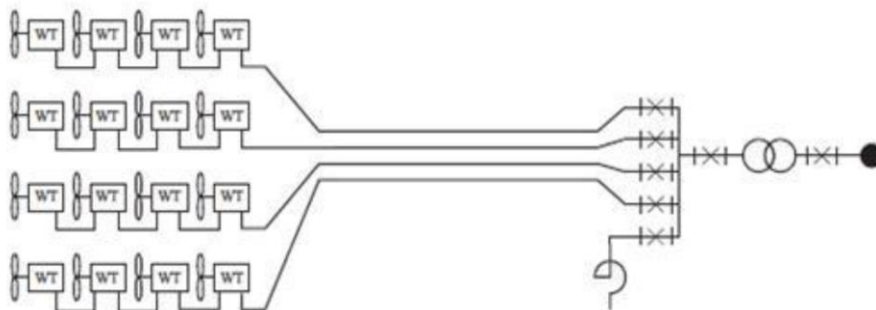


Εικόνα 0.5 Σχεδιάγραμμα υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Αιολικά Πάρκα με ac Σύνδεση

Τα περισσότερα αιολικά πάρκα που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα έχουν ένα ηλεκτρικό ac σύστημα από τις ανεμογεννήτριες στο σημείο σύζευξης με το δίκτυο. Θα παρουσιαστούν δυο διαφορετικά τέτοια συστήματα, το ένα για μικρά και το άλλο για μεγάλα αιολικά πάρκα.

Πρώτα θα γίνει αναφορά στα μικρά αιολικά πάρκα. Τα ac συστήματα σύνδεσης είναι κατάλληλα για μικρά αιολικά πάρκα που έχουν μικρή απόσταση από το σημείο στο οποίο πρέπει να γίνει η μεταφορά. Το τοπικό δίκτυο των ανεμογεννητριών χρησιμοποιείται και για συνδέονται ακτινικά οι ανεμογεννήτριες μεταξύ τους, αλλά και για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στο σημείο διασύνδεσης με το δίκτυο, όπως φαίνεται στην εικόνα 0.6.



Εικόνα 0.6 Διάγραμμα μικρού ac αιολικού πάρκου.

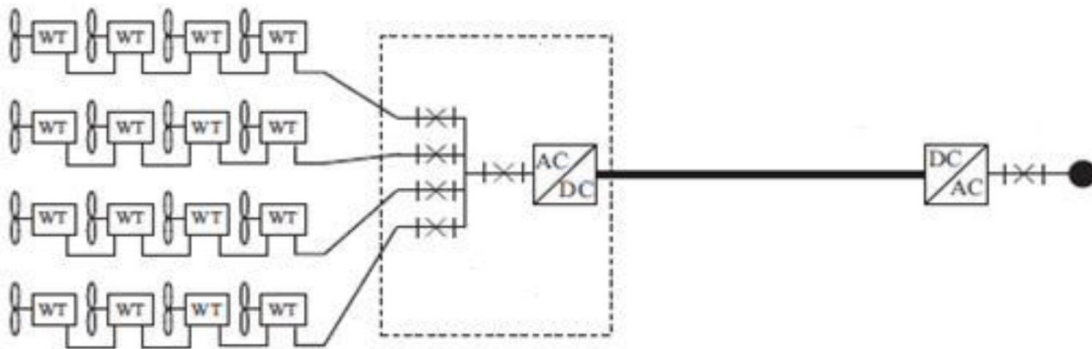
Σε αυτό το σύστημα, τα καλώδια στο τοπικό δίκτυο εγκαθίστανται κατά σειρά ένα προς ένα από τις ανεμογεννήτριες στο σημείο σύνδεσης (κοινός κόμβος). Από το σημείο σύνδεσης μέχρι το σημείο

διασύνδεσης με το δίκτυο τα καλώδια συνδέονται όλα μαζί. Αυτή η μέθοδος μειώνει το κόστος της εγκατάστασης μιας και από το σημείο σύνδεσης όλων των ανεμογεννητριών και μετά έχουμε το κόστος εγκατάστασης για μόνο ένα καλώδιο.

Για τα μεγάλα τώρα αιολικά πάρκα, τα χρησιμοποιούμενα συστήματα σύνδεσης είναι πιο παραδοσιακά και βασίζονται στο προηγούμενο γενικό σχήμα. Το σύστημα αυτό έχει ένα τοπικό δίκτυο ανεμογεννητριών, το οποίο λειτουργεί σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης (20-30 kV) και είναι συνδεδεμένο σε έναν κοινό μετασχηματιστή και ένα σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης. Για το σύστημα αυτό κάθε καλώδιο έχει το δικό του κόστος εγκατάστασης, μιας και όλα τα καλώδια ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές.

Αιολικά Πάρκα με ac/dc Σύνδεση

Στο σύστημα αυτό η διαφορά είναι πως η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω dc διασύνδεσης. Η σύνδεση στα πάρκα αυτά συνήθως αναφέρονται ως ac/dc. Τέτοιου είδους συστήματα προτείνονται όταν το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο βρίσκεται μακριά ή αν το τοπικό δίκτυο στο οποίο συνδέεται το πάρκο δεν είναι ισχυρό. Αυτός ο τύπος συστήματος φαίνεται στην εικόνα 0.7.



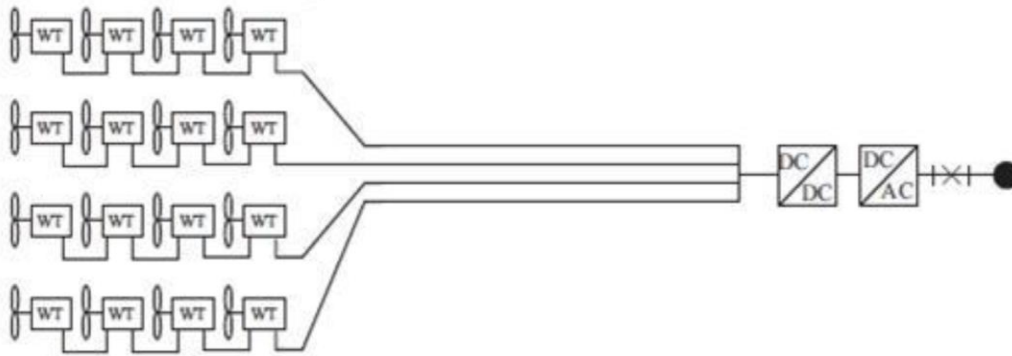
Εικόνα 0.7 Διάγραμμα μικτού ac/dc αιολικού πάρκου.

Στο σύστημα αυτό, υπάρχει ένα πλήρως ανεξάρτητο τοπικό ac σύστημα στο οποίο και η τάση αλλά και η συχνότητα είναι πλήρως ελεγχόμενες μέσω ενός μετατροπέα. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι ότι η αεροδυναμική και ηλεκτρική απόδοση μπορούν να αυξηθούν σημαντικά. Εδώ το κόστος εγκατάστασης των καλωδίων είναι παρόμοιο με αυτό των μεγάλων ac πάρκων. Τα δυο καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη dc μεταφορά, ένα για το θετικό πόλο και ένα για τον αρνητικό, συνήθως τοποθετούνται μαζί με αποτέλεσμα να έχει το ίδιο κόστος με το να τοποθετούνταν ένα.

Αιολικά Πάρκα με dc Σύνδεση

Για τα αιολικά πάρκα αυτού του τύπου υπάρχουν τρεις διαφορετικές τοπολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα μικρά και μεγάλα με dc σύνδεση αλλά και μια τρίτη συνδεσμολογία με τις ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες σε σειρά [95].

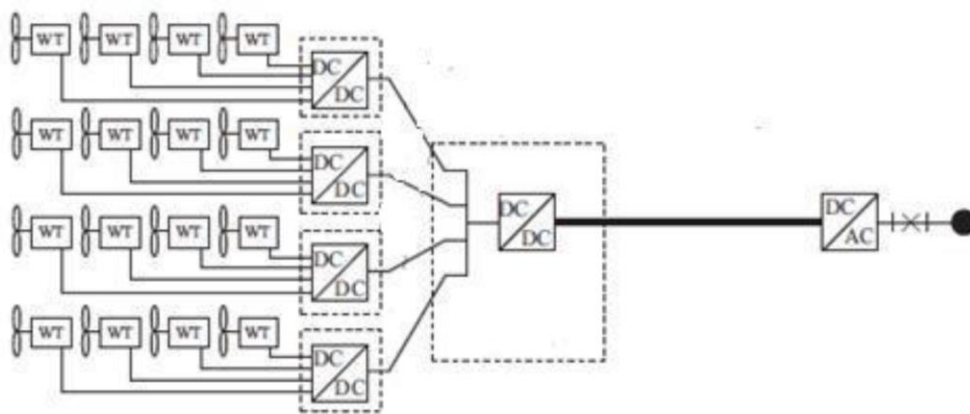
Το ηλεκτρικό σύστημα για τα μικρά dc πάρκα φαίνεται στην εικόνα 0.8.



Εικόνα 0.8 Διάγραμμα μικτού dc αιολικού πάρκου.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, το σύστημα αυτό είναι παρόμοιο με αυτό των μικρών πάρκων με ac σύνδεση. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο μετασχηματιστής εδώ έχει αντικατασταθεί από έναν dc μετατροπέα και έναν αντιστροφέα. Προφανώς, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ανορθωτή σε κάθε ανεμογεννήτρια. Το πλεονέκτημα των μικρών πάρκων με dc διασύνδεση σε σχέση με τα μεγάλα, είναι το ίδιο που ισχύει και στα μικρά πάρκα με ac διασύνδεση. Το κόστος εγκατάστασης των καλωδίων είναι επίσης αντίστοιχο.

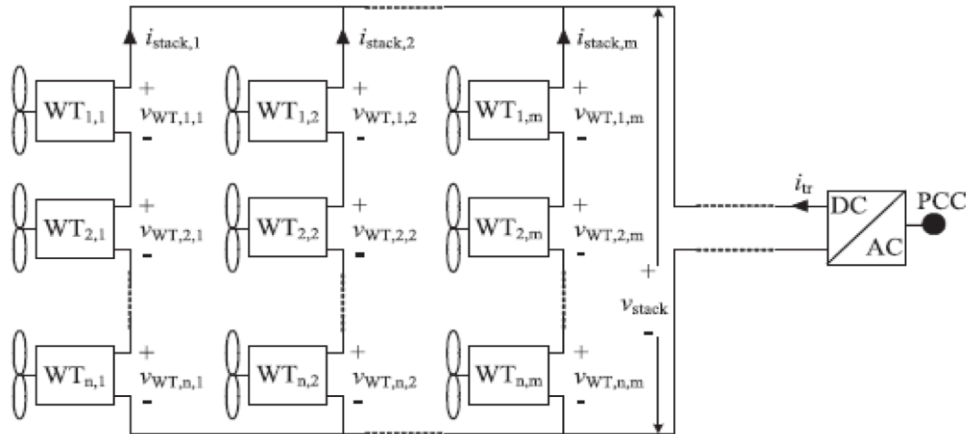
Όσον αφορά τώρα τα μεγάλα πάρκα με dc διασύνδεση, αυτά διαφέρουν σχετικά με τα αντίστοιχα ac. Η βασική διαφορά είναι ότι μπορεί να χρειαστούν περισσότεροι του ενός μετατροπείς προκειμένου να φτάσει η τάση των ανεμογεννητριών στο κατάλληλο επίπεδο για μεταφορά. Μόνο όταν η dc τάση των ανεμογεννητριών είναι αρκετά μεγάλη (20-40 kV) τότε ένας μετατροπέας μπορεί να είναι αρκετός. Για χαμηλότερες τιμές (5 kV) είναι απαραίτητα τουλάχιστον δυο στάδια μετατροπής. Στην εικόνα 0.9 φαίνεται η συνδεσμολογία με δυο στάδια μετατροπών.



Εικόνα 0.9 Διάγραμμα μεγάλου dc αιολικού πάρκου.

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και από την εικόνα 0.9, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε μικρότερες ομάδες. Όλες οι ανεμογεννήτριες σε κάθε ομάδα συνδέονται μια προς μια στο πρώτο επίπεδο μετατροπής. Η πλευρά της υψηλής dc τάσης του μετατροπέα στη συνέχεια συνδέεται σε έναν άλλο μεγαλύτερης ισχύος μετατροπέα σε δεύτερο επίπεδο μετατροπής.

Η τρίτη συνδεσμολογία παρουσιάζεται στην εικόνα 0.10.



Εικόνα 0.10 Διάγραμμα dc αιολικού πάρκου με τις ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες σε σειρά.

Στη συνδεσμολογία αυτή οι ανεμογεννήτριες είναι συνδεδεμένες σε σειρά προκειμένου να μπορούν να παρέχουν την κατάλληλη τάση έτσι ώστε να μπορεί να γίνει απευθείας η μεταφορά. Τα συστήματα αυτού του είδους ονομάζονται εν σειρά dc αιολικά πάρκα. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι παρά το σχετικά μεγάλο μέγεθος τους, δεν απαιτείται η χρήση μεγάλων dc μετατροπέων. Αντίστοιχα, το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι οι dc/dc μετατροπείς στις ανεμογεννήτριες, πρέπει να έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν σε πολύ υψηλές τάσεις. Αυτό πρέπει να συμβαίνει γιατί σε περίπτωση που μια ανεμογεννήτρια δεν παρέχει ενέργεια με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη τάση, τότε οι άλλες ανεμογεννήτριες πρέπει να καλύψουν την απώλεια παρέχοντας μεγαλύτερη τάση εξόδου.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Απλές Εφαρμογές και Πάρκα

Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές πληροφορίες για τα Φ/Β συστήματα. Αρχικά, παρατίθενται στατιστικά στοιχεία που αφορούν τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ τους, ενώ αναλύονται οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται η ανάπτυξη τους. Στη συνέχεια, περιγράφεται ένα γενικό σχήμα ελέγχου Φ/Β συστήματος και αναπτύσσονται οι στόχοι του ελέγχου. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις πιο δημοφιλείς τεχνικές που εφαρμόζονται για την απομάστευση μέγιστης ισχύος από τη Φ/Β πηγή ενέργειας. Ακολούθως, περιγράφονται οι βασικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα, ενώ επιπλέον παρουσιάζονται οι λειτουργίες που πρέπει να υλοποιεί ένα Φ/Β συνδεδεμένο στο δίκτυο. Τέλος, εξετάζονται τα υβριδικά Φ/Β συστήματα, οι πιθανές διατάξεις τους και στοιχεία που αφορούν τη τοπική διαχείριση ενέργειας.

Εισαγωγή

Μεταξύ των τεχνολογιών που μετατρέπουν τις ΑΠΕ σε ηλεκτρική ενέργεια, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει σημειώσει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Ειδικότερα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β συστημάτων αυξήθηκε από 1,2GW το 1992 σε 136GW το 2013 (36GW εγκαταστάθηκαν το 2013). Αποτέλεσμα αυτού είναι τα Φ/Β συστήματα να κατέχουν πλέον σημαντικό μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ενδεχομένως τα Φ/Β να κατέχουν μείζονα θέση στο μέλλον στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) αφού παρουσιάζουν μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια 60%). Η αύξηση αυτή οφείλεται σε συνδυασμό παραγόντων. Κύριοι παράγοντες είναι η μείωση του κόστους και η αύξηση της αποδοτικότητας των Φ/Β πλαισίων, η προσπάθεια για προστασία του περιβάλλοντος με την αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας με ΑΠΕ και τέλος νομοθετικές ρυθμίσεις και κρατικές επιδοτήσεις που ευνοούν επενδύσεις στα Φ/Β συστήματα.

Έλεγχος φωτοβολταϊκού συστήματος

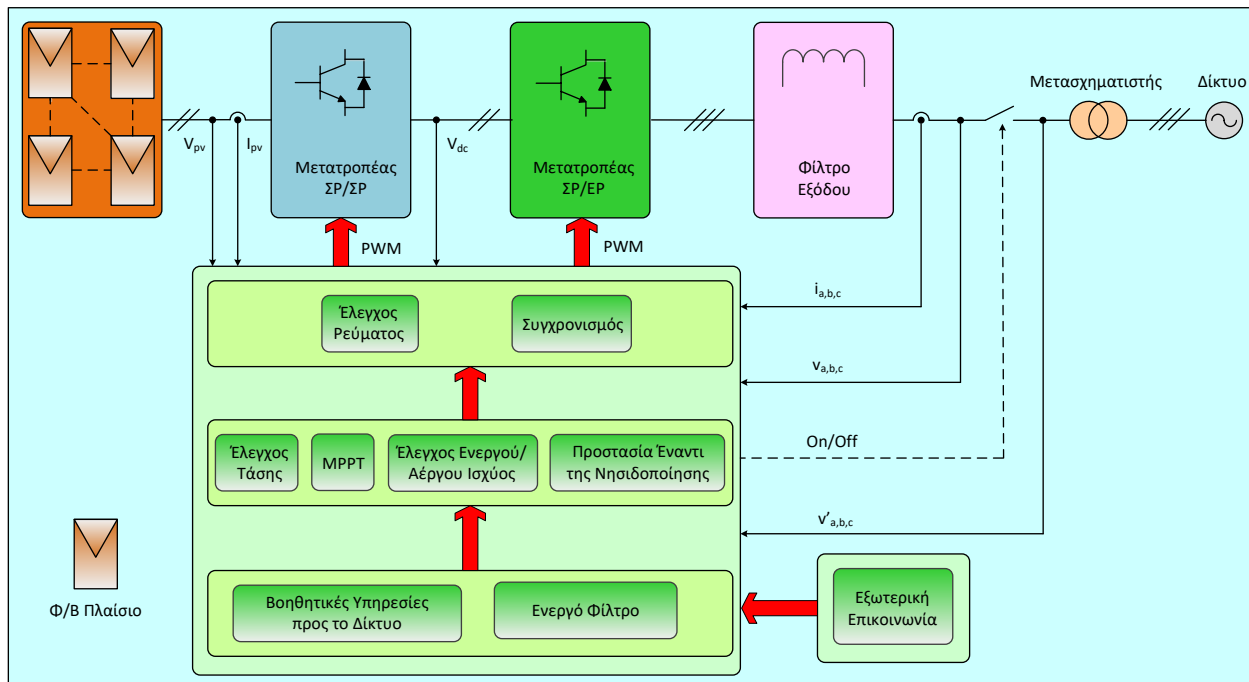
Τα Φ/Β συστήματα μπορούν να λειτουργούν συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο ή αυτόνομα. Και στις δυο περιπτώσεις σημαντικό ρόλο για την ορθή λειτουργία τους διαδραματίζουν οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος [42]. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος με διαμόρφωση εύρους παλμών (pulse width modulation, PWM) κατέχουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές των Φ/Β συστημάτων, γεγονός που οφείλεται σε τρεις λόγους:

- Πρόοδοι στην τεχνολογία των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος έκαναν δυνατή τη σημαντική αύξηση των τάσεων και των ρευμάτων που μπορούν να χειρισθούν οι ημιαγωγοί ισχύος, την αύξηση των ταχυτήτων μετάβασης, τη βελτίωση της απόδοσης (μείωση των διακοπτικών απωλειών), τον περιορισμό της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, κτλ..
- Ανάπτυξη μικροϋπολογιστών που επιτρέπουν την εφαρμογή προηγμένων και πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου.
- Σχεδιασμός νέων και προηγμένων τεχνικών ελέγχου, π.χ. εσωτερικοί ελεγκτές ρεύματος, εξωτερικοί ελεγκτές ρύθμισης τάσης, ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking, MPPT), τεχνικές συγχρονισμού, εξωτερικοί βρόχοι ελέγχου ενεργού/άεργου ισχύος, κτλ..

Στο σχήμα 0.1 απεικονίζεται το γενικό σχήμα ελέγχου ενός Φ/Β συστήματος [43]. Οι στόχοι του ελέγχου μπορούν να διαιρεθούν σε 2 μεγάλες κατηγορίες [44]:

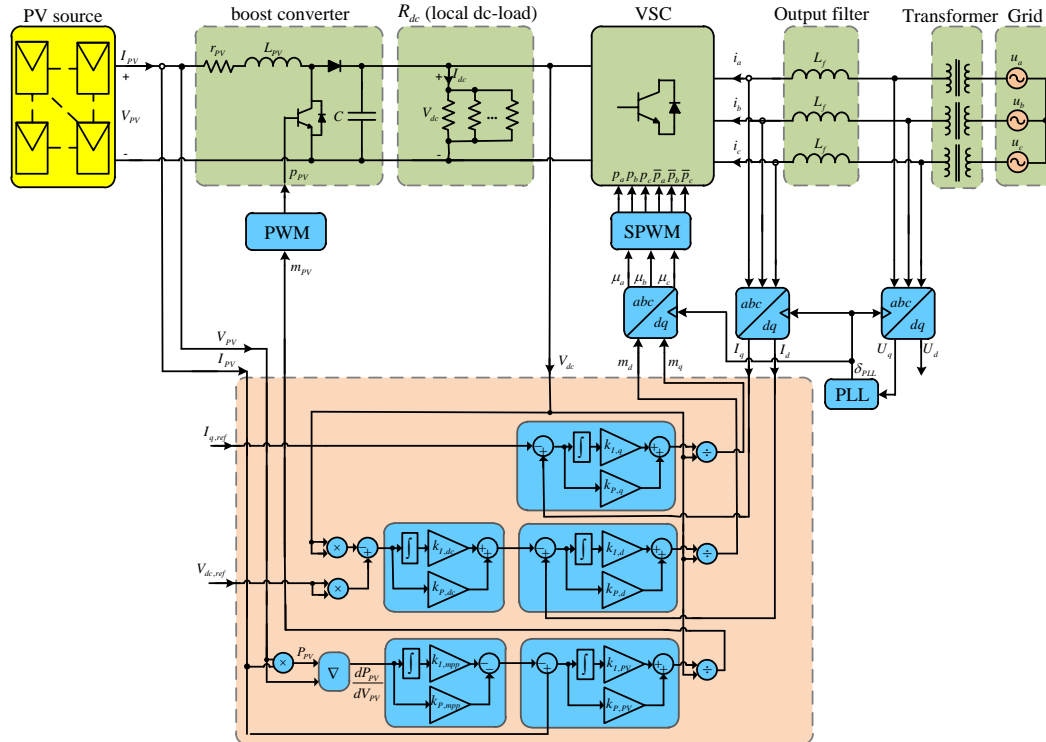
- Στους ελεγκτές εισόδου που έχουν ως κύριο στόχο την απομάκρυνση μέγιστης ισχύος από τη Φ/Β πηγή ενέργειας (σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ρυθμίζουν τη συνεχούς τάση διασύνδεσης).
- Στους ελεγκτές από την πλευρά του δικτύου, οι οποίοι μπορεί να έχουν τους ακόλουθους στόχους: έλεγχος της ενεργού ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, έλεγχος της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται μεταξύ του δικτύου και του Φ/Β συστήματος, έλεγχος της συνεχούς τάσης διασύνδεσης, συγχρονισμός με το δίκτυο, διασφάλιση υψηλής ποιότητας ισχύος προς το δίκτυο, προστασία έναντι της νησιδοποίησης.

Για τους μετατροπείς ισχύος από την πλευρά του δικτύου οι παραπάνω λειτουργίες είναι βασικές και πρέπει να τις διαθέτουν. Επιπλέον, ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να ζητήσει βοηθητικές υπηρεσίες, όπως στήριξη της τάσης στο σημείο διασύνδεσης με το σύστημα και της συχνότητας του δικτύου, καθώς και αντιστάθμιση των αρμονικών της τάσης (ενεργό φίλτρο).



Εικόνα 0.1 Γενικό σχήμα ελέγχου Φ/Β συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο.

0.2. Το φ/β σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο μαζί με όλο το σύστημα ελέγχου απεικονίζεται στην εικόνα

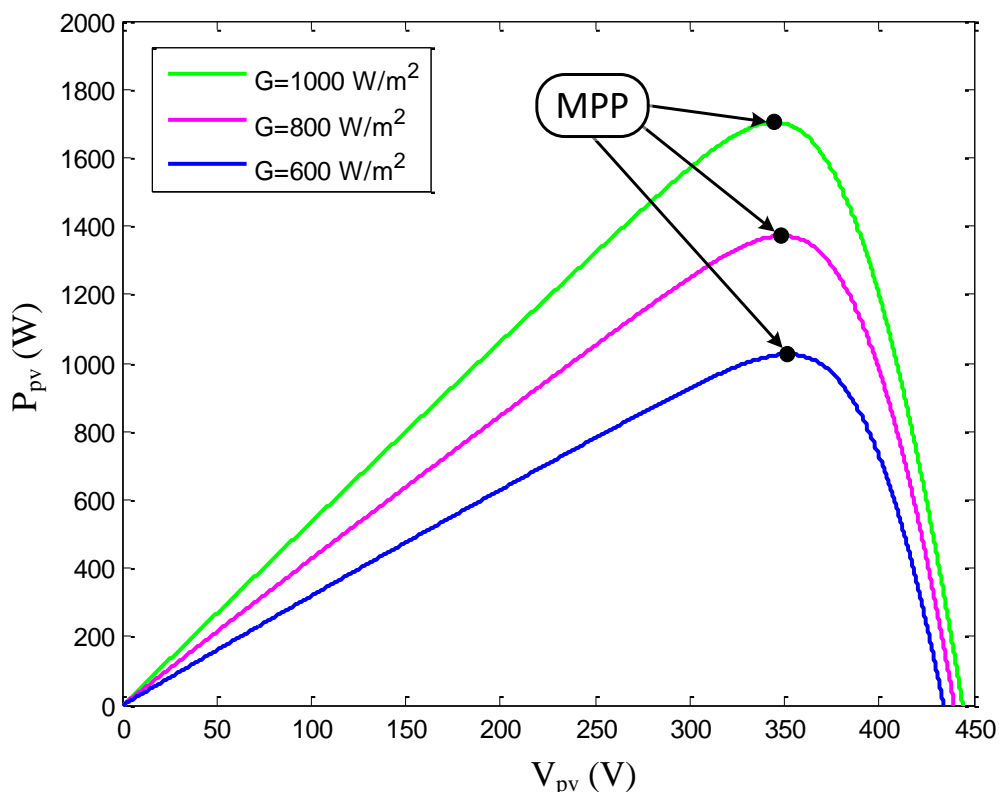


Εικόνα 0.2 Φ/Β σύστημα συνδεδεμένου στο δίκτυο με το σύστημα ελέγχου.

Ανιχνευτές Σημείου Μέγιστης Ισχύος

Τα Φ/Β συστήματα είναι διαλείπουσες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παράγουν ηλεκτρική ισχύ που εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης του Φ/Β πλαισίου είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Για τη βέλτιστη εκμετάλλευση των Φ/Β συστημάτων, αυτά είναι απαραίτητο να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ισχύος [45]. Στο σχήμα 0.3 απεικονίζονται τα MPP για διαφορετικές τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Έχουν προταθεί πάρα πολλές τεχνικές MPPT, όπου μεταξύ των πιο δημοφιλών είναι η μέθοδος της διατάραξης και παρατήρησης (perturb and observe, P&O), της αυξητικής αγωγιμότητας (incremental conductance), της σταθερής τάσης (constant voltage), της παρασιτικής χωρητικότητας (parasitic capacitance), κ.ά.. Ο πιο γνωστός αλγόριθμος MPPT είναι της P&O. Στη μέθοδο αυτή η τάση αναφοράς υπολογίζεται και ανανεώνεται συνεχώς με βάση τη μετρούμενη ισχύ που παράγουν τα Φ/Β. Η τεχνική αυτή όμως έχει σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, το Φ/Β αφού προσεγγίσει το MPP στη συνέχεια ταλαντώνεται γύρω από αυτό. Δεύτερον, η τεχνική αυτή αποτυγχάνει να βρει το MPP όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταβάλλονται γρήγορα [46]. Επιπλέον, σε περιπτώσεις τοπικής σκίασης μπορούν να εμφανιστούν περισσότερα από ένα MPP, οπότε υπάρχει κίνδυνος το Φ/Β σύστημα να "εγκλωβιστεί" σε κάποιο τοπικό μέγιστο ισχύος και να αποτύχει να προσεγγίσει το ολικό μέγιστο ισχύος [47]. Αυτά είναι μερικά από τα ανοιχτά προβλήματα στο πεδίο έρευνας του σχεδιασμού τεχνικών MPPT και συντελείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα ώστε να επιλυθούν.



Εικόνα 0.3 Γραφική παράσταση της σχέσης ισχύος (P_{pv}) - τάσης (V_{pv}) της Φ/Β συστοιχίας για διαφορετικές τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (G).

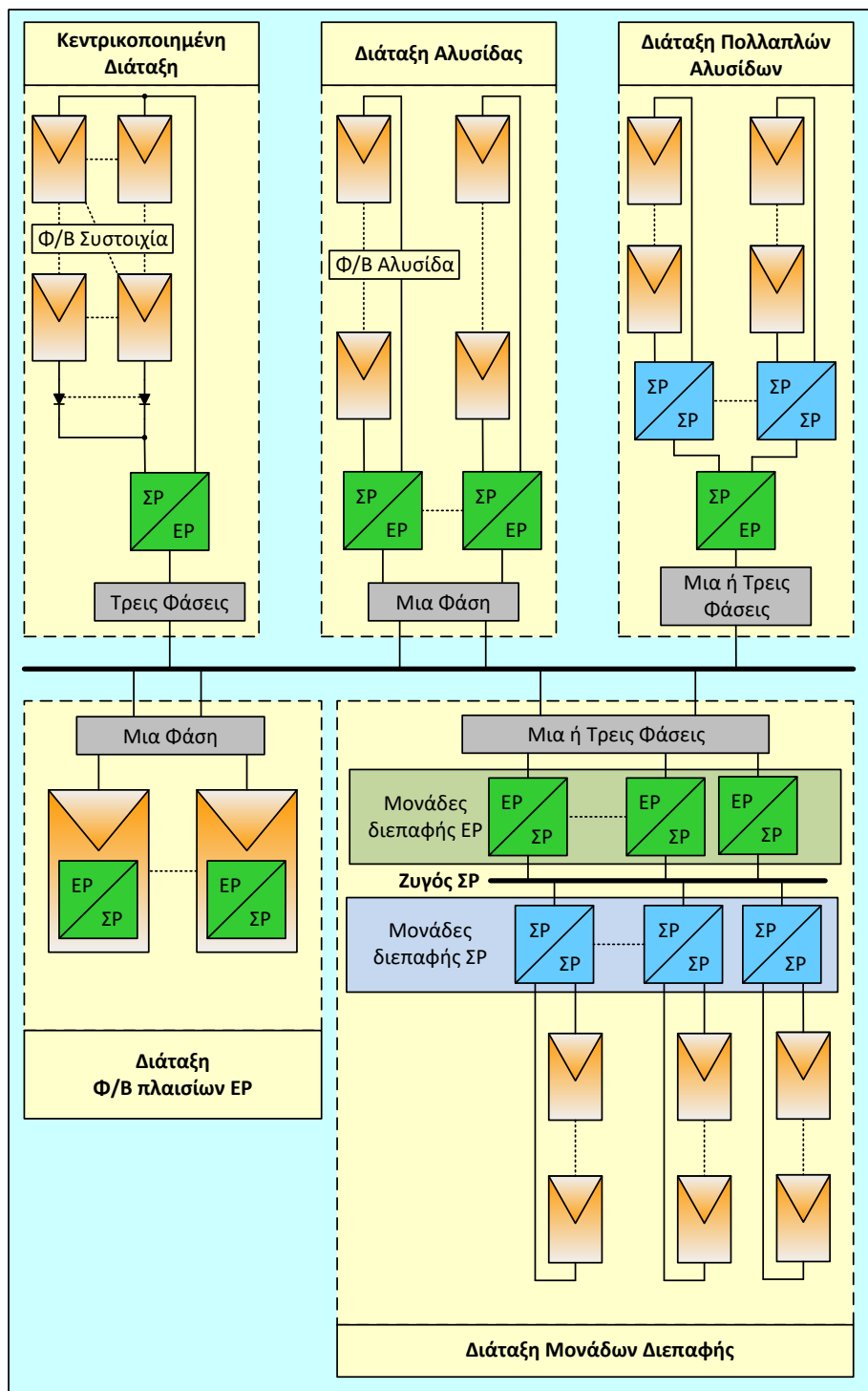
Διατάξεις Φ/Β Συστημάτων

Στα Φ/Β συστήματα, ο τρόπος που θα τοποθετηθούν τα Φ/Β πλαίσια δεν είναι μοναδικός και μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, ενώ η επιλογή των διατάξεων ισχύος επηρεάζει το κόστος, τη λειτουργία και την αποδοτικότητα του συνολικού Φ/Β συστήματος. Στο σχήμα 0.4 δίνονται οι πιο γνωστές διατάξεις Φ/Β συστημάτων [48], [49].

- Η κεντροποιημένη διάταξη χρησιμοποιείται κυρίως σε Φ/Β συστήματα ονομαστική ισχύος μεγαλύτερης των 10kWp, όπου ένας μεγάλος αριθμός Φ/Β πλαισίων συναθροίζονται συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα (Φ/Β συστοιχία). Κάθε σειρά Φ/Β πλαισίων (αλυσίδα) διαθέτει μια δίοδο φραγής ώστε να αποφευχθεί η αντιστροφή ισχύος από αλυσίδες που δέχονται διαφορετική ακτινοβολία και από συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (energy storage systems, ESS) που ενδεχομένως να υπάρχουν.
- Η διάταξη αλυσίδας είναι μια απλοποιημένη εκδοχή της κεντροποιημένης διάταξης, όπου κάθε αλυσίδα συνδέεται με έναν αντιστροφέα ΣΡ/ΕΡ. Εάν η τάση που παρέχει η αλυσίδα δεν είναι αρκετή, τότε χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ ανύψωσης τάσης ή ένας μετασχηματιστής (Μ/Σ) ανύψωσης τάσης (στην πλευρά ΕΡ).
- Η διάταξη πολλαπλών αλυσίδων είναι μια εξέλιξη της διάταξης αλυσίδας και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δυο προηγούμενων διατάξεων. Κάθε μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ

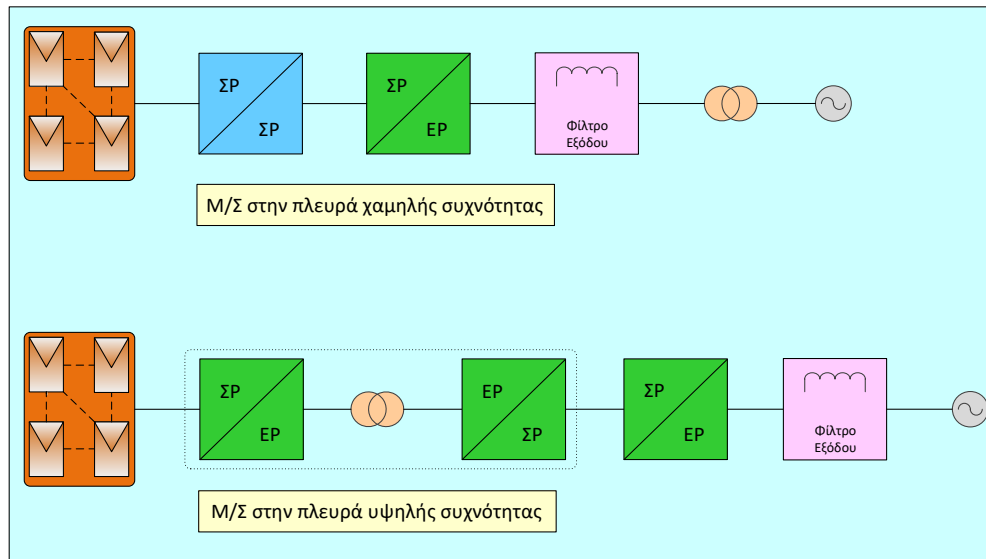
ανύψωσης τάσης υλοποιεί τον MPPT για κάθε αλυσίδα. Η διάταξη αυτή βελτιώνει τη συνολική απόδοση του Φ/Β συστήματος.

- Στη διάταξη Φ/Β πλαισίων EP, κάθε Φ/Β πλαίσιο ενσωματώνει ένα αντιστροφέα ΣΡ/ΕΡ, ο οποίος υλοποιεί τον έλεγχο MPPT. Η τοπολογία αυτή είναι τεχνολογίας τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας (plug-and-play). Η διάταξη αυτή είναι πιο ακριβή και δύσκολη στη συντήρηση σε σχέση με άλλες διατάξεις όταν η ονομαστική ισχύς του συστήματος αυξάνει.
- Η διάταξη μονάδων διεπαφής χρησιμοποιεί ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος ΣΡ/ΣΡ και ΣΡ/ΕΡ, οι οποίοι μοιράζονται ένα κοινό ζυγό ΣΡ. Κάθε μετατροπέας ισχύος ΣΡ/ΣΡ συνδέεται σε μια αλυσίδα Φ/Β πλαισίων και υλοποιεί τον αλγόριθμο MPPT. Επιπλέον, ανάμεσα στο ζυγό ΣΡ και το δίκτυο παρεμβάλλεται κατάλληλος αριθμός αντιστροφέων ΣΡ/ΕΡ που εξαρτάται από την ισχύ του Φ/Β συστήματος. Η αξιοπιστία της διάταξης αυτής είναι υψηλή.



Εικόνα 0.4 Διατάξεις Φ/Β συστημάτων.

Στην περίπτωση που απαιτείται γαλβανική απομόνωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί και ένας Μ/Σ. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 0.5, αυτός μπορεί να τοποθετηθεί είτε στην πλευρά του Φ/Β συστήματος που λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα (high frequency, HF), είτε στην πλευρά της χαμηλής συχνότητας (low frequency, LF) των 50Hz ή 60Hz [50]. Τέλος, είναι αναγκαία και η χρήση ενός φίλτρου ανάμεσα στον αντιστροφέα ΣΡ/ΕΡ και το δίκτυο. Το φίλτρο αυτό είναι συνήθως L, LC ή LCL [51], [52].



Εικόνα 0.5 Γαλβανική απομόνωση στα Φ/Β συστήματα.

Σύνδεση με το Δίκτυο

Τα συνδεδεμένα Φ/Β συστήματα στο δίκτυο πρέπει να υλοποιούν επιπλέον λειτουργίες σε σύγκριση με τα αυτόνομα, όπως π.χ. τη λειτουργία του συγχρονισμού και της προστασίας.

Συγχρονισμός

Οι περισσότεροι αντιστροφείς λειτουργούν σαν πηγές ρεύματος και εγχέουν ρεύμα στο δίκτυο το οποίο πρέπει να είναι ημιτονοειδές και σε φάση με την τάση του δικτύου (λειτουργία με συντελεστή ισχύος σχεδόν ή ίσο με ένα). Ακόμα και σε περιπτώσεις που η τάση του δικτύου είναι παραμορφωμένη ή ασύμμετρη ή η συχνότητα της μεταβάλλεται, απαιτείται από τον αντιστροφέα να συγχρονιστεί με τη βασική αρμονική της.

Μερικές από τις πιο γνωστές τεχνικές συγχρονισμού είναι [53], [54], [55]: εντοπισμός σημείων μηδενισμού (zero crossing detector), ταλαντωτής κλειδώματος φάσης (phase locked oscillator), με βάση το ψηφιακό μετασχηματισμό Fourier (digital Fourier transformation), προσαρμοστικό φίλτρο αποκοπής (adaptive notch filter), με βάση φίλτρα Kalman (Kalman filters), εκτίμηση σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (weighted least squares estimation), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural network), βρόχος κλειδώματος φάσης (phase locked loop, PLL), προσαρμοστικός PLL (adaptive PLL), κ.ά..

Προστασία

Με βάση τους κώδικες λειτουργίας δικτύου, τα Φ/Β συστήματα πρέπει να παρέχουν προστασία μέγιστης και ελάχιστης τάσης και συχνότητας. Επομένως, όταν η ενεργός τιμή της τάσης και/ή συχνότητα είναι έξω από τα επιτρεπτά όρια, το Φ/Β σύστημα θα πρέπει να αποσυνδέεται από το δίκτυο.

Μια άλλη προστασία που πρέπει να παρέχει το Φ/Β σύστημα είναι έναντι της νησιδοποίησης (anti-islanding), η οποία αποτρέπει τον αντιστροφέα να παρέχει ισχύ προς ένα τμήμα του δικτύου όταν αυτό έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο (λόγω σφάλματος ή εργασιών συντήρησης). Υπάρχουν πολλές μέθοδοι προστασίας έναντι της νησιδοποίησης [56], [57], [58], οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: τοπικές (εφαρμοσμένες σε επίπεδο αντιστροφέα) ή απομακρυσμένες (υλοποιημένες

σε επίπεδο δικτύου ή με βάση συστήματα επικοινωνίας). Κάποιες από τις πιο γνωστές μεθόδους είναι: της μεταβολής της άεργου ισχύος (active power variation), της μεταβολής της φάσης (active frequency shift), της μεταβολής της τάσης (sandia voltage shift), της εκτίμησης της σύνθετης αντίστασης μέσω έγχυσης αρμονικών (grid impedance estimation by harmonic injection), κ.ά..

Ενσωμάτωση στο Δίκτυο

Έχουν θεσπιστεί αρκετοί κώδικες λειτουργίας δικτύου, ώστε να διασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία και να προλαμβάνονται πιθανά προβλήματα του ηλεκτρικού δικτύου όταν ενσωματώνεται σε αυτό μεγάλος αριθμός Φ/Β συστημάτων. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται με τη μη ελεγχόμενη παραγωγή ενέργειας από τη Φ/Β πηγή (η οποία εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, κυρίως την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία), με την έγχυση αρμονικών ρεύματος στο δίκτυο και με τη λειτουργία του δικτύου υπό μη κανονικές συνθήκες (π.χ. βραχυκυκλώματα) [59], [60], [61], [62], [63].

Κανονισμοί σχετικά με την έγχυση αρμονικών στο δίκτυο είναι για παράδειγμα της IEC 61000 [62] [60] ή της IEEE Standard 519-1992. Οι κώδικες αυτοί ορίζουν τα επιτρεπτά όρια κάθε αρμονικής παραμόρφωσης και της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος που εγχέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Άλλο ένα σημαντικό θέμα είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος του Φ/Β συστήματος σε μεταβατικές (όταν συμβαίνουν διαταραχές στο σύστημα) και σε μόνιμες καταστάσεις λειτουργίας. Ο αντιστροφέας θα πρέπει να ελέγχει τη φάση του ρεύματος που εγχέει στο δίκτυο, ώστε να παρέχει ή να καταναλώνει την επιθυμητή άεργο ισχύ, όπως καθορίζεται από το διαχειριστή δικτύου ή από εξωτερικό ελεγκτή του αντιστροφέα.

Υβριδικά Φ/Β Συστήματα με Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Ο έλεγχος της άεργου ισχύος μεταξύ Φ/Β εγκατάστασης και δικτύου που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι σχετικά απλός να υλοποιηθεί, διότι το Φ/Β σύστημα διαθέτει ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που μπορούν εύκολα να ρυθμίσουν την παρεχόμενη ή καταναλισκόμενη άεργο ισχύ (προφανώς μέσα στα όρια της μέγιστης φαινόμενης ισχύος του μετατροπέα). Αντίθετα, μέχρι τώρα τα συμβατικά Φ/Β συστήματα δεν παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες ενεργού ισχύος, αλλά λειτουργούν στο MPP και διαθέτουν όλη τη παραγόμενη ισχύ στο δίκτυο. Για την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών ελέγχου της ενεργού ισχύος μπορούμε να διακρίνουμε δυο περιπτώσεις [64]:

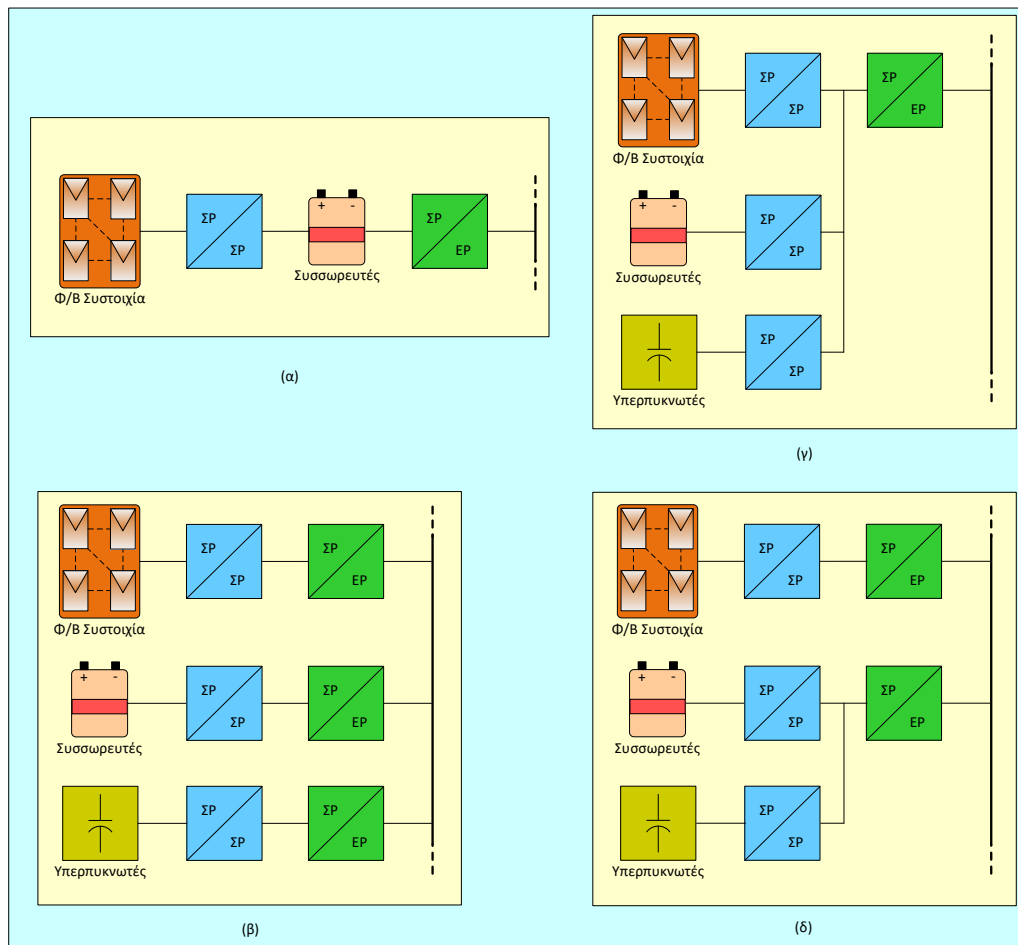
- Η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ενεργός ισχύ της Φ/Β πηγής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από τη ζητούμενη ενεργό ισχύ από το δίκτυο. Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχουν δυο επιλογές: 1) Το Φ/Β σύστημα να λειτουργήσει σε σημείο διαφορετικό από το MPP έτσι ώστε να παρέχει την επιθυμητή ενεργό ισχύ στο δίκτυο ή 2) να προστεθεί στη Φ/Β εγκατάσταση ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Συνεπώς, η Φ/Β πηγή ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει στο MPP και το πλεόνασμα ενέργειας αποθηκεύεται στο ESS.
- Η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ενεργός ισχύς της Φ/Β πηγής ενέργειας είναι μικρότερη από τη ζητούμενη ενεργό ισχύ από το δίκτυο. Σε αυτή τη περίπτωση είναι απαραίτητο το ESS ώστε να καλύψει την επιπλέον ενεργό ισχύ που απαιτείται.

Γίνεται επομένως φανερό ότι τα υβριδικά Φ/Β συστήματα με ESS επιτρέπουν στη Φ/Β πηγή ενέργειας να λειτουργεί στο MPP ενώ ταυτόχρονα η Φ/Β εγκατάσταση έχει τη δυνατότητα να παρέχει και

βοηθητικές υπηρεσίες ενεργού ισχύος προς το δίκτυο. Το υβριδικό σύστημα συμπεριφέρεται σαν μια συμβατική γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας, αφού μπορεί να αποκοπεί από το δίκτυο και να συνδεθεί σε αυτό παρέχοντας την επιθυμητή ισχύ, ανάλογα με τις απαιτήσεις του διαχειριστή δικτύου [43], [65].

Μια πιθανή διάταξη για τα υβριδικά Φ/Β συστήματα με ESS (διαδεδομένη σε απομονωμένα ΣΗΕ) βασίζεται στην απευθείας σύνδεση της συστοιχίας συσσωρευτών με τη πλευρά ΣΡ του αντιστροφέα σχήμα 0.6(α)]. Στην περίπτωση αυτή, ο εφαρμοζόμενος έλεγχος στο μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ επιτυγχάνει απομάστευση μέγιστης ισχύος από τη Φ/Β πηγή ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται στη συνέχεια στη συστοιχία συσσωρευτών. Ωστόσο, η στοχαστική φύση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος της Φ/Β πηγής και της ισχύος που ζητάει το ΣΗΕ οδηγεί σε επαναλαμβανόμενες σύντομες φορτίσεις/εκφορτίσεις των συσσωρευτών, με αποτέλεσμα την πρόωρη γήρανση τους [66].

Πιο αποδοτική χρήση των συσσωρευτών μπορεί να επιτευχθεί με την αξιοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και υπερπυκνωτών (ultracapacitors). Οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος παρέχουν τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της λειτουργίας φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών, ενώ οι υπερπυκνωτές μπορούν να καλύψουν απότομες απαιτήσεις ισχύος. Μια πιθανή διάταξη για αυτά τα υβριδικά συστήματα φαίνεται στο σχήμα 0.6(β), στην οποία όλες οι πηγές συνδέονται μέσω μετατροπέων ισχύος στο κοινό ζυγό ΕΡ του δικτύου [65]. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένα σύστημα επικοινωνίας μεταξύ των μετατροπέων. Σε μια άλλη πιθανή διάταξη [σχήμα 0.6(γ)], οι πηγές ενώνονται μέσω διακοπτικών διατάξεων στην πλευρά ΣΡ του αντιστροφέα [66]. Τέλος, έχει προταθεί και μια μεικτή διάταξη που απεικονίζεται στο σχήμα 0.6(δ), η οποία συνδυάζει κάποια από τα πλεονεκτήματα των δυο προηγούμενων διατάξεων.



Εικόνα 0.6 Διατάξεις υβριδικών Φ/Β συστημάτων με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Για τη εύρυθμη λειτουργία του υβριδικού Φ/Β συστήματος με ESS απαιτείται ο σχεδιασμός συστήματος τοπικής διαχείρισης ενέργειας (local energy management system, LEMS) που θα παρέχει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου σε κάθε μετατροπέα ισχύος. Σκοπός του LEMS είναι:

- η ικανοποίηση των απαιτήσεων ηλεκτρικής ισχύος του διαχειριστή δικτύου,
- η διαχείριση της στοχαστικής φύσης παραγόμενης ενέργειας της Φ/Β πηγής,
- η διαχείριση της κατάστασης φόρτισης των αποθηκευτικών μέσων ενέργειας,
- η προστασία του συστήματος,
- η πρόβλεψη για παροχή βοηθητικών υπηρεσιών προς το δίκτυο.

Ανακεφαλαίωση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν βασικές πληροφορίες για τα Φ/Β συστήματα. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε ένα γενικό σχήμα ελέγχου Φ/Β συστήματος και περιεγράφηκαν οι στόχοι του ελέγχου μεταξύ των οποίων και η απομάστευση μέγιστης ισχύος από τη Φ/Β πηγή ενέργειας. Ακολούθως, παρατέθηκαν οι βασικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα, τόσο για Φ/Β συνδεδεμένα στο δίκτυο αλλά και για υβριδικά Φ/Β συστήματα.

Τεχνικές Ελέγχου Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Σύνοψη

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται στα φ/β συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο. Τόσο διατάξεις με ένα είδος μετατροπέα ισχύος (αντιστροφέα) όσο και με συνδυασμό μετατροπέων ισχύος (π.χ. μετατροπέα dc/dc ανύψωσης τάσης και αντιστροφέα) αξιοποιούνται στην πράξη όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 0**Error! Reference source not found.****Error! Reference source not found.****Error! Reference source not found.** Ο έλεγχος των συνδεδεμένων στο δίκτυο φ/β συστημάτων θα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες βασικές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα, επίτευξη λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος και έγχυση ρευμάτων με χαμηλή συνολική αρμονική παραμόρφωση (total harmonic distortion, THD). Ειδικότερα, το σύστημα ελέγχου για τα φ/β συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο, περιλαμβάνει τρία μέρη: (1) έλεγχος MPPT και ενεργού ισχύος, (2) έλεγχος άεργου ισχύος και (3) συγχρονισμός δικτύου. Το κεφάλαιο επικεντρώνεται στις βασικές τεχνικές ελέγχου φ/β συστημάτων συνδεδεμένο στο δίκτυο υπό κανονικές συνθήκες (ως προς τη συχνότητα, το πλάτος και τη φάση). Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι MPPT είναι ευρετικοί και συνδυάζουν μια εξωτερική διατάραξη του συστήματος και έναν αλγόριθμο [45]. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται η μέθοδος της P&O [67], της αυξητικής αγωγιμότητας [68], κ.ά.. Στον έλεγχο φ/β συστημάτων, εφαρμόζεται συνήθως ο σειριακός έλεγχος που αποτελείται από εν σειρά βρόχους [44], όπως για παράδειγμα: (1) εξωτερικό βρόχο ελέγχου ισχύος/τάσης και (2) εσωτερικό βρόχο ελέγχου ρεύματος. Επιπλέον, για τον τριφασικό αντιστροφέα ο έλεγχος υλοποιείται συνήθως στο dq πλαίσιο αναφοράς με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park, ενώ ο συγχρονισμός μπορεί να επιτευχθεί με ένα PLL ελεγκτή.

Έλεγχος MPPT

Υπάρχουν πολλοί αποτελεσματικοί αλγόριθμοι MPPT για την επίτευξη MPP λειτουργίας. Στις περισσότερες μεθόδους, υπάρχει ένας ελεγκτής εσωτερικού βρόχου που οδηγεί την κατάσταση που ελέγχει σε μια τιμή αναφοράς, η οποία καθορίζεται από τον ελεγκτή εξωτερικού βρόχου ο οποίος εκτελεί κάποιον MPPT αλγόριθμο. Η μέθοδος της P&O και της αυξητικής αγωγιμότητας έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να βρουν το μέγιστο μιας κυρτής καμπύλης ισχύος παρέχοντας την κατάλληλη τιμή αναφοράς στον εσωτερικό βρόχο ανάλογα με την μετρούμενη παραγόμενη ισχύ του φ/β. Μια άλλη MPPT μέθοδος, ο έλεγχος συσχετισμού κυμάτωσης (ripple correlation control, RCC), είναι μια μέθοδος εύρεσης ακροτάτων (extremum seeking) που χρησιμοποιεί τη χρονική παράγωγο των μετρούμενων καταστάσεων. Υπάρχουν επίσης αλγόριθμοι MPPT που βασίζονται στην ασαφή λογική και νευρωνικά δίκτυα που δεν χρειάζονται τη γνώση του ακριβούς μοντέλου, αλλά δεν είναι εύκολο να γίνει σωστή ρύθμιση των αλγορίθμων [45].

Άλλες μέθοδοι MPPT ενσωματώνουν μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για τον υπολογισμό του MPP για τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες [69], [70]. Ως εκ τούτου, εκτός από τους αισθητήρες που χρειάζονται για τον έλεγχο των μετατροπέων ισχύος, απαιτούνται και δυο επιπλέον αισθητήρες, γεγονός που αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ακόμα κι αν το μοντέλο αρχικά περιγράφει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του φ/β, οι παράμετροι του μοντέλου πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να επαναπροσδιορίζονται, επειδή μεταβάλλονται λόγω της αλλοίωσης και γήρανσης των φ/β κυττάρων.

Υπάρχουν επίσης μέθοδοι MPPT που βασίζονται στη χαρακτηριστική του φ/β και απαιτούν λιγότερες μετρήσεις. Οι αλγόριθμοι MPPT κλασματικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος και κλασματικού ρεύματος βραχυκύκλωσης διακόπτουν περιοδικά την κανονική λειτουργία του φ/β για να μετρήσουν την τάση ανοιχτού κυκλώματος ή το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φ/β και στη συνέχεια θέτουν ως τιμή αναφοράς κάποιο κλάσμα της αντίστοιχης μετρούμενης τιμής. Βεβαίως, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, το φ/β δεν παράγει ηλεκτρική ισχύ, σύμφωνα με την εικόνα **Error! Reference source not found.** Εναλλακτικά, ένα αντιπροσωπευτικό φ/β πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, χωρίς να χρειάζεται να διακόπτεται η λειτουργία των υπόλοιπων φ/β πλαισίων. Ωστόσο, η διαφοροποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων λόγω γήρανσης/αλλοίωσης ή μερικής σκίασης μειώνει σημαντικά την αποδοτικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου [45].

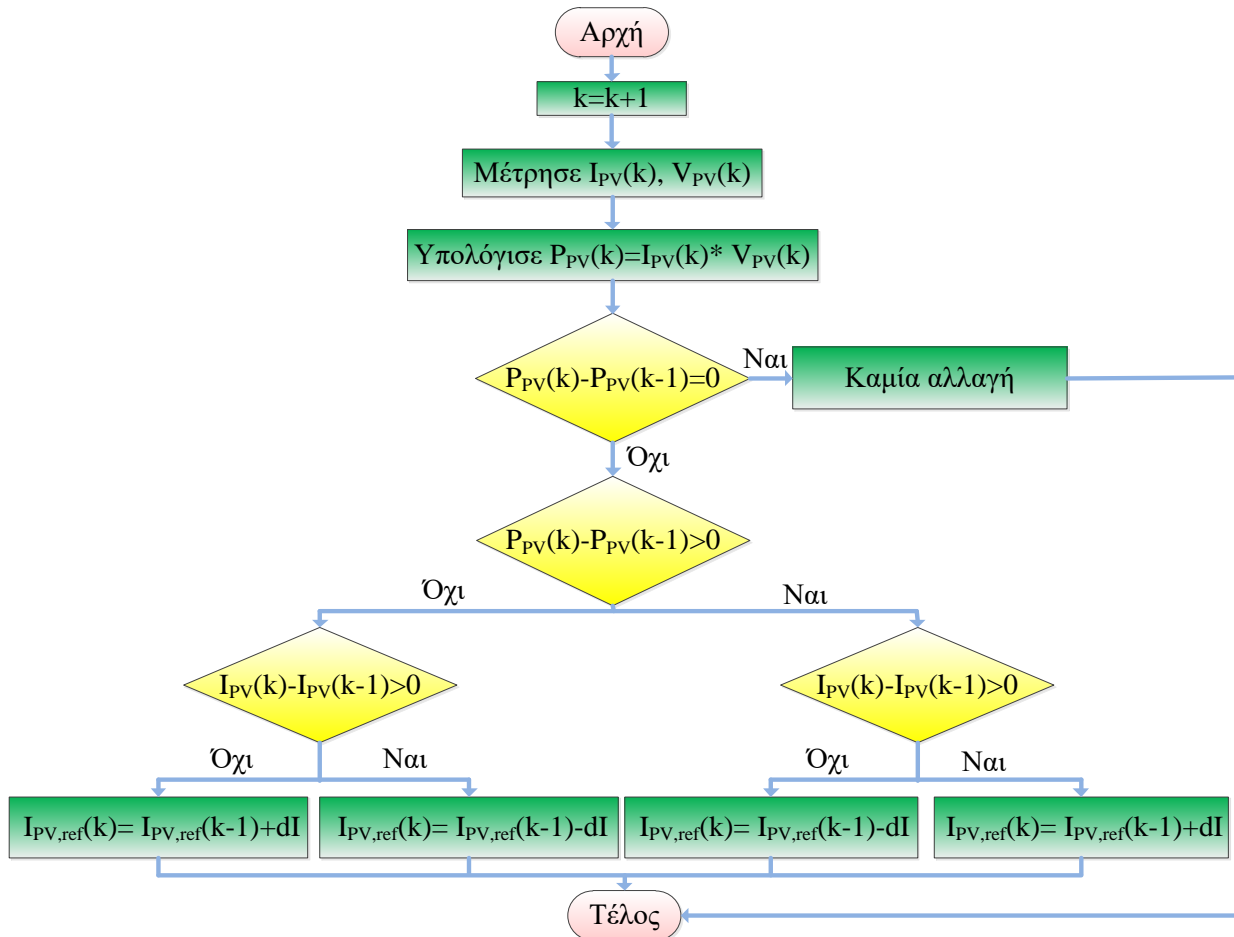
Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί εκατοντάδες MPPT αλγόριθμοι, στη συνέχεια περιγράφονται οι πιο βασικοί.

Μέθοδος Διαταραχής και Παρατήρησης

Η μέθοδος P&O μεταβάλλει περιοδικά (αυξάνοντας ή ελαττώνοντας) το ρεύμα του φ/β και συγκρίνει στη συνέχεια την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ με αυτήν της προηγούμενης περιόδου. Εάν με την μεταβολή του ρεύματος, η παρεχόμενη ισχύς αυξήθηκε, η μέθοδος συνεχίζει να μεταβάλλει το ρεύμα κατά dl προς την ίδια κατεύθυνση. Διαφορετικά η μέθοδος μεταβάλλει το ρεύμα προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά dl. Στην επόμενη περίοδο επαναλαμβάνεται ο ίδιος αλγόριθμος. Γενικά, η μέθοδος P&O υλοποιείται σε ψηφιακό επεξεργαστή καθώς ο αλγόριθμος μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα με κώδικα.

Στην εικόνα 0.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της μεθόδου P&O. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μεταβλητή που μεταβάλλεται είναι το ρεύμα του φ/β. Θα μπορούσε όμως η μέθοδος P&O να μεταβάλλει το λόγο κατάτμησης του μετατροπέα ισχύος ή την τάση του φ/β. Όταν μεταβάλλεται το ρεύμα ή η τάση του φ/β, τότε απαιτείται και ένας εσωτερικός βρόχος ελέγχου που θα οδηγεί την κατάσταση στην τιμή αναφοράς που ορίζει κάθε στιγμή ο αλγόριθμος P&O. Η μέθοδος οδηγεί το φ/β στο σημείο MPP, αλλά

όταν το προσεγγίσει, τότε το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται γύρω από αυτό. Αυτό σημαίνει ότι δεν επιτυγχάνεται επακριβώς λειτουργία στο MPP, με αποτέλεσμα και η παραγόμενη ισχύς του φ/β να μην είναι η μέγιστη δυνατή.



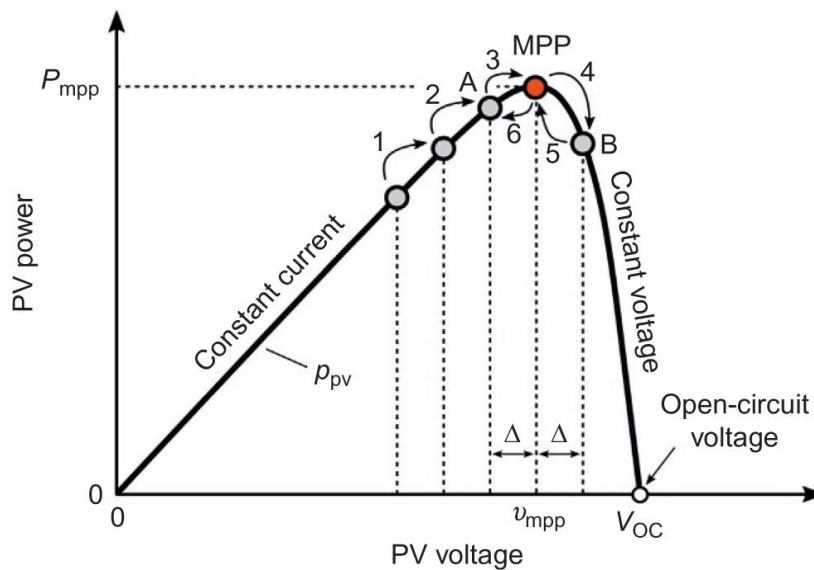
Εικόνα 0.1 Διάγραμμα ροής της μεθόδου P&O.

Επειδή ο αλγόριθμος P&O χρησιμοποιεί την τιμή της παραγόμενης ισχύς των φ/β, απαιτούνται αισθητήρες ρεύματος και τάσης, ώστε να υπολογιστεί η ισχύς από τις μετρήσεις ρεύματος και τάσης. Βεβαίως, κάθε επιπλέον αισθητήρας όπως είναι φυσικό προσθέτει κόστος και καταλαμβάνει χώρο. Επιπλέον, έχει δείχθει ότι αλγόριθμος P&O μπορεί να αποτύχει να οδηγήσει το φ/β στο MPP όταν μεταβάλλεται γρήγορα η ακτινοβολία [71]. Ωστόσο, ο P&O είναι αρκετά διαδεδομένος αφού θεωρείται ένας σχετικά απλός και αποτελεσματικός αλγόριθμος για επίτευξη MPP λειτουργίας σε φ/β, ιδίως αν η ακτινοβολία δεν μεταβάλλεται γρήγορα.

Μέθοδος Διαταραχής και Παρατήρησης με Ομοιόμορφη Ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος P&O είναι μια μέθοδος εύρεσης ακροτάτων που βρίσκει το MPP όταν η καμπύλη ισχύος είναι κυρτή. Στην εικόνα 0.2, απεικονίζεται η P-V χαρακτηριστική ενός Φ/Β πλαισίου υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία, η οποία είναι κυρτή. Έτσι, ανεξάρτητα από το σημείο αφετηρίας στην καμπύλη, το σημείο λειτουργίας θα κινείται συνεχώς προς το ολικό μέγιστο. Για παράδειγμα, αν στο αρχικό σημείο λειτουργίας της εικόνας 0.2 πραγματοποιηθεί μια αύξηση της

τάσης αναφοράς κατά Δ , τότε αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της ισχύος. Επομένως, ο αλγόριθμος P&O θα συνεχίσει να αυξάνει την τάση αναφοράς, με αποτέλεσμα το σημείο λειτουργίας να πλησιάζει το MPP. Μετά το τρίτο βήμα (A→MPP), το σημείο λειτουργίας ταυτίζεται με το MPP, όμως ο αλγόριθμος θα συνεχίσει να αυξάνει την τάση αναφοράς (MPP→B). Αυτή τη φορά όμως, η ισχύς μειώνεται, οπότε ο αλγόριθμος αλλάζει κατεύθυνση και μειώνει την τάση αναφοράς κατά Δ (B→MPP). Γίνεται εμφανές ότι τελικά το σημείο λειτουργίας θα ταλαντώνεται μεταξύ των σημείων A και B, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 0.2. Στην περίπτωση που αλλάξουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες, ο αλγόριθμος θα μεταβάλλει κατάλληλα το σημείο λειτουργίας και θα το οδηγήσει προς το νέο MPP. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται γύρω από το MPP, με αποτέλεσμα να μην παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύ από το φ/β σύστημα. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτός ο αλγόριθμος ενδέχεται να αποτυγχάνει να οδηγήσει το φ/β στο MPP όταν η ακτινοβολία μεταβάλλεται γρήγορα.



Εικόνα 0.2 Μέθοδος P&O με ομοιόμορφη ακτινοβολία.

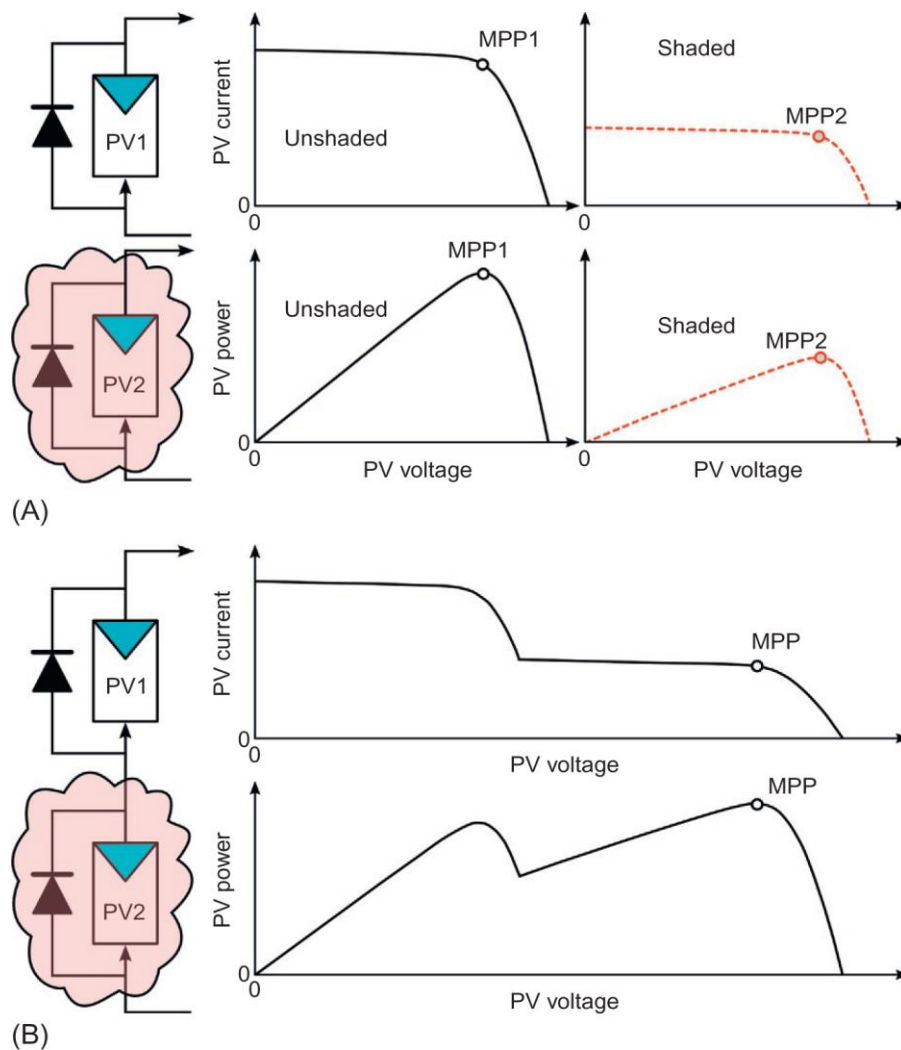
Έλεγχος MPPT με Μη Ομοιόμορφη Ακτινοβολία

Στη συνέχεια, οι ίδιοι MPPT αλγόριθμοι θα εξεταστούν σε περίπτωση μη ομοιόμορφης ακτινοβολίας. Σε αυτή την περίπτωση, η προσπίπτουσα ακτινοβολία στις φ/β κυψέλες δεν είναι ίδια. Το γεγονός αυτό από μόνο του περιορίζει την αποδοτικότητα του φ/β συστήματος, αλλά μια πιθανή μη αποτελεσματική λειτουργία του MPPT αλγορίθμου μπορεί να μειώσει περαιτέρω την απόδοση του φ/β συστήματος. Στην εικόνα 0.3 απεικονίζεται η επίδραση της μερικής σκίασης ή της διαφοροποίησης λόγω αλλοίωσης μεταξύ δύο φ/β πλαισίων: το φ/β πλαίσιο 1 είτε είναι μερικώς σκιασμένο ή αλλοιωμένο έτσι ώστε το ρεύμα και η ισχύος του για μια δεδομένη τάση να λαμβάνει τη μισή τιμή σε σύγκριση με το φ/β πλαίσιο 2. Οι χαρακτηριστικές των I-V και P-V για κάθε φ/β πλαίσιο ξεχωριστά καθώς και η συνολική χαρακτηριστική των δυο φ/β πλαισίων συνδεδεμένων εν σειρά φαίνεται στην εικόνα 0.3. Τα MPP1 και MPP2 συμβολίζουν το μέγιστο σημείο της καμπύλης ισχύος-τάσης για τα φ/β πλαίσια 1 και 2 αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος, οι τάσεις MPP και για τα δύο φ/β πλαίσια είναι περίπου ίδια. Ωστόσο, η

ισχύς στο MPP1 του φ/β πλαισίου 1 είναι διπλάσια από αυτή του φ/β πλαισίου 2, το οποίο έχουμε θεωρήσει ότι σκιάζεται μερικώς ή έχει αλλοιωθεί.

Όταν τα δυο φ/β πλαίσια συνδέονται σε σειρά, τότε διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα ενώ η συνολική τάση τους ισούται με το άθροισμα των τάσεων κάθε πλαισίου ξεχωριστά. Η συνολική χαρακτηριστική I-V και P-V των δυο φ/β πλαισίων συνδεδεμένων εν σειρά φαίνεται στην εικόνα 0.3. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη P-V έχει δύο μέγιστα. Το ολικό μέγιστο που βρίσκεται στα δεξιά αντιστοιχεί περίπου στο διπλάσιο της MPP τάσης του κάθε φ/β πλαισίου ξεχωριστά καθώς και στο ρεύμα MPP του φ/β πλαισίου 2 (το μισό περίπου του ρεύματος του φ/β πλαισίου 1). Σημειώνεται ότι η παραγόμενη ισχύς στο ολικό μέγιστο δεν ισούται με το άθροισμα των μέγιστων ισχύων του κάθε πλαισίου ξεχωριστά, αλλά είναι λιγότερη ως συνέπεια της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών των δυο φ/β πλαισίων, με αποτέλεσμα η απόδοση του φ/β συστήματος να μειώνεται.

Στη συνέχεια, οι μέθοδοι P&O και κλασματικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος εφαρμόζονται όταν έχουμε μη ομοιόμορφη ακτινοβολία για να εξετάσουμε τη συμπεριφορά τους σε αυτές τις περιπτώσεις.



Εικόνα 0.3 Χαρακτηριστικές I-V και P-V δύο φ/β πλαισίων σε σειρά υπό μερική σκίαση:

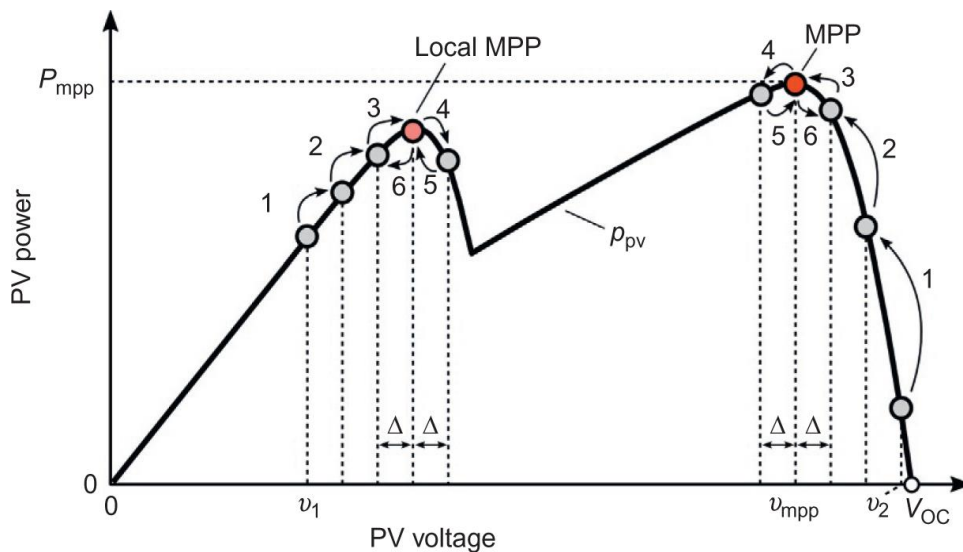
- (A) Χαρακτηριστική κάθε φ/β πλαισίου ξεχωριστά.
 (B) Συνολική χαρακτηριστική των δυο φ/β πλαισίων συνδεδεμένων εν σειρά.

Μέθοδος Διαταραχής και Παρατήρησης με Μη Ομοιόμορφη Ακτινοβολία

Σε συνθήκες μη ομοιόμορφης ακτινοβολίας, η καμπύλη ισχύος συχνά έχει πολλαπλά μέγιστα, όπως φαίνεται για παράδειγμα στην εικόνα 0.3. Ο αλγόριθμος P&O θα οδηγήσει το σημείο λειτουργίας στο πλησιέστερο τοπικό μέγιστο, το οποίο όμως μπορεί να μην είναι το ολικό μέγιστο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 0.40.40.4, ανάλογα με το πού ξεκινά ο αλγόριθμος, το σημείο λειτουργίας οδηγείται προς την κατεύθυνση που αυξάνεται η καμπύλη, μέχρι να φτάσει σε ένα τοπικό μέγιστο (βήματα 1–3). Μόλις προσεγγίσει το τοπικό μέγιστο, το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται γύρω από αυτό (βήματα 4–6 και μετά ξεκινάει πάλι από το βήμα 3). Ειδικότερα, εάν ο αλγόριθμος ξεκινήσει από μια χαμηλή τάση (π.χ. v_1), θα αυξήσει την τάση του φ/β συστήματος και θα το οδηγήσει στο τοπικό μέγιστο. Ωστόσο, αν ο αλγόριθμος ξεκινήσει από υψηλότερη τάση (π.χ. v_2), θα μειώσει την τάση και θα το οδηγήσει στο άλλο τοπικό μέγιστο, το οποίο είναι και το ολικό μέγιστο.

Έτσι, γίνεται εμφανές ότι ο αλγόριθμος P&O δεν μπορεί να εγγυηθεί ότι θα οδηγήει κάθε φορά το σημείο λειτουργίας στο ολικό μέγιστο.

Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου P&O είναι ότι υλοποιείται εύκολα σε ψηφιακό επεξεργαστή. Το μειονέκτημα είναι ότι εκτελεί ταλάντωση όταν προσεγγίσει το μέγιστο, το οποίο όπως είδαμε μπορεί να μην είναι και το ολικό. Και στις δυο περιπτώσεις μειώνεται η απόδοση του φ/β συστήματος. Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος P&O και οι διάφορες παραλλαγές του, αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους και ευρέως χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους MPPT, ακόμη και στις περιπτώσεις μη ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 0.4 Μέθοδος P&O με μη ομοιόμορφη ακτινοβολία.