

5 Κεφάλαιο

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές σχέσεις για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύς στα δύο άκρα μιας γραμμής μεταφοράς (ΓΜ), όταν αυτή βρίσκεται υπό τάση.

5.2 Γενικευμένες σχέσεις ισχύος

Έστω μια ΓΜ η οποία περιγράφεται από ένα δίθυρο κύκλωμα με γενικευμένες παραμέτρους ABCD, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Οι σταθερές ABCD είναι:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = A \angle \theta_A, \quad (5.1)$$

$$\mathbf{B} = B \angle \theta_B, \quad (5.2)$$

$$\mathbf{C} = C \angle \theta_C, \quad (5.3)$$

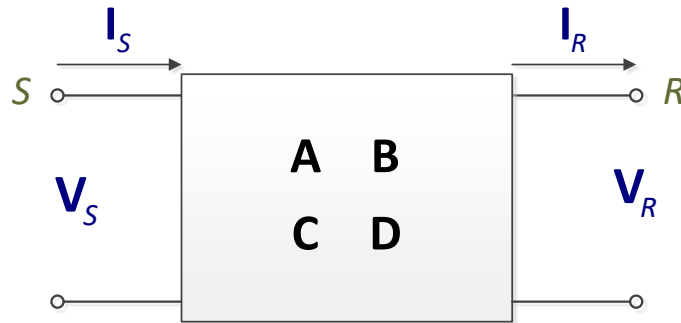
Οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα στο άκρο αποστολής και άφιξης της ΓΜ περιγράφονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

$$\mathbf{V}_S = V_S \angle \theta, \quad (5.4)$$

$$\mathbf{V}_R = V_R \angle 0, \quad (5.5)$$

$$I_S = I_S \angle \varphi_S, \quad (5.6)$$

$$I_R = I_R \angle \varphi. \quad (5.7)$$



Σχήμα 5.1: Δίδυρο κύκλωμα με σταθερές ABCD

Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις:

$$V_S = \mathbf{A}V_R + \mathbf{B}I_R, \quad (5.8)$$

$$I_S = \mathbf{C}V_R + \mathbf{D}I_R. \quad (5.9)$$

5.2.1 Πτώση τάσης και διακύμανση τάσης

Από την (5.8) ορίζεται η *πτώση τάσης* (ΔV) σε μια ΓΜ ως η διαφορά των μέτρων V_S και V_R :

$$\Delta V = V_S - V_R. \quad (5.10)$$

Ορίζεται επίσης και η *ανηγμένη πτώση τάσης* ($\Delta V(\%)$) στο άκρο αναχώρησης ως:

$$\Delta V(\%) = \frac{V_S - V_R}{V_S} \cdot 100. \quad (5.11)$$

Αν θεωρηθεί ότι η τάση στο άκρο αναχώρησης S της ΓΜ είναι σταθερή και έστω $V_{R,0}$ και $V_{R,FL}$ είναι αντίστοιχα το μέτρο της τάσης στο άκρο άφιξης σε κενή λειτουργία και υπό πλήρες φορτίο, ορίζεται στην (5.12) η *διακύμανση τάσης* της ΓΜ, ανηγμένη στην τάση πλήρους φορτίου.

$$\text{Διακύμανση τάσης} = \frac{V_{R,0} - V_{R,FL}}{V_{R,FL}} \cdot 100 = \frac{V_S / |\mathbf{A}| - V_{R,FL}}{V_{R,FL}} \cdot 100. \quad (5.12)$$

Καθώς στην εν κενώ λειτουργία ισχύει $I_R=0$, αντικαθιστώντας στην (5.8), προκύπτει ότι $|A|=V_S/V_R$, οπότε και τελικά ισχύει $V_{R,0}=V_S/|A|$.

5.2.2 Λειτουργικά διαγράμματα ΓΜ

Από την (5.8) υπολογίζεται το ρεύμα στο άκρο άφιξης ως:

$$I_R = \frac{V_S}{B} - \frac{AV_R}{B} = \frac{V_S}{B} \angle(\theta - \theta_B) - \frac{AV_R}{B} \angle(\theta_A - \theta_B). \quad (5.13)$$

Η μιγαδική ισχύς ανά φάση $S_R = P_R + jQ_R = P_R + jP_R \tan\varphi$ στο άκρο R είναι:

$$S_R = V_R I_R^* = \frac{V_R V_S^* - AV_R^2}{B^*} = P_R + jQ_R, \quad (5.14)$$

ή αλλιώς

$$S_R = \frac{V_S V_R}{B} \angle(\theta_B - \theta) - \frac{V_R^2 A}{B} \angle(\theta_B - \theta_A). \quad (5.15)$$

Ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία για την ανά φάση μιγαδική ισχύ στο άκρο αποστολής προκύπτει ότι:

$$S_S = V_S I_S^* = \frac{A^* V_S^2 - V_S V_R^*}{B^*} = P_S + jQ_S, \quad (5.16)$$

ή αλλιώς

$$S_S = \frac{AV_S^2}{B} \angle(\theta_B - \theta_A) - \frac{V_S V_R}{B} \angle(\theta_B + \theta). \quad (5.17)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς στο άκρο άφιξης και αποστολής της ΓΜ αντιστοιχεί στο πραγματικό και στο φανταστικό μέρος των (5.15) και (5.17), αντίστοιχα. Οπότε συνοψίζοντας η συνολική ισχύς και στις τρεις φάσεις είναι:

$$\begin{aligned} P_{R-3\varphi} &= 3P_R = 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} \cos(\theta_B - \theta) - \frac{AV_R^2}{B} \cos(\theta_B - \theta_A) \right) \\ Q_{R-3\varphi} &= 3Q_R = 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} \sin(\theta_B - \theta) - \frac{AV_R^2}{B} \sin(\theta_B - \theta_A) \right) \end{aligned} \quad (5.18)$$

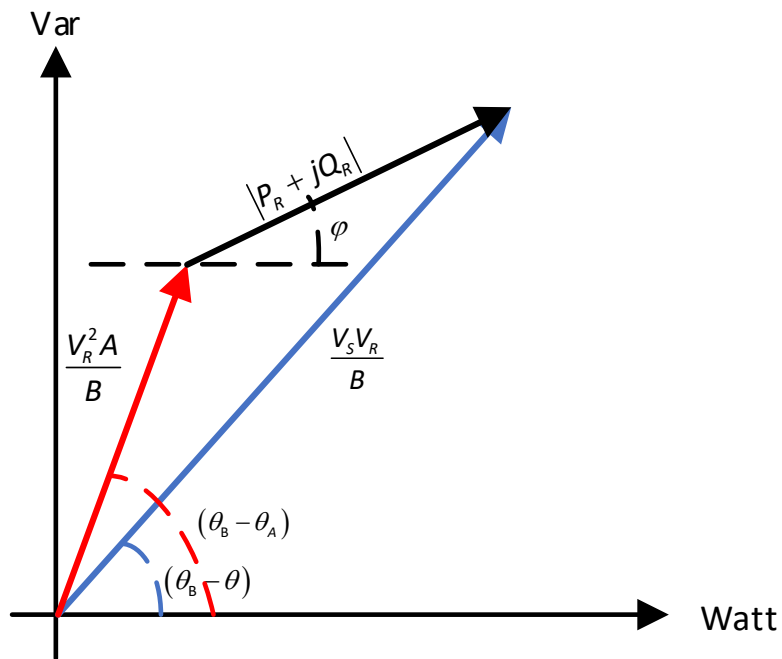
$$\begin{aligned}
 P_{S-3\varphi} &= 3 \left(\frac{AV_S^2}{B} \cos(\theta_B - \theta_A) - \frac{V_S V_R}{B} \cos(\theta_B + \theta) \right) \\
 Q_{S-3\varphi} &= 3 \left(\frac{AV_S^2}{B} \sin(\theta_B - \theta_A) - \frac{V_S V_R}{B} \sin(\theta_B + \theta) \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

όπου $P_{R-3\varphi}$, $Q_{R-3\varphi}$, η συνολική ενεργός και η άεργος ισχύς στις τρεις φάσεις στο άκρο R, $P_{S-3\varphi}$, $Q_{S-3\varphi}$, η συνολική ενεργός και η άεργος ισχύς στις τρεις φάσεις στο άκρο S. Θεωρώντας τις πολικές τάσεις $V_{S\pi}$ και $V_{R\pi}$ αντίστοιχα για τα άκρα αποστολής και άφιξης η (5.18) και η (5.19) γράφονται:

$$\begin{aligned}
 P_{R-3\varphi} &= \frac{V_{S\pi} V_{R\pi}}{B} \cos(\theta_B - \theta) - \frac{AV_{R\pi}^2}{B} \cos(\theta_B - \theta_A) \\
 Q_{R-3\varphi} &= \frac{V_{S\pi} V_{R\pi}}{B} \sin(\theta_B - \theta) - \frac{AV_{R\pi}^2}{B} \sin(\theta_B - \theta_A)
 \end{aligned}
 \tag{5.20}$$

$$\begin{aligned}
 P_{S-3\varphi} &= \frac{AV_{S\pi}^2}{B} \cos(\theta_B - \theta_A) - \frac{V_{S\pi} V_{R\pi}}{B} \cos(\theta_B + \theta) \\
 Q_{S-3\varphi} &= \frac{AV_{S\pi}^2}{B} \sin(\theta_B - \theta_A) - \frac{V_{S\pi} V_{R\pi}}{B} \sin(\theta_B + \theta)
 \end{aligned}
 \tag{5.21}$$

Από την (5.15) προκύπτει ότι για μια δεδομένη ΓΜ ($\mathbf{A}=\mathbf{B}=\mathbf{C}=\mathbf{D}=ct$) η μιγαδική ισχύς $\mathbf{S}_R = P_R + jQ_R$ μπορεί να παρασταθεί σε ένα μιγαδικό επίπεδο ως η διαφορά δύο στρεφόμενων διανυσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Ο πραγματικός και ο φανταστικός άξονας του μιγαδικού επιπέδου του Σχήματος 5.2 εκφράζεται σε Watt και Var, αντίστοιχα.



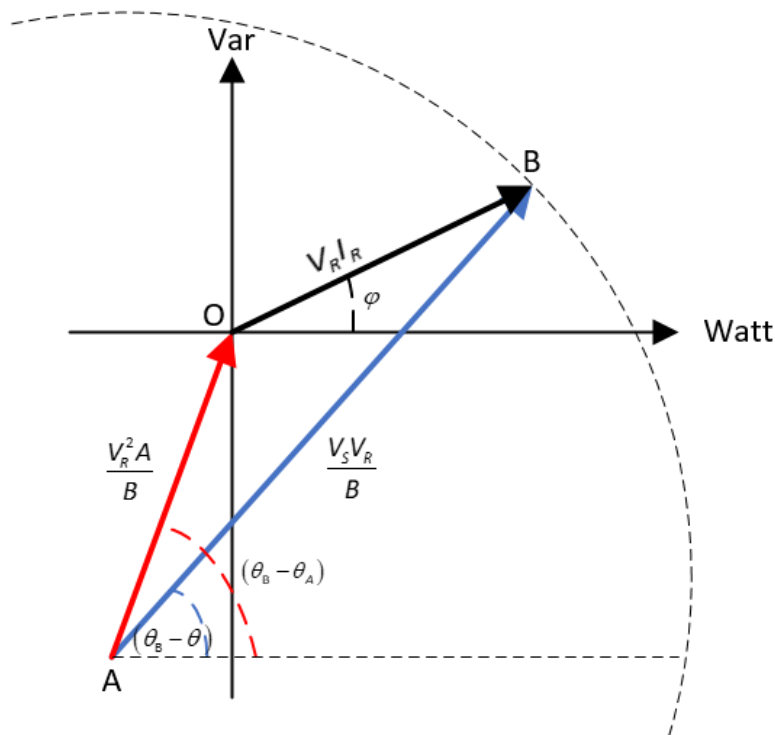
Σχήμα 5.2: Διανυσματική αναπαράσταση των όρων της μιγαδικής ισχύος στο μιγαδικό επίπεδο

Μετατοπίζοντας την αρχή των αξόνων του Σχήματος 5.2, ώστε αυτή να συμπίπτει με την αρχή του διανύσματος $\mathbf{S}_R = P_R + jQ_R$, προκύπτει το Σχήμα 5.3, δηλαδή το κυκλικό διάγραμμα ή διάγραμμα λειτουργίας της ΓΜ. Όπως φαίνεται, η μιγαδική ισχύς εμφανίζει γωνία φ με τον οριζόντιο άξονα, η οποία αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης μεταξύ των διανυσμάτων \mathbf{V}_R και \mathbf{I}_R και επομένως ισχύει:

$$S_R = |P_R + jQ_R| = V_R I_R, \quad (5.22)$$

$$P_R = V_R I_R \cos \varphi, \quad (5.23)$$

$$Q_R = V_R I_R \sin \varphi. \quad (5.24)$$



Σχήμα 5.3: Λειτουργικό διάγραμμα ΓΜ

Με βάση το Σχήμα 5.3 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η θέση του σημείου A είναι ανεξάρτητη του I_R και δεν μεταβάλλεται, όσο η V_R παραμένει σταθερή.
- Η απόσταση μεταξύ του σημείου A και του σημείου λειτουργίας B είναι σταθερή για δεδομένες τιμές των V_S και V_R . Επομένως, όσο μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των σημείων O και B, μεταβάλλεται με παράλληλη αλλαγή του φορτίου, καθώς το B θα πρέπει να παραμένει σε σταθερή απόσταση από το A και η θέση του σημείου B θα πρέπει να είναι πάντα πάνω σε έναν κύκλο με κέντρο το A.
- Αν η V_S μεταβληθεί, ενώ η V_R παραμένει σταθερή, τότε το σημείο A παραμένει αμετάβλητο, ωστόσο ορίζεται ένας νέος κύκλος πάνω στον οποίο βρίσκεται το σημείο λειτουργίας B.

Επιπλέον, από την (5.20) γίνεται φανερό, ότι η μεταφερόμενη ισχύς στο άκρο R μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τη γωνία θ για δεδομένες τιμές τάσεως στα άκρα της ΓΜ, ενώ υπάρχει ένα όριο στην ισχύ που μπορεί να μεταφερθεί στο άκρο R. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.3 μια αύξηση της ενεργού ισχύος αντιστοιχεί σε μια μετατόπιση του σημείου λειτουργίας B κατά μήκος του κύκλου, μέχρι η γωνία $\theta_B - \theta$

να γίνει μηδέν. Έτσι, θεωρητικά, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς προκύπτει όταν $\theta = \theta_B$ και είναι ίση με:

$$P_{R\max-3\varphi} = 3P_{R\max} = 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} - \frac{AV_R^2}{B} \cos(\theta_B - \theta_A) \right) = \frac{V_{S\pi} V_{R\pi}}{B} - \frac{AV_{R\pi}^2}{B} \cos(\theta_B - \theta_A) \quad (5.25)$$

Για να επιτευχθεί η συνθήκη μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, το φορτίο θα πρέπει να απορροφήσει ένα μεγάλο χωρητικό ρεύμα. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, η λειτουργία της ΓΜ περιορίζεται κρατώντας τη γωνία θ μικρότερη από 35° και το λόγο $V_{S\pi}/V_{R\pi}$ ίσο ή μεγαλύτερο από 0.95 pu. Τέλος, οι μιγαδικές απώλειες S_{Losses} στις τρεις φάσεις της ΓΜ ορίζονται ως:

$$S_{Losses-3\varphi} = 3S_{Losses} = 3(P_{Losses} + jQ_{Losses}) = 3(S_S - S_R) = 3(P_S - P_R) + j3(Q_S - Q_R) \quad (5.26)$$

Από την (5.26) φαίνεται ότι το πραγματικό μέρος της εξίσωσης αντιστοιχεί στις ωμικές απώλειες της ΓΜ (P_{Losses}), ενώ το φανταστικό μέρος στις απώλειες άεργου ισχύος (Q_{Losses}) που καταναλώνονται στη ΓΜ. Επομένως ισχύει:

$$P_{Losses} = P_S - P_R > 0$$

$$Q_{Losses} = Q_S - Q_R \begin{cases} > 0, \text{ επαγωγική συμπεριφορά} \\ < 0, \text{ χωρητική συμπεριφορά} \end{cases} \quad (5.27)$$

5.3 Γραμμή μεταφοράς μικρού μήκους

Έστω η ΓΜ μικρού μήκους του Σχήματος 5.4, της οποίας οι γενικευμένες σταθερές ABCD:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = 1, \mathbf{B} = \mathbf{Z}, \mathbf{C} = 0, \quad (5.28)$$

όπου:

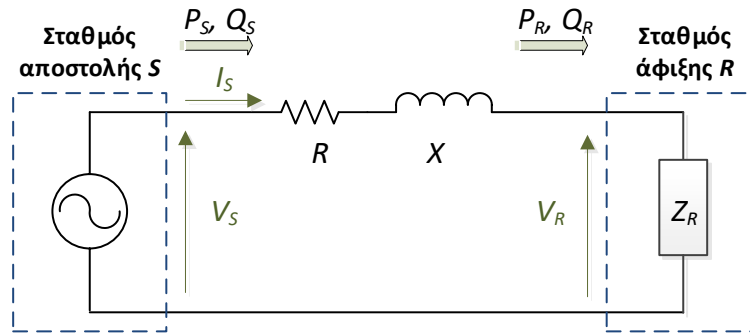
$$\mathbf{Z} = Z \angle \gamma = R + jX, \quad (5.29)$$

$$y = \tan^{-1} \frac{X}{R}, \quad (5.30)$$

και αντιστοιχούν στην αντίσταση R και την επαγωγική αντίδραση X της ΓΜ, ενώ η σύνθετη αντίσταση του φορτίου στο άκρο άφιξης περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\mathbf{Z}_R = Z_R \angle \varphi = R_R + jX_R, \quad (5.31)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R}. \quad (5.32)$$



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα ΓΜ μικρού μήκους

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις η (5.8) γράφεται:

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R + \mathbf{Z}_R \mathbf{I}_R. \quad (5.33)$$

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων και του ρεύματος, με βάση την (5.33). Θεωρώντας επιπλέον, δεδομένη P_R και Q_R στο άκρο άφιξης, σύμφωνα με το Σχήμα αυτό, το μέτρο της τάσης V_S υπολογίζεται ως:

$$V_S = \sqrt{(V_R + \Delta V_l)^2 + (\Delta V_q)^2}. \quad (5.34)$$

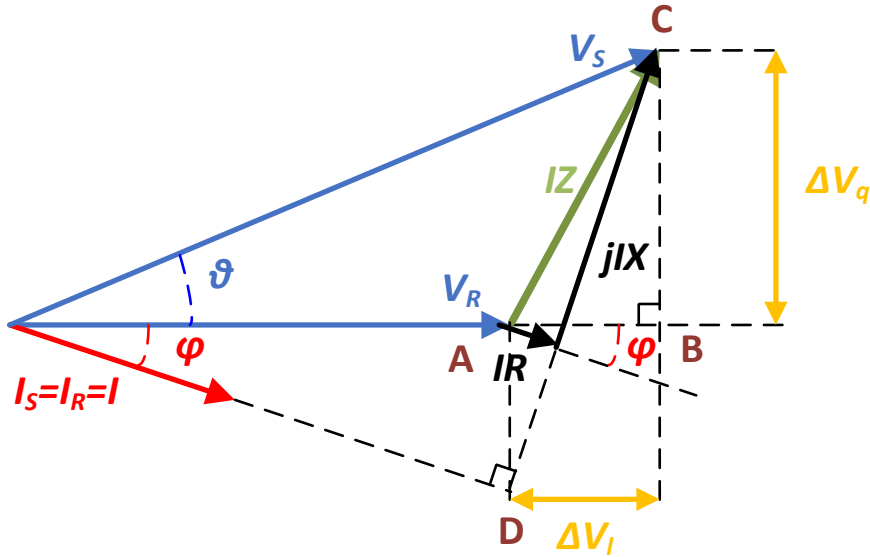
Δηλαδή, το μέτρο της τάσης V_S αναλύεται ορίζοντας τη *διαμήκη πτώση τάσης* (ΔV_l) και την *εγκάρσια πτώση τάσης* (ΔV_q) στις (5.35) και (5.36), αντίστοιχα,

$$\Delta V_l = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi = \frac{P_R}{V_R} R + \frac{Q_R}{V_R} X, \quad (5.35)$$

$$\Delta V_q = IX \cos \varphi - IR \sin \varphi = \frac{P_R}{V_R} X - \frac{Q_R}{V_R} R, \quad (5.36)$$

όπου P_R και Q_R η ανά φάση ενεργός και άεργος ισχύς, αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας τις (5.35) και (5.36) στην (5.34) προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 V_S &= \sqrt{(V_R + IR \cos \varphi + IX \sin \varphi)^2 + (IX \cos \varphi - IR \sin \varphi)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(V_R + \frac{P_R R + Q_R X}{V_R}\right)^2 + \left(\frac{P_R X - Q_R R}{V_R}\right)^2}.
 \end{aligned} \tag{5.37}$$



Σχήμα 5.5: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρεύματος ΓΜ μικρού μήκους

Επιπλέον, από το Σχήμα 5.5 μπορεί να οριστεί εύκολα ο συντελεστής ισχύος στο άκρο αποστολής της ΓΜ ($\cos \varphi_S$), ο οποίος προφανώς είναι διαφορετικός από το συντελεστή ισχύος στο άκρο άφιξης της ΓΜ ($\cos \varphi$). Ο $\cos \varphi_S$ ορίζεται:

$$\cos \varphi_S = \frac{P_S}{S_S} = \cos(\varphi + \theta) = \frac{V_R \cos \varphi + IR}{V_S}. \tag{5.38}$$

Όσον αφορά τη μιγαδική ισχύ στην αρχή και το τέλος της ΓΜ, από την (5.18) και (5.19) προκύπτει:

$$\mathbf{s}_{R-3\varphi} = 3 \left(\frac{V_S V_R}{Z} \angle (y - \theta) - \frac{V_R^2}{Z} \angle y \right), \tag{5.39}$$

$$\mathbf{s}_{S-3\varphi} = 3 \left(\frac{V_S^2}{Z} \angle (y) - \frac{V_S V_R}{Z} \angle (y + \theta) \right). \tag{5.40}$$

Επομένως η ενεργός και η άεργος ισχύς στα άκρο άφιξης και αποστολής θα είναι:

$$\begin{aligned}
 P_{R-3\varphi} &= 3P_R = 3 \left(\frac{V_S V_R}{Z} \cos(\gamma - \theta) - \frac{V_R^2}{Z} \cos(\gamma) \right) \\
 Q_{R-3\varphi} &= 3Q_R = 3 \left(\frac{V_S V_R}{Z} \sin(\gamma - \theta) - \frac{V_R^2}{Z} \sin(\gamma) \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.41}$$

$$\begin{aligned}
 P_{S-3\varphi} &= 3P_S = 3 \left(\frac{V_S^2}{Z} \cos(\gamma) - \frac{V_S V_R}{Z} \cos(\gamma + \theta) \right) \\
 Q_{S-3\varphi} &= 3Q_S = 3 \left(\frac{V_S^2}{Z} \sin(\gamma) - \frac{V_S V_R}{Z} \sin(\gamma + \theta) \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.42}$$

Η άεργη ισχύς που καταναλώνεται στη ΓΜ και στις τρεις φάσεις είναι:

$$Q_{Losses-3\varphi} = 3X I_R^2 = 3X \frac{P_R^2}{V_R^2 \cos^2 \varphi}
 \tag{5.43}$$

Παρατήρηση: Από την (5.43) φαίνεται ότι η ελάχιστη $Q_{Losses-3\varphi}$ στη ΓΜ προκύπτει όταν η συμπεριφορά του καταναλωτή που τροφοδοτείται είναι ωμική (συντελεστής ισχύος ίσος με τη μονάδα).

5.3.1 Γραμμές με μικρή γωνία ϑ

Σε πολλές περιπτώσεις (πχ δίκτυα διανομής) η γωνία ϑ είναι πολύ μικρή, οπότε, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.5, μπορεί να θεωρηθεί ότι $\Delta V_q \ll \Delta V_l$, οπότε προκύπτει προσεγγιστικά ότι:

$$V_S = V_R + \Delta V_l.
 \tag{5.44}$$

Στην περίπτωση αυτή, η πτώση τάσης και η ανηγμένη πτώση τάσης γράφονται με βάση την (5.35) και την (5.37) ως:

$$\Delta V = V_S - V_R \approx \Delta V_l = \frac{P_R}{V_R} R + \frac{Q_R}{V_R} X = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi,
 \tag{5.45}$$

$$\Delta V(\%) = \frac{V_S - V_R}{V_S} \approx \frac{IR \cos \varphi + IX \sin \varphi}{V_S}.
 \tag{5.46}$$

5.3.2 Γραμμές με αμελητέες απώλειες

Οι ΓΜ των δικτύων μεταφοράς (150 kV, 400 kV) παρουσιάζουν λόγο $X/R \approx 3 \dots 14$. Επομένως, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι $R \approx 0$. Από την (5.37) προκύπτει ότι:

$$V_S = V_R \sqrt{\left(1 + \frac{Q_R X}{V_R^2}\right)^2 + \left(\frac{P_R X}{V_R^2}\right)^2}. \quad (5.47)$$

Αναλύοντας την (5.47) σε σειρά Taylor και λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον πρώτο σημαντικό όρο προκύπτει ότι η πτώση τάσης σε ΓΜ με αμελητέες απώλειες είναι:

$$\Delta V = V_S - V_R \approx \frac{Q_R X}{V_R}. \quad (5.48)$$

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη από το Σχήμα 5.5, ότι $\Delta V_q = V_S \sin \theta$, από την (5.37) προκύπτει:

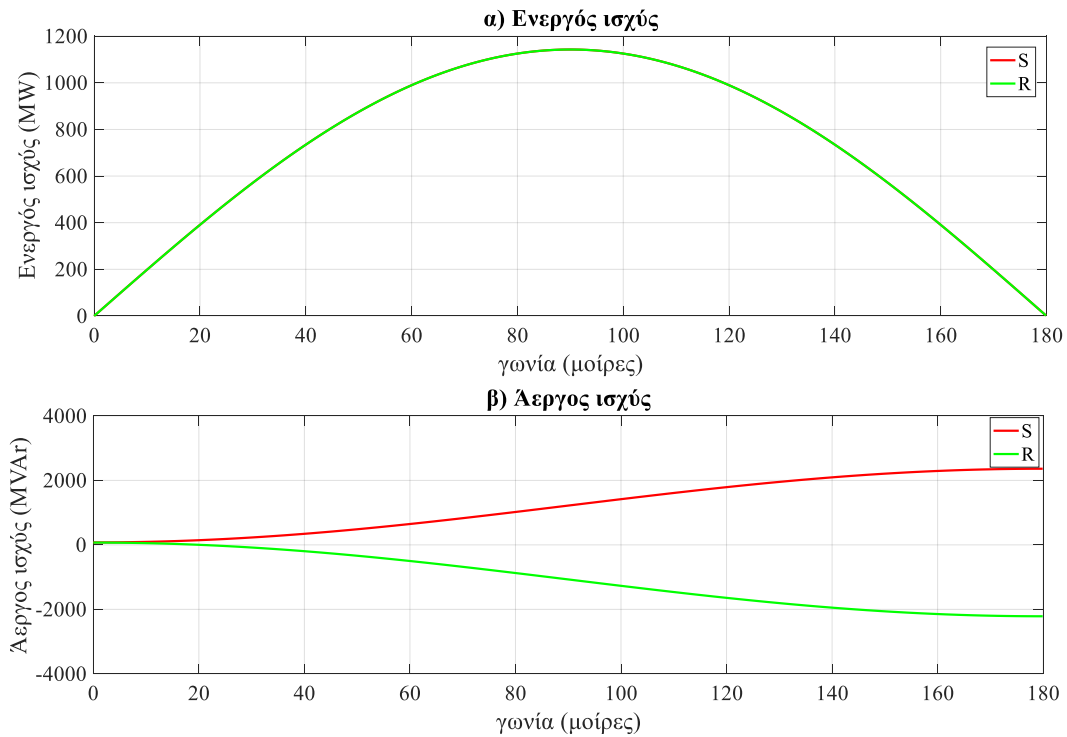
$$P_R = \frac{V_R}{X} \Delta V_q = \frac{V_S V_R}{X} \sin \theta. \quad (5.49)$$

Επιπλέον, στην (5.49), λαμβάνοντας υπόψη ότι για ΓΜ χωρίς απώλειες ισχύει $\gamma = 90^\circ$, προκύπτει:

$$\begin{aligned} P_{R-3\varphi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{X} \sin(\theta) \right) \\ Q_{R-3\varphi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{X} \cos(\theta) - \frac{V_R^2}{X} \right) \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} P_{S-3\varphi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{X} \sin \theta \right) \\ Q_{S-3\varphi} &= 3 \left(\frac{V_S^2}{X} - \frac{V_S V_R}{X} \cos \theta \right) \end{aligned} \quad (5.51)$$

Οι (5.50) και (5.51) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6 σε συνάρτηση με τη γωνία θ , αναλύοντας έτσι τη συμπεριφορά της ενεργού και της άεργου ισχύος στα άκρα αποστολής και άφιξης.



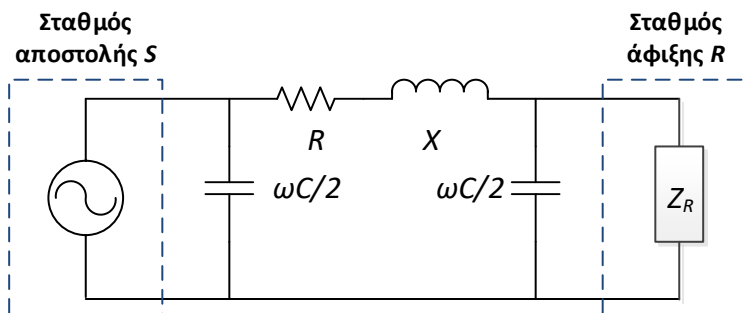
Σχήμα 5.6: Ενεργός και άεργος ισχύς στα άκρα αποστολής και άφιξης. $V_S=160$ kV, $V_R=150$ kV, $\ell=10$ km, $X'=0,7$ Ω/km.

Συνοψίζοντας για τις ΓΜ με αμελητέες απώλειες:

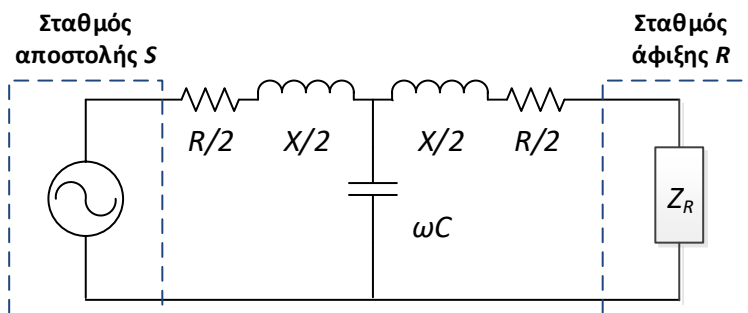
- Από την (5.34), η πτώση τάσης είναι ανάλογη της αέργου ισχύος που μεταφέρεται και πιο συγκεκριμένα για:
 - Επαγωγικά φορτία ($Q_R > 0$): $V_S > V_R$, προκαλείται πτώση τάσης
 - Χωρητικά φορτία ($Q_R < 0$): $V_S < V_R$, προκαλείται ανύψωση τάσης
- Από την (5.49), η ΔV_q είναι ανάλογη της μεταφερόμενης ισχύος.
- Από την (5.49) προκύπτει ότι η μεταφορά ενεργού ισχύος πραγματοποιείται κυρίως με στροφή της τάσης V_S κατά θ , ενώ η μέγιστη τιμή της P_R είναι $V_R V_S / X$. Καθώς $P_R = V_R V_S / X$, φαίνεται άμεσα ένας από τους δύο βασικούς λόγους, για τον οποίο εφαρμόζεται υψηλή τάση για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή, ότι αυξάνεται η μεταφορική ικανότητα της ΓΜ με αύξηση των V_S και V_R .
- Από τις (5.50) και (5.51) φαίνεται ότι η ενεργός ισχύς στο άκρο αποστολής και άφιξης είναι ίσες, καθώς οι ωμικές απώλειες είναι αμελητέες.

5.4 Γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους

Έστω η ΓΜ μεσαίου μήκους. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη και η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της ΓΜ, η οποία γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται μόνο από τη χωρητικότητα. Η ΓΜ μπορεί να αναπαρασταθεί είτε με το ονομαστικό (nominal) κύκλωμα Π είτε με το ονομαστικό κύκλωμα T , όπως φαίνεται αντίστοιχα στα Σχήματα 5.7 και 5.8. Και τα δύο αυτά κυκλώματα είναι δίθυρα και συμμετρικά, ωστόσο δεν είναι ισοδύναμα μεταξύ τους. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των δύο κυκλωμάτων πλησιάζουν περισσότερο τόσο μεταξύ τους όσο και με την επίλυση που προκύπτει από το ισοδύναμο κύκλωμα της ΓΜ, εάν η ΓΜ χωρισθεί σε δύο ή περισσότερα τμήματα σε αλυσιδωτή σύνδεση (cascaded), καθένα από τα οποία παριστάνεται αντίστοιχα από το ονομαστικό κύκλωμα Π ή T .



Σχήμα 5.7: Ονομαστικό κύκλωμα Π ΓΜ μεσαίου μήκους



Σχήμα 5.8: Ονομαστικό κύκλωμα T ΓΜ μεσαίου μήκους

Ειδικότερα, για την περίπτωση όπου η ΓΜ μπορεί να θεωρηθεί χωρίς απώλειες ισχύει ότι:

$$\mathbf{Z} = jX = j\omega L, \quad (5.52)$$

$$\mathbf{Y} = \frac{j\omega C}{2}, \quad (5.53)$$

οπότε οι γενικευμένες σταθερές ABCD του ονομαστικού κυκλώματος Π γράφονται:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = 1 + \frac{\mathbf{ZY}}{2} = 1 - \frac{\omega^2 LC}{2} \angle 0^\circ, \quad (5.54)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z} = jX = X \angle 90^\circ, \quad (5.55)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{Y} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{ZY}}{4}\right) = \frac{\omega^2 C}{2} \left(1 - \frac{\omega^2 LC}{4}\right) \angle 90^\circ, \quad (5.56)$$

ενώ, για την περίπτωση του ονομαστικού κυκλώματος T , οι γενικευμένες σταθερές ABCD είναι:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = 1 + \frac{\mathbf{ZY}}{2} = 1 - \frac{\omega^2 LC}{2} \angle 0^\circ, \quad (5.57)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{ZY}}{4}\right) = \omega L \left(1 - \frac{\omega^2 LC}{4}\right) \angle 90^\circ, \quad (5.58)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{Y} = \omega C \angle 90^\circ. \quad (5.59)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στις (5.18) και (5.19) προκύπτει ότι η ενεργός και άεργος ισχύς στο άκρο αποστολής και άφιξης της ΓΜ χωρίς απώλειες είναι για το ονομαστικό κύκλωμα Π :

$$\begin{aligned} P_{R-3\phi} &= 3 \frac{V_S V_R}{B} \sin(\vartheta) = 3 \frac{V_S V_R}{X} \sin(\vartheta) \\ Q_{R-3\phi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} \cos(\vartheta) - \frac{AV_R^2}{B} \right) = 3 \left(\frac{V_S V_R}{X} \cos(\vartheta) - \frac{\omega C V_R^2}{2} - \frac{V_R^2}{X} \right) \end{aligned} \quad (5.60)$$

$$\begin{aligned} P_{S-3\phi} &= 3 \frac{V_S V_R}{B} \sin(\vartheta) = 3 \frac{V_S V_R}{X} \sin(\vartheta) \\ Q_{S-3\phi} &= 3 \left(-\frac{V_S V_R}{B} \cos(\vartheta) + \frac{AV_S^2}{B} \right) = 3 \left(-\frac{V_S V_R}{X} \cos(\vartheta) - \frac{\omega C V_S^2}{2} + \frac{V_S^2}{X} \right) \end{aligned} \quad (5.61)$$

ενώ για το ονομαστικό κύκλωμα T είναι:

$$\begin{aligned}
 P_{R-3\varphi} &= 3 \frac{V_S V_R}{B} \sin(\vartheta) = 3 \frac{V_S V_R}{X \left(1 - \frac{X\omega C}{4}\right)} \sin(\vartheta) \\
 Q_{R-3\varphi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} \cos(\vartheta) - \frac{AV_R^2}{B} \right) = 3 \left(\frac{V_S V_R}{X \left(1 - \frac{X\omega C}{4}\right)} \cos(\vartheta) - \frac{\omega C V_R^2}{2} - \frac{V_R^2}{X} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.62}$$

$$\begin{aligned}
 P_{S-3\varphi} &= 3 \frac{V_S V_R}{B} \sin(\vartheta) = 3 \frac{V_S V_R}{X \left(1 - \frac{X\omega C}{4}\right)} \sin(\vartheta) \\
 Q_{S-3\varphi} &= 3 \left(-\frac{V_S V_R}{B} \cos(\vartheta) + \frac{AV_S^2}{B} \right) = 3 \left(-\frac{V_S V_R}{X \left(1 - \frac{X\omega C}{4}\right)} \cos(\vartheta) - \frac{\omega C V_S^2}{2} + \frac{V_S^2}{X} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.63}$$

Παρατήρηση: για την περίπτωση όπου $R \neq 0$, χρησιμοποιούνται οι (5.54) – (5.56) για το ονομαστικό κύκλωμα Π, ενώ για το ονομαστικό κύκλωμα T οι σχέσεις (5.57) – (5.59).

5.5 Μακρές γραμμές μεταφοράς

Για την περίπτωση που η ΓΜ μήκους ℓ θεωρείται ομοιογενής με διανεμημένες παραμέτρους R', X', G', C' , χρησιμοποιείται το μοντέλο της μακρούς ΓΜ. Επιπλέον, όταν η ΓΜ μπορεί να θεωρηθεί χωρίς απώλειες, οι παράμετροι ABCD λαμβάνουν τη μορφή:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = \cosh(\gamma \cdot \ell) = \cos(\beta \cdot \ell), \tag{5.64}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_c \cdot \sinh(\gamma \cdot \ell) = j \cdot \mathbf{Z}_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell) = \mathbf{Z}_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell) \angle 90^\circ, \tag{5.65}$$

$$\mathbf{C} = \frac{\sinh(\gamma \cdot \ell)}{\mathbf{Z}_c} = \frac{j \cdot \sin(\beta \cdot \ell)}{\mathbf{Z}_c} = \frac{\sin(\beta \cdot \ell)}{\mathbf{Z}_c} \angle 90^\circ, \tag{5.66}$$

όπου:

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')}, \quad (5.67)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}. \quad (5.68)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στις (5.18) και (5.19) προκύπτει ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς στο άκρο αποστολής και άφιξης της ομοιογενούς ΓΜ είναι:

$$\begin{aligned} P_{R-3\phi} &= 3 \frac{V_S V_R}{B} \sin(\vartheta) = 3 \frac{V_S V_R}{Z_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell)} \sin(\vartheta) \\ Q_{R-3\phi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} \cos(\vartheta) - \frac{A}{B} V_R^2 \right) = 3 \left(\frac{V_S V_R}{Z_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell)} \cos(\vartheta) - \frac{\cos(\beta \cdot \ell)}{Z_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell)} V_R^2 \right) \end{aligned} \quad (5.69)$$

$$\begin{aligned} P_{S-3\phi} &= 3 \frac{V_S V_R}{B} \sin(\vartheta) = 3 \frac{V_S V_R}{Z_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell)} \sin(\vartheta) \\ Q_{S-3\phi} &= 3 \left(\frac{V_S V_R}{B} \cos(\vartheta) + \frac{A}{B} V_R^2 \right) = 3 \left(\frac{V_S V_R}{Z_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell)} \cos(\vartheta) + \frac{\cos(\beta \cdot \ell)}{Z_c \cdot \sin(\beta \cdot \ell)} V_R^2 \right) \end{aligned} \quad (5.70)$$

5.5.1 Παράδειγμα

5.6 Έλεγχος τάσης

5.7 Σύνοψη και βασικά συμπεράσματα

Σύνοψη και βασικά συμπεράσματα

ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

6.1 Ανάγκη της ροής ισχύος

Πρωταρχικός σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των καταναλωτών του σε ενεργό κι άεργο ισχύ, εξασφαλίζοντας την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία του, θεωρώντας κάποιους περιορισμούς. Για παράδειγμα, η συχνότητα και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος πρέπει να διατηρούνται μέσα σε προκαθορισμένα όρια, παρά τις σημαντικές και μέχρι ενός ορίου απρόβλεπτες μεταβολές του φορτίου και της παραγωγής [2]. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των καταναλωτών και ταυτόχρονα να πληρούνται όλοι οι περιορισμοί που επιβάλλονται για την ασφαλή λειτουργία των ΣΗΕ είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται μελέτες με στόχο:

- την ανάλυση της ζήτησης ισχύος,
- την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με τον αποδοτικότερο και πιο οικονομικό τρόπο,
- την επίδραση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στα δίκτυα με σκοπό την εξεύρεση των βέλτιστων θέσεων και των ποσοστών διείσδυσης, ώστε να μην καταπατούνται τα όρια τάσης και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και
- τον σχεδιασμό των διάφορων στοιχείων ενός ΣΗΕ, όπως γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές.

Για τις μελέτες αυτές είναι υψίστης σημασίας ο υπολογισμός της κατάστασης του ΣΗΕ μέσω των τάσεων και των ρευμάτων σε όλους τους κόμβους του δικτύου και επομένως της ροής ενεργού και άεργου ισχύος [3].

Το πρόβλημα ροής ισχύος (ή ροής φορτίου) μπορεί να ορισθεί ως ο καθορισμός της ενεργού κι αέργου ισχύος που ρέει σε κάθε γραμμή και των ανυσμάτων των τάσεων σε κάθε κόμβο (ζυγό) ενός δεδομένου συστήματος μεταφοράς ή διανομής για δεδομένες συνθήκες παραγωγής και φορτίου (δεδομένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας) [2]. Η λύση του προβλήματος δεν είναι μονοσήμαντη και πρέπει να γίνεται κατά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή που απασχολεί τον μελετητή διότι η ζήτηση ισχύος υφίσταται αργές αλλά σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα επηρεάζονται οι μεταβλητές του συστήματος [2]. Το βασικό χαρακτηριστικό μέσω του οποίου προκύπτουν οι χρήσιμες εξισώσεις κατά την ανάλυση της ροής ισχύος είναι το ισοζύγιο ισχύος, δηλαδή ότι η παραγωγή ισούται με τη ζήτηση συν τις απώλειες. Μέσω της ανάλυσης ροής ισχύος υπολογίζονται:

- το μέτρο και η γωνία τάσης σε κάθε ζυγό,
- η ενεργός και η άεργος ισχύς σε κάθε γραμμή μεταφοράς,
- οι απώλειες και άλλα χαρακτηριστικά όπως η θέση λήψης μετασχηματιστή (tap settings).

Συγκρίνοντας τις πιθανές κατανομές ροής ισχύος που προκύπτουν από τη μελέτη ροής ισχύος, επιλέγεται η καταλληλότερη με βάση τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το σύστημα. Μερικοί από αυτούς είναι [2]:

- Η ισχύς παραγωγής του συστήματος πρέπει να διατηρείται σε προκαθορισμένα όρια και ταυτόχρονα πρέπει η παραγωγή να ικανοποιεί τη ζήτηση κάθε λεπτό.
- Οι γραμμές μεταφοράς δεν πρέπει να υπερφορτίζονται, ούτε να λειτουργούν κοντά στο όριο ευστάθειάς τους.
- Τα επίπεδα τάσης ορισμένων ζυγών πρέπει να διατηρούνται μέσα σε ορισμένα όρια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο προγραμματισμό αέργου ισχύος.
- Αν το σύστημα είναι μέρος ενός ευρύτερου συστήματος, πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες κατασκευαστικές υποχρεώσεις προγραμματισμού ισχύος ως προς τις γραμμές διασύνδεσης με τα γειτονικά συστήματα.

Γενικά η μελέτη ροής ισχύος είναι πολύ σημαντική τόσο στον σχεδιασμό, έλεγχο και λειτουργία υπάρχοντων συστημάτων, όσο και στον σχεδιασμό μελλοντικών επεκτάσεων των συστημάτων, επειδή η ικανοποιητική λειτουργία ενός συστήματος εξαρτάται από τη γνώση των επιδράσεων των διασυνδέσεων, νέων φορτίων, νέων σταθμών παραγωγής, νέων γραμμών, κ.λ.π., πριν αυτά εγκατασταθούν [2, 3]. Με την ανάλυση ροής ισχύος είναι πρόσθετα δυνατός ο καθορισμός του καλύτερου μεγέθους και της πιο ενδεδειγμένης θέσης εγκατάστασης πυκνωτών ισχύος με σκοπό την

βελτίωση του συντελεστή ισχύος και την αντιμετώπιση προβλημάτων ανύψωσης τάσης [2].

Οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την ανάλυση ροής ισχύος και τον καθορισμό των διανυσμάτων των τάσεων σε ένα δίκτυο είναι εκτενείς και πολύπλοκοι. Πριν το 1929 οι υπολογισμοί γίνονταν με το χέρι ενώ το 1929 κατασκευάστηκαν ειδικοί αναλογικοί υπολογιστές ώστε να χειριστούν τα προβλήματα ροής ισχύος [2]. Με τους υπολογιστές αυτούς μπορούσε να προσομοιωθεί τόσο η λειτουργία του υπάρχοντος ΣΗΕ για δεδομένες συνθήκες όσο και η προτεινόμενη μελλοντική του επέκταση. Οι ψηφιακοί υπολογιστές άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ροής ισχύος από το 1950 και οι πρώτες πλήρεις αναλύσεις με τέτοιους υπολογιστές ολοκληρώθηκαν το 1956. Η χρήση των ψηφιακών υπολογιστών είχε ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα μελέτης πολύ μεγαλύτερων συστημάτων, μεγαλύτερη ευκαμψία, ακρίβεια, οικονομία και ταχύτερη λειτουργία.

Γενικά, το πρόβλημα της ροής ισχύος διαιρείται σε δύο επιμέρους προβλήματα: τη διαμόρφωση κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου και την επίλυση του προβλήματος με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Κάθε ένα από τα οποία περιγράφεται στις ενότητες 6.2 και 6.3, αντίστοιχα.

6.2 Διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου

6.2.1 Μεταβλητές και τύποι ζυγών

Η ροή ισχύος είναι μια μέθοδος υπολογισμού του μέτρου της τάσης και της γωνίας σε κάθε ζυγό του συστήματος, κάτω από συμμετρικές τριφασικές συνθήκες σε σταθερή κατάσταση. Κατά την επίλυση ενός προβλήματος ροής ισχύος, τα δεδομένα εισόδου είναι i) οι αντιστάσεις κι αντιδράσεις (και ενδεχομένως οι αγωγιμότητες) των γραμμών μεταφοράς, ii) δεδομένα μετασχηματιστών, iii) μέγεθος, τύπος και τοποθεσία φορτίων και iv) η παραγωγή μονάδων που μπορεί να υπάρχουν στο σύστημα. Οι επιθυμητές έξοδοι είναι το μέτρο της τάσης και η γωνία σε κάθε ζυγό μέσω των οποίων μπορούν να υπολογιστούν η ένταση του ρεύματος στις γραμμές, καθώς και οι ροές ενεργού κι αέργου ισχύος. Κάθε ζυγός έχει τέσσερις μεταβλητές συνδεδεμένες με αυτόν:

- Συνολική ενεργός ισχύς: P
- Συνολική άεργος ισχύς: Q
- Μέτρο φασικής τάσης: V

- Γωνία φασικής τάσης: δ

και κατ' επέκταση ένα σύστημα N ζυγών χαρακτηρίζεται από $4N$ μεταβλητές.

Επιπλέον, για κάθε ζυγό προκύπτουν δύο εξισώσεις ροής ισχύος, μια για την ενεργό και μια για την άεργο ισχύ, κι άρα συνολικά διαμορφώνεται ένα σύστημα $2N$ εξισώσεων ροής ισχύος. Έτσι, προκύπτει ένα σύστημα $4N$ μεταβλητών και $2N$ εξισώσεων. Για τον περιορισμό των μεταβλητών του προβλήματος οποιεσδήποτε δύο από τις τέσσερις μεταβλητές ανά ζυγό μπορούν να είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και προκαθορίζονται οδηγώντας σε σύστημα $2N$ αγνώστων και $2N$ εξισώσεων το οποίο μπορεί να λυθεί. Οι άλλες δύο προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων ροής ισχύος. Οι μεταβλητές που προκαθορίζονται εξαρτώνται από τον τύπο του ζυγού. Ανάλογα με το ποιες μεταβλητές είναι γνωστές, οι ζυγοί μπορούν να χωριστούν σε τρεις τύπους:

1. **Ζυγός ταλάντωσης (reference ή slack ή swing bus).** Ο ζυγός ταλάντωσης είναι ένας ζυγός παραγωγής, ο οποίος παρέχει την πρόσθετη ενεργό κι άεργο ισχύ που είναι απαραίτητη για την αντιστάθμιση των απωλειών του δικτύου. Έτσι, στον ζυγό ταλάντωσης είναι προκαθορισμένο το μέτρο και η γωνία της τάσης και πρέπει να προσδιοριστούν η παραγόμενη ενεργός και η άεργος ισχύς [2].
2. **Ζυγοί παραγωγής (PU bus).** Σε κάθε ζυγό παραγωγής είναι απαραίτητο πριν την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου να καθοριστούν η ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης. Ο ζυγός παραγωγής αναφέρεται επίσης ως PV ζυγός και οι άγνωστες μεταβλητές του είναι η άεργος ισχύς και η γωνία της φάσης.
3. **Ζυγοί φορτίου (PQ ή load bus).** Οι ζυγοί φορτίου είναι γνωστοί και ως PQ ζυγοί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως σε έναν τέτοιο ζυγό προκαθορίζονται η ενεργός και η άεργος ισχύς ενώ οι άγνωστες μεταβλητές είναι το μέτρο και η γωνία φάσης.

Στον Πίνακα 6-1 συνοψίζονται οι τύποι ζυγών, καθώς και οι γνωστές και άγνωστες μεταβλητές τους. Η τάση του ζυγού ταλάντωσης τίθεται συνήθως στο 1 pu με γωνία 0° , δηλαδή η τάση του ζυγού αυτού χρησιμοποιείται ως τάση αναφοράς. Σημειώνεται πως αν ένας ζυγός συστήματος έχει παραγωγή και φορτίο τότε για τη μελέτη ροής φορτίου είτε διαιρείται σε δύο με δημιουργία ενός πλασματικού ζυγού ή το φορτίο του εκλαμβάνεται ως αρνητική παραγωγή.

Πίνακας 6-1: Τύποι ζυγών.

Τύπος ζυγού	Γνωστές Μεταβλητές	Άγνωστες Μεταβλητές
Ταλάντωσης ή αναφοράς (slack bus)	$V=1, \delta=0^\circ$	P, Q
Ζυγοί παραγωγής ή ελεγχόμενοι από τάση (PV)	P, V	Q, δ
Ζυγοί φορτίων (PQ)	P, Q	V, δ

6.2.2 Πίνακας αγωγιμοτήτων

Το πρόβλημα ροής ισχύος μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας είτε τον πίνακα σύνθετων αντιστάσεων είτε τον πίνακα σύνθετων αγωγιμοτήτων για την παράσταση του δικτύου. Συνηθέστερη είναι η χρήση του πίνακα των αγωγιμοτήτων. Για την εύρεση του πίνακα αυτού σε ένα σύστημα N ζυγών υπολογίζονται αρχικά οι αγωγιμότητες όλων των γραμμών. Με y_{ij} συμβολίζεται η αγωγιμότητα της γραμμής που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j . Έπειτα, ορίζονται οι ίδιες αγωγιμότητες και οι αμοιβαίες αγωγιμότητες αντίστοιχα ως εξής:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^N y_{ij}, \quad i \neq j \quad (6.1)$$

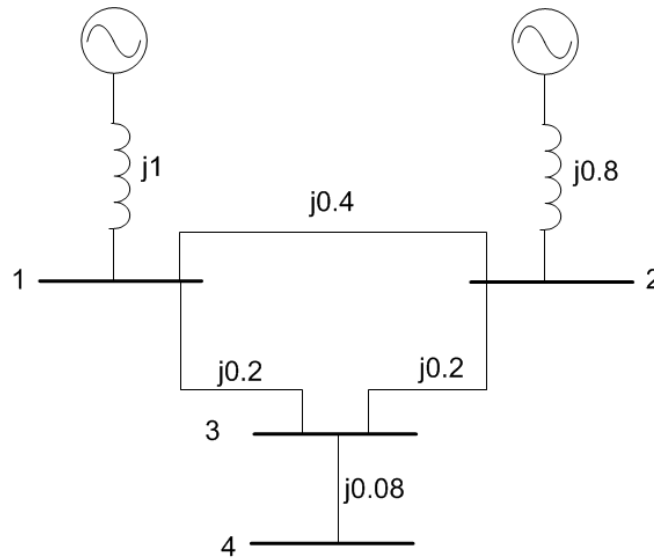
$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}, \quad i \neq j \quad (6.2)$$

Ως γνωστόν, ισχύει η σχέση:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (6.3)$$

όπου τα διανύσματα \mathbf{I} και \mathbf{V} έχουν διάσταση N και εκφράζουν τα ρεύματα και τις τάσεις των ζυγών αντίστοιχα. Ο πίνακας \mathbf{Y} είναι ο πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων των ζυγών του συστήματος με διαστάσεις $N \times N$ του οποίου κάθε διαγώνιο στοιχείο Y_{ii} είναι το αλγεβρικό άθροισμα όλων των αγωγιμοτήτων των κλάδων που συμβάλλουν στο ζυγό i και κάθε μη διαγώνιο στοιχείο $Y_{ij} = Y_{ji}$ είναι η αγωγιμότητα που συνδέει τους ζυγούς i και j αλλά με αρνητικό πρόσημο. Η διαδικασία υπολογισμού του πίνακα αγωγιμοτήτων γίνεται καλύτερα κατανοητή μέσω του επόμενου παραδείγματος. Έστω, λοιπόν, πως

δίνεται το σύστημα τεσσάρων ζυγών του Σχήματος 6.1 όπου φαίνονται οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών.

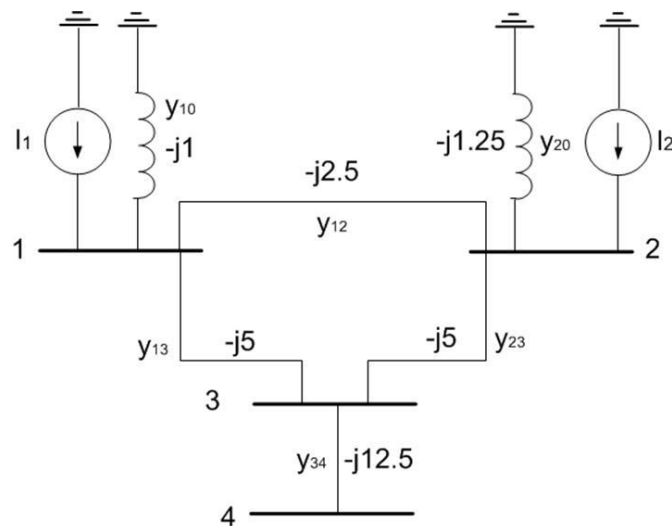


Σχήμα 6.1: Παράδειγμα ΣΗΕ τεσσάρων ζυγών

Αρχικά, μετατρέπονται όλες οι σύνθετες αντιδράσεις (impedances) σε σύνθετες αγωγιμότητες (admittances) μέσω της:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + j \cdot x_{ij}} \quad (6.4)$$

και προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 6.2.



Σχήμα 6.2: Ισοδύναμο κύκλωμα

Μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος εύκολα προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις στους κόμβους του συστήματος με βάση τον νόμο του Kirchhoff:

Κόμβος 1

$$I_1 = y_{10} \cdot V_1 + y_{12} \cdot (V_1 - V_2) + y_{13} \cdot (V_1 - V_3) \quad (6.5)$$

Κόμβος 2

$$I_2 = y_{20} \cdot V_2 + y_{12} \cdot (V_2 - V_1) + y_{23} \cdot (V_2 - V_3) \quad (6.6)$$

Κόμβος 3

$$0 = y_{13} \cdot (V_3 - V_1) + y_{23} \cdot (V_3 - V_2) + y_{34} \cdot (V_3 - V_4) \quad (6.7)$$

Κόμβος 4

$$0 = y_{34} \cdot (V_4 - V_3) \quad (6.8)$$

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να γραφούν κι ως:

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13}) \cdot V_1 - y_{12} \cdot V_2 - y_{13} \cdot V_3 \quad (6.9)$$

$$I_2 = -y_{12} \cdot V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23}) \cdot V_2 - y_{23} \cdot V_3 \quad (6.10)$$

$$0 = -y_{13} \cdot V_1 - y_{23} \cdot V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34}) \cdot V_3 - y_{34} \cdot V_4 \quad (6.11)$$

$$0 = -y_{34} \cdot V_3 + y_{34} \cdot V_4 \quad (6.12)$$

ή σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_{10} + y_{12} + y_{13}) & -y_{12} & -y_{13} & 0 \\ -y_{12} & (y_{20} + y_{12} + y_{23}) & -y_{23} & 0 \\ -y_{13} & -y_{23} & (y_{13} + y_{23} + y_{34}) & -y_{34} \\ 0 & 0 & -y_{34} & y_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

6.2.3 Εξισώσεις ροής ισχύος

Στη μελέτη ροής ισχύος οι μεταβλητές που ενδιαφέρουν στο ζυγό k είναι η μιγαδική ισχύς παραγωγής S_{G_k} και φορτίου S_{D_k} . Η εξίσωση ροής ισχύος για το ζυγό k είναι:

$$S_k = S_{G_k} - S_{D_k} = \bar{V}_k \cdot \bar{I}_k^* \quad (6.14)$$

όπου $S_k = P_k + j \cdot Q_k$ είναι η καθαρή έγχυση μιγαδικής ισχύος στο ζυγό k . Επιπλέον, μέσω του νόμου Kirchhoff από την (6.3) ισχύει:

$$\bar{I}_k = \sum_{n=1}^N \bar{Y}_{kn} \cdot \bar{V}_n \quad (6.15)$$

Από τις (6.14) και (6.15) προκύπτει η σχέση

$$S_k = S_{G_k} - S_{D_k} = Y_{kk}^* \cdot V_k^2 + \bar{V}_k \cdot \sum_{n \in A(k)} Y_{kn}^* \cdot \bar{V}_n \quad (6.16)$$

όπου $A(k)$ είναι το σύνολο που περιέχει τους δείκτες των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με το ζυγό k .

Επιπλέον, πάλι από τις (6.14) και (6.15) αντικαθιστώντας κάθε τάση με το μέτρο και την γωνία της, προκύπτει για τον ζυγό k :

$$S_k = P_k + j \cdot Q_k = \bar{V}_k \cdot I_k^* = \bar{V}_k \cdot \left(\sum_{n=1}^N \bar{Y}_{kn} \cdot \bar{V}_n \right)^* = V_k \angle \delta_k \cdot \left(\sum_{n=1}^N Y_{kn} \angle \theta_{kn} \cdot V_n \angle \delta_n \right)^* \Rightarrow$$

$$P_k + j \cdot Q_k = V_k \cdot \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \angle (\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (6.17)$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό k και ονομάζεται μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου του ζυγού k . Για το σύστημα N ζυγών μπορούν να γραφούν N εξισώσεις τέτοιου τύπου που αποτελούν τις μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου [4]. Διαχωρίζοντας το πραγματικό από το φανταστικό μέρος της (6.17) προκύπτουν οι δύο εξισώσεις:

$$P_k = V_k \cdot \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \cdot \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (6.18)$$

$$Q_k = V_k \cdot \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \cdot \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (6.19)$$

Οι εξισώσεις αυτές απαρτίζουν ένα μη γραμμικό αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων με μεταβλητές τις ισχείς και τα διανύσματα των τάσεων. Για την επίλυση του συστήματος αυτού και ανάλογα με τον τύπο του κάθε εξεταζόμενου ζυγού προκαθορίζονται σύμφωνα με τον Πίνακα 6-1 κάποιες από τις μεταβλητές του ζυγού ώστε να περιοριστεί ο αριθμός των αγνώστων και υπολογίζονται οι υπόλοιπες. Άρα, για κάθε ζυγό υπάρχουν δύο εξισώσεις και για το σύνολο όλων των ζυγών $2N$ εξισώσεις, αριθμός που επιτρέπει τον υπολογισμό των $2N$ άγνωστων μεταβλητών. Λόγω του μεγάλο αριθμού μη γραμμικών εξισώσεων, για την επίλυση του συστήματος χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι αριθμητικής ανάλυσης, όπως ο αλγόριθμος Newton-Raphson.

6.3 Μέθοδοι επίλυσης της ροής ισχύος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη ροή ισχύος προκύπτει ένα σύστημα με ίδιο αριθμό αγνώστων και εξισώσεων. Ως γνωστόν, ένα τέτοιο σύστημα είναι δυνατόν να επιλυθεί. Παρόλα αυτά, λόγω του πολύ μεγάλου πλήθους εξισώσεων αλλά και της μη

γραμμικής φύσης των εξισώσεων αυτών, η επίλυση γίνεται με κάποια επαναληπτική μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης που να ικανοποιεί τα ακόλουθα [2]:

- να μπορεί να χειριστεί μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις,
- να μπορεί να χειριστεί σύστημα με μεγάλο πλήθος ζυγών,
- να μην περιορίζεται σε συστήματα χωρίς απώλειες,
- να έχει επαρκή ακρίβεια,
- να είναι γρήγορη.

Οι πιο γνωστές επαναληπτικές μέθοδοι που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια είναι:

- η επαναληπτική μέθοδος Gauss,
- η μέθοδος Gauss-Seidel,
- η μέθοδος Newton-Raphson.

Γενικά οι εξισώσεις ρών φορτίου μπορούν να γραφτούν στην ακόλουθη γενική μορφή:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \quad (6.20)$$

όπου \mathbf{g} είναι διάνυσμα με τις εξισώσεις ρής φορτίου και \mathbf{x} διάνυσμα με τις άγνωστες μεταβλητές που ονομάζεται διάνυσμα κατάστασης. Η γενική διαδικασία σε μια επαναληπτική μέθοδο για τον υπολογισμό του διανύσματος κατάστασης που αποτελεί λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι η εξής [4]:

- Θεωρείται μια αρχική τιμή του διανύσματος κατάστασης $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(0)}$ και μηδενισμός του μετρητή ανακυκλώσεων $i = 0$.
- Υπολογίζεται το $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(i)})$ και γίνεται έλεγχος εάν ικανοποιούνται οι εξισώσεις ρής φορτίου.
- Αν οι εξισώσεις δεν ικανοποιούνται τότε με χρήση των $\mathbf{x}^{(i)}$ και $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(i)})$ υπολογίζεται μια νέα προσέγγιση $\mathbf{x}^{(i+1)}$ και ενημερώνεται ο μετρητής ανακυκλώσεων $i = i + 1$. Ο τρόπος που υπολογίζεται η νέα προσέγγιση διαφέρει σε κάθε μέθοδο.
- Επανάληψη των βημάτων 2 και 3 έως ότου οι εξισώσεις ρής φορτίου ικανοποιηθούν με μια προκαθορισμένη ακρίβεια.

Αυτή η επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης προς την τελική λύση είναι ο λόγος που οι μέθοδοι ονομάζονται επαναληπτικές μέθοδοι ή μέθοδοι ανακύκλωσης. Η ποιότητα της κάθε μεθόδου είναι συνάρτηση της ταχύτητας σύγκλισής της, η οποία παρουσιάζει σημαντικές διαφορές για τις τρεις μεθόδους που προαναφέρθηκαν.

Όταν η μέθοδος συγκλίνει, προκειμένου να επιτευχθεί τελική λύση πρέπει οι μεταβλητές που προσδιορίζονται να βρίσκονται μέσα σε κάποια περιοριστικά όρια [2]:

- Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών να βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένα όρια ανοχής, $V_{k,\min} < V_k < V_{k,\max}$.
- Οι γωνιακές διαφορές ορισμένων ζυγών να παραμένουν κάτω από ορισμένο όριο, το οποίο υπαγορεύεται από λόγους ηλεκτρικής ευστάθειας, $|\delta_k - \delta_j| < |\delta_k - \delta_j|_{\max}$.
- Οι ισχείς παραγωγής ενός ζυγού j να βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένα όρια, $P_{G_j,\min} < P_{G_j} < P_{G_j,\max}$ και $Q_{G_j,\min} < Q_{G_j} < Q_{G_j,\max}$.
- Πρόσθετοι περιορισμοί ώστε το σύστημα να λειτουργεί κατά το βέλτιστο οικονομικό τρόπο.

6.3.1 Μέθοδος Gauss

Η μέθοδος Gauss είναι η απλούστερη από τις μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση του προβλήματος ροής ισχύος και βασίζεται στην ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία:

- Αρχικά, οι εξισώσεις ροής φορτίου γράφονται στη μορφή

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) \quad (6.21)$$

- Στη συνέχεια, η καλύτερη προσέγγιση της λύσης στην ανακύκλωση $i+1$ υπολογίζεται ως εξής

$$\mathbf{x}^{(i+1)} = \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(i)}) \quad (6.22)$$

- Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν έχουμε σύγκλιση, δηλαδή όταν

$$\|\mathbf{x}^{(i+1)} - \mathbf{x}^{(i)}\| < \varepsilon \quad (6.23)$$

όπου ε είναι η προκαθορισμένη ακρίβεια σύγκλισης.

Στη ροή ισχύος η (6.21) χρησιμοποιώντας την (6.16) γράφεται ως:

$$\bar{V}_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k}{\bar{V}_k^*} - \sum_{n \in A(k)} Y_{kn} \bar{V}_n \right\} \quad (6.24)$$

και η επαναληπτική διαδικασία με βάση τις (6.16) και (6.22) είναι η

$$\bar{V}_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k^{(i)}}{\left[\bar{V}_k^{(i)} \right]^*} - \sum_{n \in A(k)} Y_{kn} \bar{V}_n^{(i)} \right\} \quad (6.25)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως η τιμή της τάσης για τον ζυγό 1, δηλαδή το ζυγό αναφοράς, είναι γνωστή· επομένως, η (6.25) εφαρμόζεται μόνο για τους ζυγούς $k = 2, \dots, N$. Για τον λόγο αυτό και η P_k δεν έχει δείκτη ανακύκλωσης i μιας και η ενεργός

ισχύς είναι γνωστή στους ζυγούς $k=2,\dots,N$ που είναι είτε ζυγοί φορτίου είτε ζυγοί παραγωγής. Επίσης, για τους ζυγούς φορτίου η έγχυση αέργου ισχύος είναι σταθερή και γνωστή εκ των προτέρων, ενώ για τους ζυγούς παραγωγής μεταβάλλεται από ανακύκλωση σε ανακύκλωση. Για τους ζυγούς παραγωγής το μέτρο της τάσης είναι δεδομένο. Έτσι, το μέτρο της τάσης V_k στους ζυγούς παραγωγής τίθεται σε κάθε ανακύκλωση ίσο με τη δεδομένη τιμή του ανεξάρτητα από την τιμή που προκύπτει από την εξίσωση (6.25), από την οποία υπολογίζεται μόνο η γωνία δ_k .

Η μέθοδος Gauss είναι εύκολο να υλοποιηθεί αλλά παρουσιάζει το σοβαρό μειονέκτημα να συγκλίνει με αργό ρυθμό ενώ σε αρκετές περιπτώσεις είναι δυνατό να μη συγκλίνει ενώ υπάρχει στην πραγματικότητα λύση [4].

6.3.2 Μέθοδος Gauss-Seidel

Η μέθοδος αυτή είναι μια βελτιωμένη μορφή της μεθόδου Gauss, όμως χρησιμοποιεί τις νέες τιμές των αγνώστων σε κάθε επανάληψη, αν υπάρχουν. Έτσι, το επαναληπτικό σχήμα έχει τη μορφή:

$$x_k^{(i+1)} = h_k(x_1^{(i+1)}, \dots, x_{k-1}^{(i+1)}, x_k^{(i)}, \dots, x_N^{(i)}) \quad (6.26)$$

Δηλαδή για τον υπολογισμό του k στοιχείου του διανύσματος x στην ανακύκλωση $i+1$ χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές x_j με $j < k$ που έχουν ήδη υπολογιστεί στο πλαίσιο της ίδιας ανακύκλωσης. Η επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Gauss-Seidel για το πρόβλημα ροής φορτίου είναι

$$\bar{V}_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k^{(i)}}{[\bar{V}_k^{(i)}]^*} - \sum_{n \in A_1(k)} Y_{kn} \bar{V}_n^{(i+1)} - \sum_{n \in A_2(k)} Y_{kn} \bar{V}_n^{(i)} \right\} \quad (6.27)$$

όπου $A_1(k)$ είναι το υποσύνολο των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό k για τους οποίους η τάση έχει ήδη υπολογιστεί στην ανακύκλωση $i+1$ και $A_2(k)$ είναι το υποσύνολο των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό k για τους οποίους η τάση δεν έχει ακόμη ανανεωθεί στην ανακύκλωση [4].

6.3.3 Χρήση συντελεστών επιτάχυνσης

Ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για να επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση κατά την εφαρμογή των μεθόδων Gauss ή Gauss-Seidel μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση των λεγόμενων συντελεστών επιτάχυνσης. Συγκεκριμένα, η διαφορά μεταξύ των διανυσμάτων της τάσης ζυγού που προκύπτουν από δύο

διαδοχικές επαναλήψεις πολλαπλασιάζεται με έναν τέτοιο συντελεστή, α , ώστε η νέα τιμή τάσης να οδηγείται πιο κοντά στην τελική τιμή σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{V}_{k,επιταχυνθείσα}^{(i+1)} = \bar{V}_k^{(i)} + \alpha \cdot (\bar{V}_k^{(i+1)} - \bar{V}_k^{(i)}) \quad (6.28)$$

Η νέα τιμή που προκύπτει από την (6.28) είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για την επόμενη επανάληψη. Για τους ζυγούς παραγωγής, ο συντελεστής επιτάχυνσης εφαρμόζεται μόνο στη γωνία του διανύσματος της τάσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\delta_{k,επιταχυνθείσα}^{(i+1)} = \delta_k^{(i)} + \alpha \cdot (\delta_k^{(i+1)} - \delta_k^{(i)}) \quad (6.29)$$

Η ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται από την επιλογή του συντελεστή επιτάχυνσης σε σχέση με τη φύση του δικτύου, τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος ροής ισχύος από πλευράς δικτύου (μέθοδος κόμβων ή βρόχων) και τη χρησιμοποιούμενη επαναληπτική υπολογιστική μέθοδο [2]. Η επιλογή ενός μιγαδικού συντελεστή μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων επαναλήψεων περισσότερο από έναν πραγματικό συντελεστή, συνήθως όμως χρησιμοποιούνται πραγματικοί [2].

Η τιμή συντελεστή επιτάχυνσης δε μπορεί να είναι πολύ μεγάλη διότι μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση της τελικής τιμής και απόκλιση της μεθόδου. Μια τιμή μεταξύ 1.5 και 1.7 έχει αποδειχθεί ότι προσφέρει τα καλύτερα χαρακτηριστικά σύγκλισης για τις συνήθεις μεθόδους επίλυσης του προβλήματος ροής ισχύος [2].

6.3.4 Μέθοδος Newton-Raphson

Μια ακόμη επαναληπτική μέθοδος και η πιο συνήθης για την επίλυση προβλημάτων ροής ισχύος είναι η μέθοδος Newton-Raphson. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται στη ροή ισχύος είναι η μη γραμμικότητα των δικτύων. Η μέθοδος βασίζεται στη σειρά Taylor.

Έστω μια βαθμωτή συνάρτηση $f(x) = 0$ και ότι μια από τις ρίζες της είναι η x . Υποθέτοντας μια αρχική τιμή $x^{(0)}$, η οποία διαφέρει από την πραγματική ρίζα κατά Δx ισχύει πως:

$$x = x^{(0)} + \Delta x \Rightarrow f(x) = f(x^{(0)} + \Delta x) = 0 \quad (6.30)$$

Από το ανάπτυγμα της σειράς Taylor προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 f(\hat{x}) &= f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(\hat{x} - x^{(0)}) + \frac{f''(x^{(0)})}{2!}(\hat{x} - x^{(0)})^2 + \dots \\
 &= f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x^{(0)} + \Delta x - x^{(0)}) + \frac{f''(x^{(0)})}{2!}(x^{(0)} + \Delta x - x^{(0)})^2 + \dots \\
 &= f(x^{(0)}) + \Delta x \cdot f'(x^{(0)}) + (\Delta x)^2 \cdot \frac{f''(x^{(0)})}{2!} + \dots
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

κι αν κρατήσουμε μόνο τους δύο πρώτους όρους τότε:

$$f(\hat{x}) \approx f(x^{(0)}) + \Delta x \cdot f'(x^{(0)}) \approx 0 \Rightarrow \Delta x \approx -\frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \tag{6.32}$$

Αφού $x = x^{(0)} + \Delta x$, το

$$\hat{x} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \tag{6.33}$$

πρέπει να είναι καλύτερη προσέγγιση για την πραγματική ρίζα. Οπότε σε επαναληπτική μορφή, η μέθοδος Newton-Raphson γράφεται:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + \Delta x = x^{(i)} - \frac{f(x^{(i)})}{f'(x^{(i)})} \tag{6.34}$$

Η διαδικασία αυτή γενικεύεται και για την περίπτωση πολλών μεταβλητών. Έστω, το διάνυσμα \mathbf{x} που περιέχει όλους τους αγνώστους

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{6.35}$$

και το διάνυσμα \mathbf{f} το οποίο περιέχει βαθμωτές συναρτήσεις του \mathbf{x}

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ \dots \\ \dots \\ f_n(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \tag{6.36}$$

Όπως προηγουμένως, αν η λύση είναι \mathbf{x} τότε $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$. Υποθέτοντας πάλι μια αρχική λύση $\mathbf{x}^{(0)}$ που διαφέρει από την πραγματική ρίζα κατά $\Delta \mathbf{x}$ ισχύει πως $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x}$. Έτσι, από τη σειρά Taylor προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$f_1(\hat{\mathbf{x}}) \approx f_1(\mathbf{x}^{(0)}) + \frac{df_1(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_1} \Delta x_1 + \frac{df_1(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{df_1(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_n} \Delta x_n \quad (6.37)$$

⋮

$$f_n(\hat{\mathbf{x}}) \approx f_n(\mathbf{x}^{(0)}) + \frac{df_n(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_1} \Delta x_1 + \frac{df_n(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{df_n(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_n} \Delta x_n \quad (6.38)$$

ή σε μορφή πινάκων:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}^{(0)}) \\ f_1(\mathbf{x}^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{df_1(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_1} & \frac{df_1(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_2} & \dots & \frac{df_1(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_n} \\ \frac{df_2(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_1} & \frac{df_2(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_2} & \dots & \frac{df_2(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{df_n(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_1} & \frac{df_n(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_2} & \dots & \frac{df_n(\mathbf{x}^{(0)})}{dx_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (6.39)$$

Ο $n \times n$ πίνακας που περιέχει τις μερικές παραγώγους ονομάζεται Ιακωβιανός και συμβολίζεται ως $\mathbf{J}(\mathbf{x})$. Αφού $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ ισχύει ότι

$$\Delta \mathbf{x} \approx -\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(0)})^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) \quad (6.40)$$

Τελικά, η επαναληπτική διαδικασία για τη μέθοδο Newton-Raphson σε προβλήματα με πολλές μεταβλητές είναι η εξής:

$$\mathbf{x}^{(i+1)} = \mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(i)})^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(i)}) \quad (6.41)$$

Πιο συγκεκριμένα για το πρόβλημα ροής ισχύος, η μέθοδος εφαρμόζεται όπως παρακάτω. Έστω ότι ο ζυγός ταλάντωσης είναι ο ζυγός 1 του οποίου είναι γνωστό το μέτρο και η γωνία τάσης. Άρα, οι άγνωστοι είναι τα μέτρα και οι γωνίες της τάσης στους υπόλοιπους $(N-1)$ ζυγούς. Το διάνυσμα αγνώστων είναι το

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \vdots \\ \delta_N \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

και το διάνυσμα \mathbf{f} περιέχει τις εξισώσεις ροής ισχύος όπως προκύπτουν από την (6.14) αφού διαχωριστεί το πραγματικό με το φανταστικό μέρος:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} P_{G_2} - P_{D_2} - P_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ P_{G_N} - P_{D_N} - P_N(\mathbf{x}) \\ Q_{G_2} - Q_{D_2} - Q_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ Q_{G_N} - Q_{D_N} - Q_N(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (6.43)$$

Η επαναληπτική διαδικασία είναι ίδια με την εξίσωση (6.41) κι ο Ιακωβιανός πίνακας είναι της μορφής:

$$\mathbf{J} = - \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2} & \dots & \frac{dP_2}{d\delta_N} & \frac{dP_2}{d|V_2|} & \dots & \frac{dP_2}{d|V_N|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dP_N}{d\delta_2} & \dots & \frac{dP_N}{d\delta_N} & \frac{dP_N}{d|V_2|} & \dots & \frac{dP_N}{d|V_N|} \\ \hline \frac{dQ_2}{d\delta_2} & \dots & \frac{dQ_2}{d\delta_N} & \frac{dQ_2}{d|V_2|} & \dots & \frac{dQ_2}{d|V_N|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dQ_N}{d\delta_2} & \dots & \frac{dQ_N}{d\delta_N} & \frac{dQ_N}{d|V_2|} & \dots & \frac{dQ_N}{d|V_N|} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \quad (6.44)$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας για ευκολία χωρίζεται σε τέσσερις υποπίνακες \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 και \mathbf{J}_4 . Ο \mathbf{J}_1 περιέχει τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό, όπως αυτές προκύπτουν από την (6.18), ως προς τις γωνίες των τάσεων σε κάθε ζυγό, ενώ ο \mathbf{J}_2 ως προς τα μέτρα των τάσεων. Ομοίως, ο \mathbf{J}_3 περιέχει τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό, όπως αυτές προκύπτουν από την (6.19), ως προς τις γωνίες των τάσεων σε κάθε ζυγό, ενώ ο \mathbf{J}_4 ως προς τα μέτρα των τάσεων. Τα στοιχεία των \mathbf{J}_1 και \mathbf{J}_2 υπολογίζονται μέσω της (6.18) ως εξής:

\mathbf{J}_1 :

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -|V_k| \sum_{n=1, n \neq k}^N |Y_{kn}| \cdot |V_n| \cdot \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \text{ για τα διαγώνια στοιχεία} \quad (6.45)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = |V_k| \cdot |Y_{kn}| \cdot |V_n| \cdot \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \text{ για τα μη διαγώνια στοιχεία, } k \neq n \quad (6.46)$$

\mathbf{J}_2 :

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|V_k| \cdot |Y_{kk}| \cdot \cos(\theta_{kk}) + \sum_{n=1, n \neq k}^N |Y_{kn}| \cdot |V_n| \cdot \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (6.47)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_n|} = |V_k| \cdot |Y_{kn}| \cdot \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad k \neq n \quad (6.48)$$

και ομοίως τα στοιχεία των \mathbf{J}_3 και \mathbf{J}_4 υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης (6.19) ως εξής:

\mathbf{J}_3 :

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = |V_k| \sum_{n=1, n \neq k}^N |Y_{kn}| \cdot |V_n| \cdot \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (6.49)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -|V_k| \cdot |Y_{kn}| \cdot |V_n| \cdot \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad k \neq n \quad (6.50)$$

\mathbf{J}_4 :

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|V_k| \cdot |Y_{kk}| \cdot \sin(\theta_{kk}) + \sum_{n=1, n \neq k}^N |Y_{kn}| \cdot |V_n| \cdot \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (6.51)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_n|} = |V_k| \cdot |Y_{kn}| \cdot \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad k \neq n \quad (6.52)$$

Τελικά, η επαναληπτική διαδικασία της (6.41) μέσω των (6.42), (6.43) και (6.44) γράφεται:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}^{(i)} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (6.53)$$

Συνολικά, η επίλυση ενός προβλήματος ροής ισχύος με τη μέθοδο Newton-Raphson συνοψίζεται ως εξής:

1. Ορισμός του προβλήματος

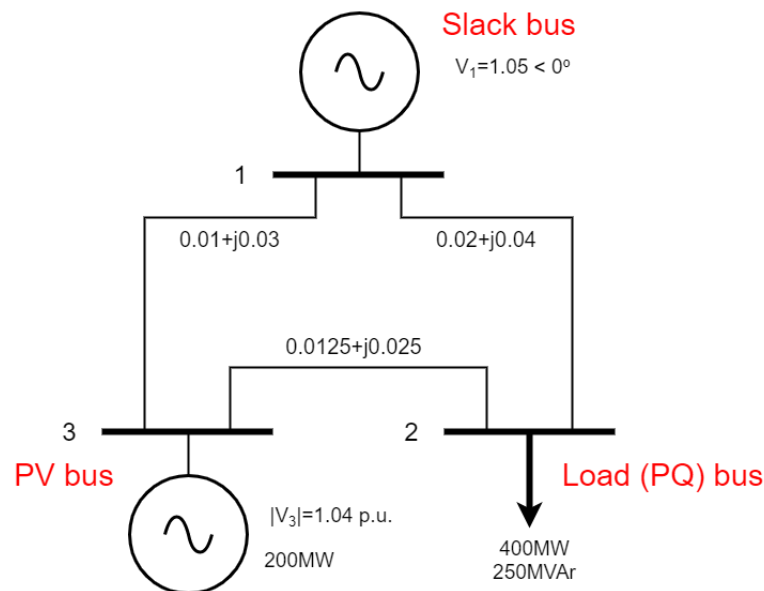
- Slack bus: ορίζεται το μέτρο τάσης στην επιθυμητή τιμή και τη γωνία ίση με 0°
- Ζυγοί γεννητριών: Γνωστή παραγώμενη ενεργός ισχύς, P_{G_k} , και μέτρο τάσης. Θεωρείται αρχική εκτίμηση γωνίας ίση με 0°
- Ζυγοί φορτίων: Γνωστές ισχείς P_{D_k} και Q_{D_k} . Θεωρούνται αρχικές εκτιμήσεις για το μέτρο και τη γωνία τάσης, συνήθως ίσα με 1 pu και 0° αντίστοιχα.

2. Υπολογισμός διαφοράς ισχύος:

- Ζυγοί φορτίων: Υπολογίζεται η γενική μορφή των P_k και Q_k από τις (6.18) και (6.19).
- Ζυγοί γεννητριών: Υπολογίζεται η γενική μορφή της P_k

- Υπολογίζονται οι γενικές μορφές των ΔP_k και ΔQ_k σε κάθε ζυγό όπως στην (6.43)
3. Δημιουργείται ο Ιακωβιανός πίνακας σε γενική μορφή
 4. Επιλύεται η (6.53) χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις των αγνώστων μεταβλητών για να βρεθούν νέες εκτιμήσεις, δηλαδή νέες τιμές για τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων.
 5. Επαναλαμβάνεται το βήμα 4 μέχρις ότου οι αποκλίσεις να είναι μικρότερες από μια προκαθορισμένη ακρίβεια ε , δηλαδή $|\Delta P_k^{(l)}| < \varepsilon$ και $|\Delta Q_k^{(l)}| < \varepsilon$

Η διαδικασία μπορεί να γίνει πιο εύκολα κατανοητή με το παρακάτω παράδειγμα. Έστω το σύστημα τριών ζυγών του Σχήματος 6.3.



Σχήμα 6.3 Παράδειγμα συστήματος τριών ζυγών

Αρχικά, για να υπολογιστεί ο πίνακας αγωγιμοτήτων, μετατρέπονται οι αντιδράσεις σε αγωγιμότητες:

$$\begin{aligned}
 y_{12} &= \frac{1}{z_{12}} = \frac{1}{0.02 + j0.04} = 10 - j20 \text{ p.u.} \\
 y_{13} &= \frac{1}{z_{13}} = \frac{1}{0.01 + j0.03} = 10 - j30 \text{ p.u.} \\
 y_{23} &= \frac{1}{z_{23}} = \frac{1}{0.0125 + j0.02} = 16 - j32 \text{ p.u.}
 \end{aligned}
 \tag{6.54}$$

Από τις εξισώσεις (6.1) και (6.2) προκύπτει ο πίνακας:

$$Y = \begin{bmatrix} 53.9 \angle -1.19 & 22.4 \angle 2.03 & 31.6 \angle 1.89 \\ 22.4 \angle 2.03 & 58.1 \angle -1.11 & 35.8 \angle 2.03 \\ 31.6 \angle 1.89 & 35.8 \angle 2.03 & 67.2 \angle -1.17 \end{bmatrix} \quad (6.55)$$

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος Newton-Raphson.

Βήμα 1: Ορισμός προβλήματος

- Για τον slack bus είναι γνωστή η τάση $V_1 = 1.05 \angle 0^\circ$.
- Για τον ζυγό 3, που είναι ο μοναδικός ζυγός PV, είναι γνωστό το μέτρο τάσης και θεωρείται μια αρχική γωνία 0° , άρα $V_3 = 1.04 \angle 0^\circ$. Επιπλέον, είναι γνωστή η P_{G_3} . Θεωρώντας ως βάση $S_B = 100 \text{MVA}$ προκύπτει $P_{G_3} = 2$ p.u. και προφανώς $P_{D_3} = 0$ αφού δεν υπάρχει φορτίο. Η άγνωστη μεταβλητή για τον ζυγό αυτό είναι η γωνία δ_3 .
- Για τον ζυγό 2 που είναι ζυγός φορτίου είναι γνωστές οι ισχείς φορτίου $P_{D_2} = 4$ p.u. και $Q_{D_2} = 2.5$ p.u. και προφανώς αφού δεν υπάρχει παραγωγή $P_{G_2} = 0$ p.u. και $Q_{G_2} = 0$ p.u. Για την άγνωστη τάση θεωρείται μια αρχική εκτίμηση $V_2 = 1 \angle 0^\circ$.

Βήμα 2: Υπολογισμός διαφορών ισχύος

Όπως αναφέρθηκε, για τους ζυγούς φορτίου υπολογίζονται τα P_k και Q_k από τις εξισώσεις (6.18) και (6.19) και για τους ζυγούς γεννητριών η P_k . Άρα υπολογίζονται οι γενικές μορφές των P_2 , Q_2 και P_3 ώστε να περιέχουν μέσα μόνο τις άγνωστες μεταβλητές. Από τις εξισώσεις (6.18) και (6.19) προκύπτουν:

$$\begin{aligned} P_2 &= 23.52|V_2|\cos(\delta_2 - 2.03) + 25.83|V_2|^2 + 37.23|V_2|\cos(\delta_2 - \delta_3 - 2.03) \\ Q_2 &= 23.52|V_2|\sin(\delta_2 - 2.03) + 52.04|V_2|^2 + 37.23|V_2|\sin(\delta_2 - \delta_3 - 2.03) \\ P_3 &= 34.51\cos(\delta_3 - 1.89) + 37.23|V_2|\cos(\delta_3 - \delta_2 - 2.03) + 28.36 \end{aligned} \quad (6.56)$$

Επιπλέον, από την εξίσωση (6.43):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 - P_2 \\ 2 - P_3 \\ -2.5 - Q_2 \end{bmatrix} \quad (6.57)$$

Βήμα 3: Δημιουργία Ιακωβιανού πίνακα

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2} & \frac{dP_2}{d\delta_3} & \frac{dP_2}{d|V_2|} \\ \frac{dP_3}{d\delta_2} & \frac{dP_3}{d\delta_3} & \frac{dP_3}{d|V_2|} \\ \frac{dQ_2}{d\delta_2} & \frac{dQ_2}{d\delta_3} & \frac{dQ_2}{d|V_2|} \end{bmatrix} \quad (6.58)$$

Υπολογίζονται οι υποπίνακες:

J₁:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} &= -23.52|V_2|\sin(\delta_2 - 2.03) - 37.23|V_2|\sin(\delta_2 - \delta_3 - 2.03) \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} &= -34.51\sin(\delta_3 - 1.89) - 37.23|V_2|\sin(\delta_3 - \delta_2 - 2.03) \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} &= 37.23|V_2|\sin(\delta_2 - \delta_2 - 2.03) \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} &= 37.23|V_2|\sin(\delta_3 - \delta_2 - 2.03) \end{aligned} \quad (6.59)$$

J₂:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} &= 51.67|V_2| + 23.52\cos(\delta_2 - 2.03) + 37.23\cos(\delta_2 - \delta_3 - 2.03) \\ \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} &= 37.23\cos(\delta_3 - \delta_2 - 2.03) \end{aligned} \quad (6.60)$$

J₃:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} &= 23.52|V_2|\cos(\delta_2 - 2.03) + 37.23|V_2|\cos(\delta_2 - \delta_3 - 2.03) \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} &= -37.23|V_2|\cos(\delta_2 - \delta_2 - 2.03) \end{aligned} \quad (6.61)$$

J₄:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = 104.08|V_2| + 23.52\sin(\delta_2 - 2.03) + 37.23\sin(\delta_2 - \delta_3 - 2.03) \quad (6.62)$$

Βήμα 4: Επίλυση εξίσωσης

Στο σημείο αυτό ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία. Στην πρώτη επανάληψη χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις

$$V_2^{(0)} = 1 \text{ p.u.}$$

$$\delta_2^{(0)} = 0$$

$$\delta_3^{(0)} = 0$$

και προκύπτουν οι ροές ισχύος από τις εξισώσεις (6.56)

$$P_2^{(0)} = -1.09 \text{ p.u.}$$

$$Q_2^{(0)} = -2.42 \text{ p.u.}$$

$$P_3^{(0)} = 1.03 \text{ p.u.}$$

Άρα οι διαφορές ισχύος είναι

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 - P_2^{(0)} \\ 2 - P_3^{(0)} \\ -2.5 - Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.91 \\ 0.97 \\ -0.08 \end{bmatrix} \quad (6.63)$$

Μέσω της (6.43) πρέπει να υπολογιστούν οι νέες τιμές των άγνωστων μεταβλητών:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}^{(1)} &= \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}^{(0)} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^{(0)} \Rightarrow \\ \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 54.46 & -33.37 & 24.74 \\ -33.37 & 66.14 & -16.50 \\ -26.93 & 16.50 & 50.34 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -2.91 \\ 0.97 \\ -0.08 \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0537 \\ -0.0185 \\ -0.0243 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0537 \\ -0.0185 \\ 0.9757 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.64)$$

Αυτή είναι η λύση της πρώτης επανάληψης. Τώρα πρέπει να ελεγχθεί αν υπάρχει σύγκλιση. Θεωρείται μια ακρίβεια $\varepsilon = 10^{-3}$ και υπολογίζονται οι νέες ροές ισχύος χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές κατάστασης όπως προέκυψαν από την πρώτη επανάληψη:

$$P_2^{(1)} = -3.91 \text{ p.u.}$$

$$P_3^{(1)} = 1.976 \text{ p.u.}$$

$$Q_2^{(1)} = -2.43 \text{ p.u.}$$

Άρα οι διαφορές ισχύος είναι

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(1)} \\ \Delta P_3^{(1)} \\ \Delta Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 - P_2^{(1)} \\ 2 - P_3^{(1)} \\ -2.5 - Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.09 \\ 0.024 \\ -0.07 \end{bmatrix}$$

Είναι φανερό ότι το μέτρο των διαφορών έχει μικρύνει ωστόσο δεν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης ακόμα άρα ξεκινάει η επόμενη επανάληψη μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο.

6.3.5 Αποζευγμένη ροή ισχύος

Η μελέτη ροής ισχύος με τη μέθοδο Newton-Raphson έγινε με επίλυση της γενικής εξίσωσης. Ο Ιακωβιανός πίνακας που εμφανίζεται στην εξίσωση αυτή καθορίζει μεν τη σύγκλιση της μεθόδου αλλά σε μεγάλο βαθμό δεν επηρεάζει την τελική ακρίβεια. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός επαναληπτικών μεθόδων που προσεγγίζουν τον Ιακωβιανό πίνακα με σκοπό να μειωθούν οι απαιτήσεις σε μνήμη υπολογιστή ή σε αριθμητικούς υπολογισμούς [2]. Η πιο σημαντική από αυτές τις προσεγγίσεις είναι εκείνη που επιφέρει απόζευξη του τμήματος πραγματικής από το τμήμα αέργου ισχύος του Ιακωβιανού πίνακα. Η απόζευξη αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι η ροή ενεργού ισχύος θεωρείται περισσότερο ευαίσθητη στις αλλαγές της γωνίας της τάσης παρά στις αλλαγές του μέτρου της τάσης [2]. Ομοίως, η ροή αέργου ισχύος είναι περισσότερο ευαίσθητη στις αλλαγές του μέτρου της τάσης παρά στις αλλαγές της γωνίας της τάσης. Έτσι τα στοιχεία των υποπινάκων J_2 και J_3 μπορούν να θεωρηθούν ίσα με 0 [2]. Στη μη συζευγμένη ανάλυση ροής ισχύος (decoupled method) ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} \right]^{-1} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta |\mathbf{V}| &= \left[\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial |\mathbf{V}|} \right]^{-1} \Delta \mathbf{Q} \end{aligned} \tag{6.65}$$

οπότε το πρόβλημα γίνεται υπολογιστικά πιο εύκολο και γρήγορο αφού περιέχει αντιστροφή δύο μικρότερων πινάκων.

6.3.6 Αξιολόγηση μεθόδων

Για να συγκριθούν οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής ισχύος πρέπει να γίνει σχετική εκτίμηση των παρακάτω παραμέτρων [2]:

- υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται σε κάθε επανάληψη και
- απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και μνήμης.

Η σύγκριση των μεθόδων Gauss και Gauss-Seidel δείχνει ότι η πρώτη απαιτεί περισσότερες επαναλήψεις άρα και περισσότερο χρόνο για επίτευξη λύσης από τη δεύτερη, ενώ ο χρόνος ανά επανάληψη είναι ίδιος και για τις δύο [2].

Η μέθοδος Gauss-Seidel απαιτεί λιγότερο χρόνο από την Newton-Raphson ανά επανάληψη, λόγω του ότι είναι απλούστερη ως τεχνική επίλυσης, ενώ η δεύτερη απαιτεί τον υπολογισμό σε κάθε επανάληψη των στοιχείων του Ιακωβιανού πίνακα με συνέπεια πρόσθετο υπολογιστικό χρόνο. Όμως η ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου Gauss-Seidel είναι μικρότερη και απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων από τη Newton-Raphson για επίτευξη λύσης. Επιπλέον, μια αύξηση του αριθμού των ζυγών του δικτύου αυξάνει ανάλογα τον αριθμό των επαναλήψεων για τη Gauss-Seidel ενώ στη Newton-Raphson οι επαναλήψεις δεν εξαρτώνται τόσο πολύ από το μέγεθος του συστήματος. Μπορεί, όμως, η Gauss-Seidel να επιταχυνθεί με συντελεστές επιτάχυνσης. Συνολικά, ο χρόνος που απαιτεί τελικά η μέθοδος Newton-Raphson είναι μικρότερος από το χρόνο της Gauss-Seidel [2].

Γενικά, τα μειονεκτήματα της Newton-Raphson είναι πως πρέπει να υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας σε κάθε βήμα που είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και πως απαιτείται περισσότερος χώρος μνήμης σε σύγκριση με τη μέθοδο Gauss-Seidel. Τα πλεονέκτημα είναι πως η Newton-Raphson συνήθως συγκλίνει, σε αντίθεση με τη Gauss-Seidel που πολλές φορές αποκλίνει. Έτσι, η Newton-Raphson προτιμάται στην ανάλυση ροής ισχύος γιατί συγκλίνει (συνήθως σε λιγότερες από 10 επαναλήψεις) και γιατί υπάρχουν τρόποι να μειωθεί ο χρόνος σε κάθε επανάληψη. Σχετικά με την αποζευγμένη μέθοδο Newton-Raphson, κατά την εφαρμογή της απαιτείται πολύ μικρότερη μνήμη και χρόνος υπολογιστή από τη μέθοδο Newton-Raphson αλλά απαιτούνται και περισσότερες επαναλήψεις [2]. Μια σύγκριση μεταξύ των μεθόδων Gauss-Seidel και Newton-Raphson παρουσιάζεται και στον

Πίνακας 6-2.

Πίνακας 6-2: Σύγκριση μεθόδων Gauss-Seidel και Newton-Raphson.

Τύπος προβλήματος	Gauss-Seidel	Newton-Raphson
Συστήματα με μεγάλο φορτίο	Συνήθως δεν επιλύει συστήματα με διαφορά φάσης μεγαλύτερη των 70ο	Επιλύει συστήματα με διαφορά φάσης μεγαλύτερη των 70ο
Συστήματα με αρνητικές αντιδράσεις, πχ ΜΣ τριών τυλιγμάτων	Ανίκανη να τα επιλύσει	Τα επιλύει με ευκολία
Συστήματα με ζυγό ταλάντωσης σε συγκεκριμένη θέση	Συχνά απαιτούνται δοκιμές trial & error για τον εντοπισμό του slack bus	Περισσότερο ανεκτική στη θέση του slack bus
Μακριές και κοντές γραμμές που τερματίζουν στους ίδιους ζυγούς	Συνήθως δε μπορεί να το επιλύσει	Μπορεί να επιλύσει τα περισσότερα συστήματα
Ακτινικό σύστημα μεγάλου μήκους	Δυσκολία επίλυσης	Επιλύει ευρεία περιοχή τέτοιων συστημάτων
Συντελεστές επιτάχυνσης	Καθοριστική σημασία	Δεν απαιτούνται

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ HVDC

7.1 Γενικά

Είναι γεγονός ότι οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο συνεχώς αυξάνονται. Ενδεικτικά η ζήτηση ενέργειας το 2040 ενδέχεται να αγγίξει τις 38,000 TWh σε σύγκριση με τις 24,000 TWh του 2016. Ακόμα η διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μείγμα με βάση τις προβλέψεις θα ξεπεράσει το 51% το 2040 [5]. Όλη αυτή η επιπλέον ενέργεια θα πρέπει να μεταφερθεί από τους σταθμούς παραγωγής προς τους τελικούς καταναλωτές. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι εκτός από επενδύσεις σε τεχνολογίες ΑΠΕ, είναι εξίσου σημαντικό να γίνουν επενδύσεις και στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Ιστορικά, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή εναλλασσόμενη τάση (AC) υπήρξε η κύρια τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και κυριάρχησε έναντι της μεταφοράς με συνεχή τάση (DC). Καθοριστικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η αλματώδης ανάπτυξη ηλεκτρικών μηχανών AC λόγω της ευκολίας κατασκευής και λειτουργίας τους. Ωστόσο η ανάπτυξη της τεχνολογίας έκανε και πάλι τη μεταφορά ρεύματος με DC προσιτή και πρόσφορη οικονομικά. Έτσι, τα τελευταία 10 χρόνια όλο και περισσότερα συστήματα αξιοποιούν την τεχνολογία high voltage direct current (HVDC) λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που εμφανίζει έναντι της κλασσικής high voltage alternating current (HVAC) μεταφοράς. Τα πλεονεκτήματα αυτά συνοψίζονται ως εξής:

- Δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με εναέριες ΓΜ. Η μεταφορά με DC υψηλής τάσης είναι

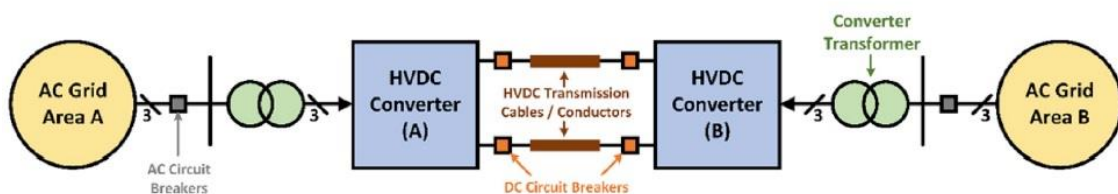
ανταγωνιστική της μεταφοράς με AC για αποστάσεις άνω των 600 km για τις εναέριες γραμμές

- Υποβρύχιες διασυνδέσεις μήκους άνω των 25 km (το αντίστοιχο όριο για τα υπόγεια καλώδια είναι 50 km). Η μεταφορά με AC δεν είναι τεχνοοικονομικά συμφέρουσα για αυτές τις αποστάσεις, εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας που παρουσιάζει το καλώδιο και έτσι απαιτούνται ενδιάμεσοι σταθμοί αντιστάθμισης. Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται και η υπεράκτια μεταφορά ενέργειας (offshore transmission).
- Ασύγχρονη σύνδεση συστημάτων AC. Η σύνδεση με γραμμές AC δεν είναι εφικτή, εξαιτίας προβλημάτων ευστάθειας του συστήματος ή λόγω διαφοράς στη συχνότητα των δύο συστημάτων.

Κάθε χρόνο κατασκευάζονται πλέον όλο και περισσότερα συστήματα HVDC, είτε με κατάλληλη τροποποίηση των υπάρχοντων δικτύων AC είτε με κατασκευή νέων. Επίσης, η συνεχής εξέλιξη που γίνεται σήμερα στο πεδίο των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος δίνει ακόμα μεγαλύτερη ώθηση και επέκταση της χρήσης των συστημάτων HVDC στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

7.2 Ιστορική αναδρομή

Η τεχνολογία HVDC στην πιο απλή της εκδοχή αφορά στη μεταφορά ισχύος από ένα σύστημα σε ένα άλλο χρησιμοποιώντας συνεχή τάση με την κατάλληλη παρεμβολή διατάξεων ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.1, η ισχύς αρχικά μετατρέπεται από AC σε DC στον μετατροπέα στο ένα άκρο της γραμμής μεταφοράς, στη συνέχεια μεταφέρεται με συνεχή υψηλή τάση DC, και τέλος μετατρέπεται και πάλι σε AC στο τέλος της γραμμής.



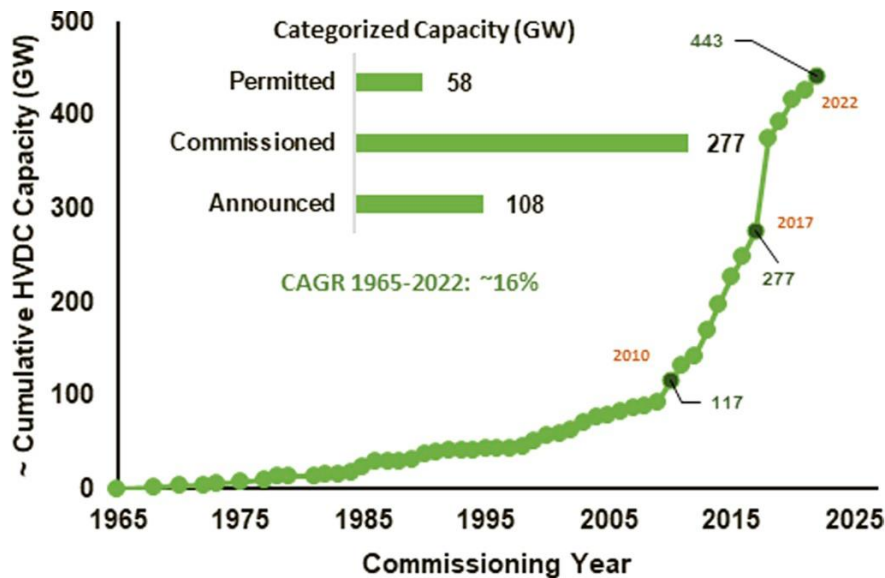
Σχήμα 7.1: Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με HVDC [5].

Ακόμα και αν η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει πλέον καθιερωθεί με εναλλασσόμενη AC τάση η πρώτη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας έγινε γύρω στο 1880 με συνεχή τάση DC. Αργότερα με την ανάπτυξη των μετασχηματιστών, των μηχανών

και των σύγχρονων γεννητριών, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω εναλλασσόμενης υψηλής τάσης (HVAC) αντικατέστησε γρήγορα τη μεταφορά μέσω συνεχούς τάσης. [6] Ωστόσο, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και ιδιαίτερα στα τέλη της δεκαετίας του 1990, οδήγησε σε εκ νέου την ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων μεταφοράς ενέργειας μέσω HVDC. Κάποια γεγονότα που αποτέλεσαν σταθμό για την μεταφορά με συνεχή τάση είναι τα εξής [5], [6], [7]:

- 1954: Πρώτη εμπορική χρήση HVDC, Gotland 1 στη Σουηδία, χρησιμοποιώντας ανορθωτές λυχνιών (90 km, 100 kV, 20 MW,)
- 1969: Χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος (thyristor)
- 1984: Κατασκευάζεται το υψηλότερο σε επίπεδο δυναμικού μέχρι τότε, δίκτυο HVDC (± 600 kV) στο Itaipu στην Βραζιλία
- 1999: Χρήση τεχνολογίας VSC για πρώτη φορά και πάλι στο Gotland της Σουηδίας
- 2010: Κατασκευάζεται το πρώτο δίκτυο υπερ-υψηλής τάσης UHVDC ± 800 kV στην επαρχία Yunnan – Guangdong της Κίνας
- 2019: Τίθεται σε λειτουργία η μεγαλύτερη στο κόσμο σε μήκος, τάση και ισχύ γραμμή UHVDC στην επαρχία Xinjiang της Κίνας (3.324 km, 1.100 kV, 12.000 MW)

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7.2, η ανάπτυξη των HVDC τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία. Μάλιστα η αύξηση της εγκαταστημένης ισχύος HVDC την τελευταία δεκαετία είναι εκθετική, ενώ οι προβλέψεις δείχνουν ότι η συγκεκριμένη αγορά θα συνεχίσει να εξελίσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πως ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης (CAGR) για τα συστήματα HVDC, από το 2020 μέχρι το 2025, προβλέπεται να ισούται με 11%, δηλαδή περίπου 3 φορές υψηλότερος από τον προβλεπόμενο ρυθμό ανάπτυξης του παγκόσμιου ΑΕΠ [8].

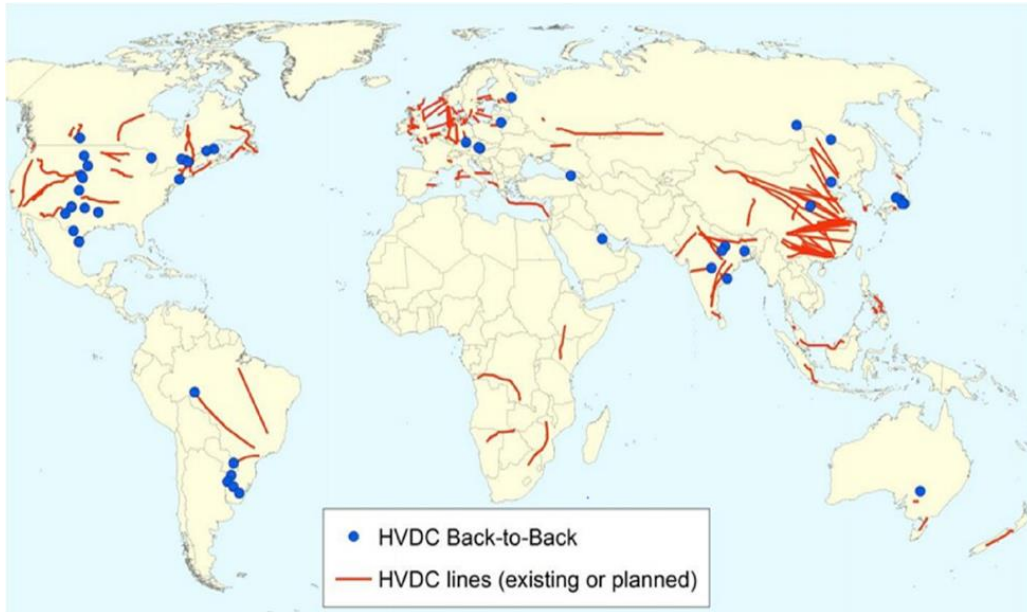


Σχήμα 7.2: Εξέλιξη της εγκατεστημένης HVDC ισχύος από το 1965 μέχρι το 2022 [5].

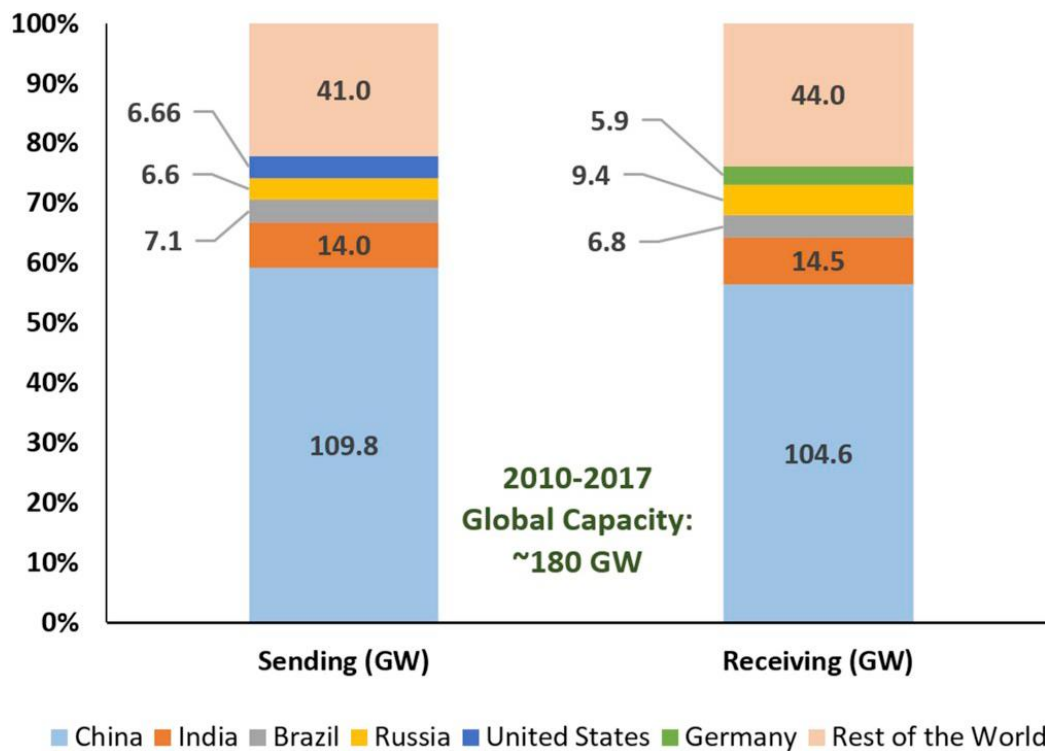
7.3 Γεωγραφική κατανομή HVDC

7.3.1 HVDC σε παγκόσμιο επίπεδο

Μεγαλύτερο μερίδιο αυτή τη στιγμή στα συστήματα HVDC όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 7.3 και 7.4 έχει η Κίνα. Εξαιτίας των όλο και αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών της χώρας αλλά και των μεγάλων αποστάσεων, η Κίνα έγινε σύντομα ο παγκόσμιος ηγέτης στα συστήματα HVDC. Μάλιστα είναι η πρώτη χώρα που εγκαταστάθηκαν για πρώτη φορά και συστήματα Ultra HVDC (UHVDC), δηλαδή συστήματα HVDC με τάσεις άνω των 600kV [5], [7], [8]. Στη συνέχεια ακολουθεί η Ινδία και η Βραζιλία. Ειδικά στη Βραζιλία είναι κατασκευασμένο ένα από τα μεγαλύτερα και επιβλητικότερα έργα HVDC στον κόσμο στο Itaipu. Ακολουθούν χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ρωσία, καθώς και αρκετές χώρες της Ευρωπαϊκής Ηπείρου. Ακόμα υπάρχουν (ή σχεδιάζονται) και άλλα έργα HVDC σε όλο τον κόσμο [5], [6].



Σχήμα 7.3: Γεωγραφική κατανομή συστημάτων HVDC το 2017 [5].



Σχήμα 7.4: Παγκόσμια κατανομή ισχύος HVDC μεταξύ 2010 και 2017 [5].

7.3.2 HVDC στην Ελλάδα

Αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα λειτουργεί μια HVDC γραμμή, που διασυνδέει τη χώρα με το γειτονικό ΣΗΕ της Ιταλίας. Ωστόσο, είναι σε κατασκευή και τα επόμενα

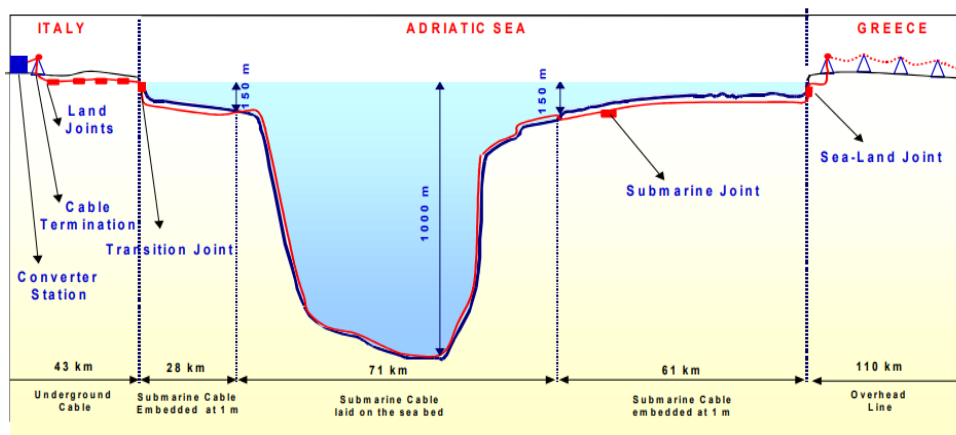
χρόνια θα λειτουργήσει μια δεύτερη HVDC γραμμή που θα συνδέει το νησί της Κρήτης με την ηπειρωτική χώρα.

7.3.2.1 Διασύνδεση Ελλάδας - Ιταλίας

Η γραμμή HVDC που διασυνδέει την Ελλάδα με την Ιταλία λειτουργεί από το 2002 (Σχήμα 7.5). Πρόκειται για μια γραμμή συνολικού μήκους 313 km εκ των οποίων τα 163 km είναι υποθαλάσσια. Το μέγιστο βάθος πόντισής του συστήματος στο Στενό του Οτράντο είναι 1.000 m (Σχήμα 7.6). Η γραμμή έχει δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 500 MW ανά κατεύθυνση με τάση 400 kV DC, ενώ έχει προβλεφθεί η μελλοντική επέκταση μέσω ενός δεύτερου καλωδίου της ίδιας ισχύος που θα καθιστά τη διασύνδεση διπολική και θα αποφέρει συνολική ισχύ 1000 MW [9], [10].



Σχήμα 7.5: Ηλεκτρική HVDC διασύνδεση Ελλάδας-Ιταλίας [10].



Σχήμα 7.6: Το βαθυμετρικό προφίλ του έργου GRITA [10].

7.3.2.2 Διασύνδεση Κρήτης – Αττικής

Η ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης-Αττικής είναι έργο εθνικής σημασίας, με πολλαπλά περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη. Η ολοκλήρωσή του θα άρει οριστικά τον ενεργειακό αποκλεισμό του νησιού και θα καταστήσει την ηλεκτροδότηση της Κρήτης φθηνή, πράσινη και αξιόπιστη. Και τούτο διότι θα μπει τέλος στην εξάρτηση της Κρήτης από τους αυτόνομους ρυπογόνους σταθμούς παραγωγής. Υπολογίζεται πως οι ρύποι CO₂ της Κρήτης θα περιοριστούν κατά 60% σε σχέση με τα τρέχοντα επίπεδα και θα γίνει αξιοποίηση του μεγάλου δυναμικού ΑΠΕ του νησιού συνολικής ισχύος 2.500 MW [10], [11].

Το έργο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.7 αποτελείται από 2 τμήματα: 1 γραμμή HVAC μεταξύ Κρήτης-Πελοποννήσου και 1 γραμμή HVDC μεταξύ Κρήτης-Αττικής. Τέλη του 2020 έγινε δοκιμαστική ηλεκτρίση της διασύνδεσης Κρήτης-Πελοποννήσου όπου πρόκειται για την μεγαλύτερη HVAC υποβρύχια γραμμή στον κόσμο. Εντός του 2023 υπολογίζεται πως θα παραδοθεί πλήρως και η γραμμή HVDC [10], [11].



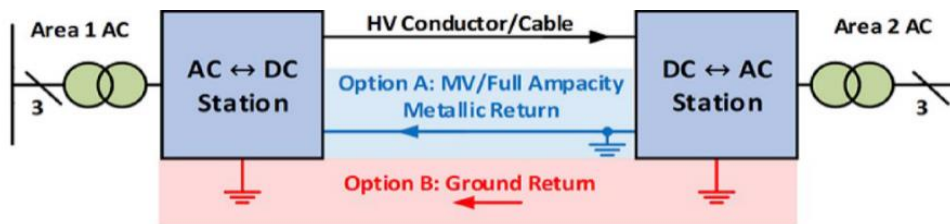
Σχήμα 7.7: Ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα μεταφοράς [10].

7.4 Βασικές τοπολογίες HVDC

Η κύρια εφαρμογή της τεχνολογίας HVDC είναι η διασύνδεση HVAC συστημάτων μεταφοράς τα οποία μπορεί να είναι γειτονικά ή απομακρυσμένα μεταξύ τους. Επομένως, υπάρχουν διαφορετικές τοπολογίες που εφαρμόζονται ανάλογα με τις ανάγκες διασύνδεσης.

7.4.1 Μονοπολική διασύνδεση.

Στη μονοπολική διασύνδεση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.8, χρησιμοποιείται μόνο ένας αγωγός για τη μεταφορά της ισχύος από το ένα σύστημα στο άλλο. Ο αγωγός επιστροφής μπορεί να είναι ένας αγωγός χαμηλής τάσης, η γη ή η θάλασσα. Η διασύνδεση συνήθως λειτουργεί με τάση αρνητικής πολικότητας επειδή υπάρχουν λιγότερες απώλειες κορώννα και περιορίζονται τα ραδιοφωνικά παράσιτα. Ωστόσο, τμήμα του ρεύματος επιστροφής μπορεί να ρέει και σε γειτονικές μεταλλικές κατασκευές, όπως σωλήνες ύδρευσης ή φυσικού αερίου, και να επισπεύσει με τον τρόπο αυτό τη διάβρωσή τους. Ακόμη, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές γειτονικά του καλωδίου ή να επηρεάσει έμβιους οργανισμούς που βρίσκονται στην περιοχή του. Για τους λόγους αυτούς σε πολλές χώρες η μονοπολική διασύνδεση με επιστροφή το έδαφος δεν επιτρέπεται [6]. Το κύριο μειονέκτημα των μονοπολικών διασυνδέσεων είναι πως δεν υπάρχει επαρκή εφεδρεία στο σύστημα, καθώς σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή ή στους μετατροπείς τότε χάνεται στο 100% η ικανότητα μεταφοράς ισχύος [5].

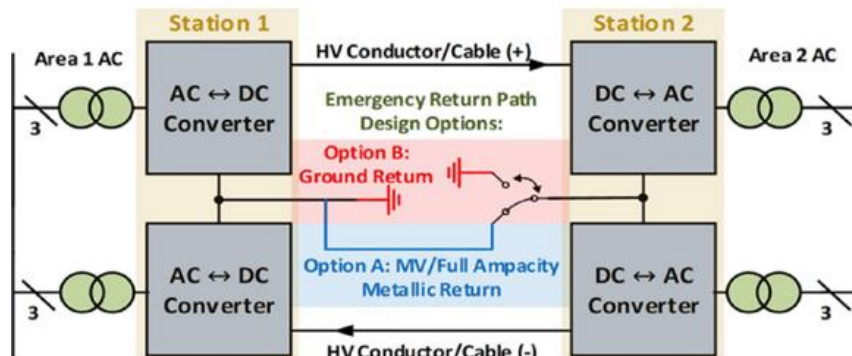


Σχήμα 7.8: Μονοπολική διασύνδεση HVDC [5]

7.4.2 Διπολική διασύνδεση

Οι διπολικές διασυνδέσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.9 χρησιμοποιούν δύο αγωγούς. Ο ένας αγωγός λειτουργεί με τάση θετικής πολικότητας και ο άλλος με τάση αρνητικής πολικότητας. Το σημείο σύνδεσης ανάμεσα στους δύο σταθμούς μετατροπής μπορεί να γειωθεί στο ένα ή και στα δύο τέρματα των γραμμών [6]. Οι μετατροπείς στα δύο άκρα παράγουν δύο ίσες και αντίθετες τάσεις, προκαλώντας τη ροή ισχύος στον εξωτερικό «βρόχο», με αμελητέα ροή ρεύματος στον ουδέτερο/αγωγό επιστροφής. Ο αγωγός επιστροφής μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιο ηλεκτρόδιο γης ή μεταλλική επιστροφή [5]. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η αυξημένη αξιοπιστία που προσφέρει. Αυτό συμβαίνει καθώς σε περίπτωση σφάλματος σε έναν πόλο ή σε ένα μετατροπέα ο ουδέτερος λειτουργεί ως αγωγός επιστροφής και

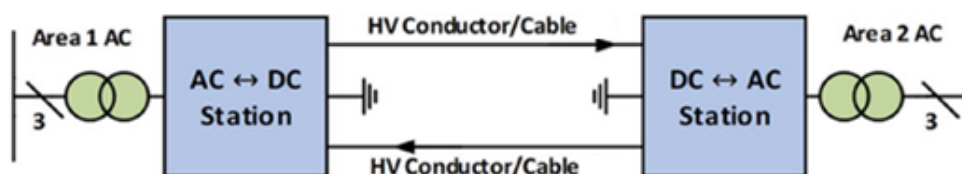
το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί μεταφέροντας το 50% της ονομαστικής του ισχύος [5].



Σχήμα 7.9: Διπολική διασύνδεση HVDC [5]

7.4.3 Συμμετρικά μονοπολική ή ομοπολική

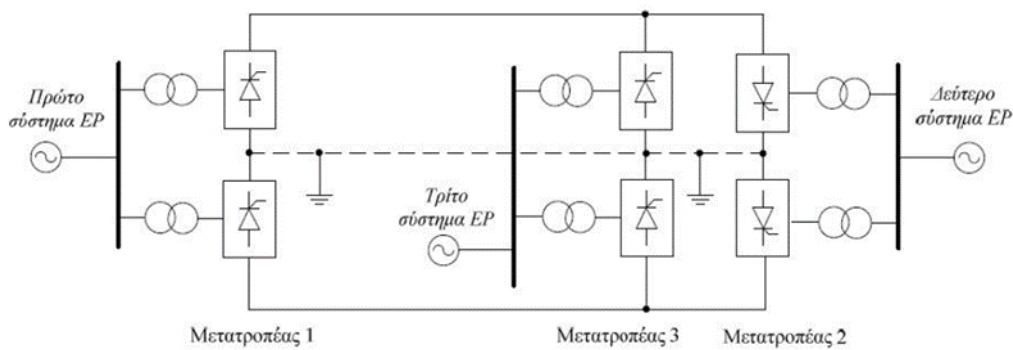
Στην ομοπολική τοπολογία υπάρχουν δύο αγωγοί που έχουν την ίδια πολικότητα (συνήθως αρνητική) και μπορούν να λειτουργήσουν είτε με μεταλλική επιστροφή είτε με επιστροφή μέσω γης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10. Σε περίπτωση σφάλματος στον έναν αγωγό, ο μετατροπέας μπορεί να «επανασυνδεθεί» και να τροφοδοτήσει μόνο τον υγιή αγωγό, ο οποίος θα μεταφέρει όλη την ισχύ από το ένα σύστημα στο άλλο. Γενικά, η συγκεκριμένη διάταξη είναι αρκετά περίπλοκη και γι' αυτό σε περίπτωση που είναι απαραίτητη η εφεδρεία προτιμάται η διπολική διασύνδεση με αγωγό επιστροφής.



Σχήμα 7.10: Ομοπολική διασύνδεση HVDC [5]

7.4.4 Διαμόρφωση πολλαπλών τερματικών

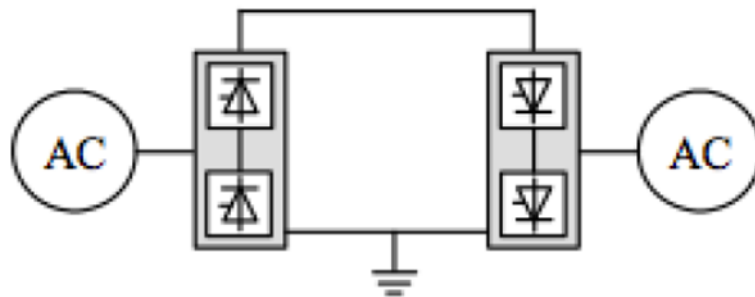
Αποτελείται από τρεις ή περισσότερους σταθμούς μετατροπής. Χρησιμοποιείται για περιπτώσεις όπου απαιτούνται περισσότερα από δύο σημεία σύνδεσης προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η λειτουργικότητα του δικτύου (Σχήμα 7.11).



Σχήμα 7.11: Διασύνδεση πολλών τερματικών [12]

7.4.5 Back-to-back διασύνδεση

Στην περίπτωση δύο γειτονικών HVAC συστημάτων η DC διασύνδεση γίνεται μέσω των σταθμών μετατροπής οι οποίοι βρίσκονται στον ίδιο υποσταθμό. Τα HVAC συστήματα μπορεί να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους με διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά λειτουργίας όπως συχνότητα, τάση, ισχύς βραχυκύκλωσης. Αυτό το σύστημα μεταφοράς ονομάζεται “back-to-back” και τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι η δυνατότητα διασύνδεσης δύο ασύγχρονων HVAC συστημάτων καθώς και η ταχύτατη και πλήρως ελεγχόμενη ροή φορτίου (Σχήμα 7.12) [6].



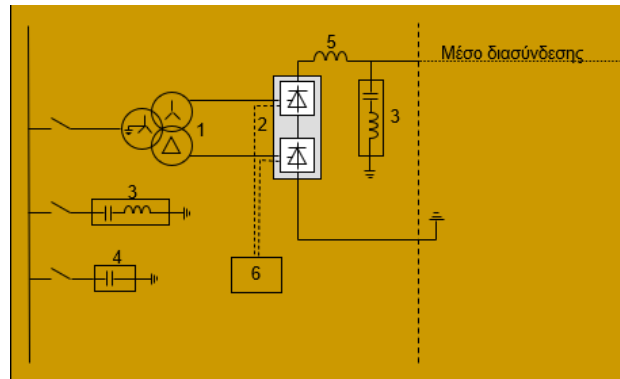
Σχήμα 7.12: Back-to-back HVDC διασύνδεση [6]

7.5 Σταθμοί μετατροπής HVDC

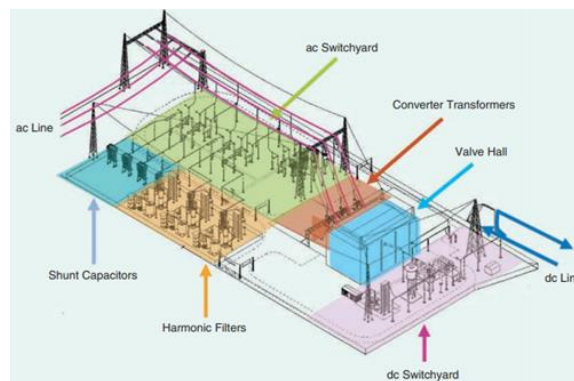
Στα άκρα κάθε HVDC συστήματος μεταφοράς υπάρχουν οι σταθμοί μετατροπής του συστήματος. Ένα τυπικό διάγραμμα ενός σταθμού μετατροπής στη γενική του μορφή φαίνεται στο Σχήμα 7.13 και η τοπολογία σε φυσικό επίπεδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.14. Γενικά, ένας σταθμός μετατροπής αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- 1) Μετασχηματιστές

- 2) Μετατροπείς
- 3) Φίλτρα
- 4) Διατάξεις αντιστάθμισης
- 5) DC αυτεπαγωγές
- 6) Σύστημα ελέγχου
- 7) Διακόπτες, εκτροπείς υπερτάσεων



Σχήμα 7.13: Γενικό διάγραμμα σταθμού μετατροπής HVDC [13].



Σχήμα 7.14: Τοπολογία σταθμού μετατροπής HVDC [14]

7.5.1 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος

Αδιαμφισβήτητα, οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στον υποσταθμό αποτελούν το σημαντικότερο τμήμα του, εφόσον μέσω αυτών γίνεται η μετατροπή της AC τάσης σε DC, κατά τη λειτουργία ανορθωτή (rectifier), και της DC τάσης σε AC, κατά τη λειτουργία αντιστροφέα (inverter).

Υπάρχουν δύο βασικά είδη τριφασικών μετατροπέων: οι μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters, VSC) και οι μετατροπείς πηγής ρεύματος (Current

Source Converters, CSC). Το πρώτο είδος μετατροπέα υλοποιείται με διατάξεις αποτελούμενες από διακοπτικά στοιχεία (GTOs, IGBTs), ενώ το δεύτερο είδος υλοποιείται με διατάξεις βασισμένες σε θυρίστορ [6]. Οι κατηγορίες αυτών των μετατροπέων αναλύονται περαιτέρω σε επόμενο υποκεφάλαιο.



Σχήμα 7.15: Μέρος ενός μετατροπέα ισχύος HVDC σε διαδικασία δοκιμών [15]

7.5.2 Φίλτρα

Η χρήση μη γραμμικών στοιχείων στη διάταξη του HVDC συστήματος συνεπάγεται την ύπαρξη αρμονικών. Οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν αρκετά προβλήματα όπως παραμόρφωση τάσης, θόρυβο στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, υπερθέρμανση κτλ. Επομένως, η χρήση φίλτρων επιβάλλεται και στην AC και στην DC πλευρά για τη μείωση των αρμονικών τάσεως και ρεύματος σε αποδεκτές τιμές αλλά και για λόγους αντιστάθμισης.

7.5.2.1 AC φίλτρα

Βασικός σκοπός των AC φίλτρων (Σχήμα 7.16) είναι η αποτροπή διάχυσης αρμονικών ρεύματος στο AC δίκτυο, με στόχο τη μείωση του ποσοστού διαταραχής της τάσης στο σημείο κοινής διασύνδεσης, καθώς και την ελάττωση των παρεμβολών στο συνδεδεμένο AC δίκτυο. Επιπλέον, τα AC φίλτρα παρέχουν άεργο ισχύ με σκοπό την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος που καταναλώνεται στους HVDC μετατροπείς [16]. Για την πλήρη αντιστάθμιση της άεργου ισχύος χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα και πυκνωτές αντιστάθμισης [6].



Σχήμα 7.16: AC φίλτρα [16]

7.5.2.2 DC φίλτρα

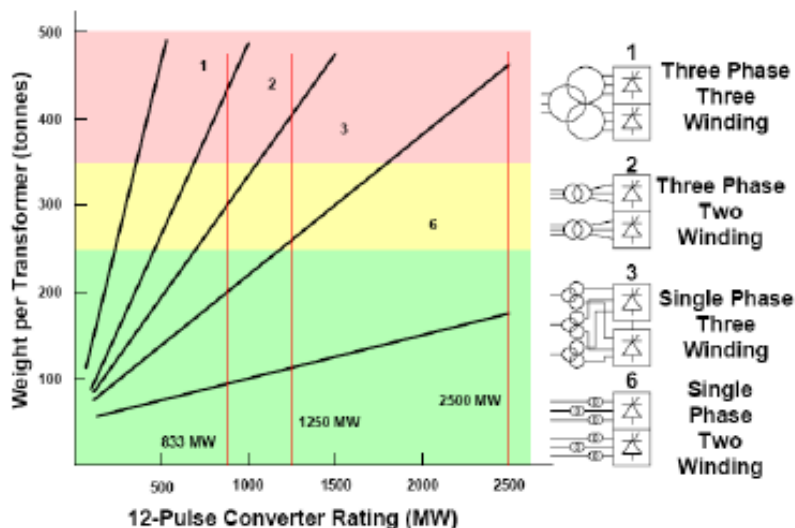
Μερικές από τις αρμονικές που δημιουργούν οι μετατροπείς μπορεί να περάσουν και στο τμήμα μεταφοράς με συνεχή τάση και να προκαλέσουν παρεμβολές στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Έτσι, σε περίπτωση που ο σταθμός μετατροπής συνδέεται σε DC σύστημα με εναέριες γραμμές μεταφοράς κρίνεται απαραίτητη η χρήση DC φίλτρων στην DC πλευρά. [16]. Τα DC φίλτρα είναι μικρότερα και φθηνότερα σε σχέση με τα απαιτούμενα AC, ενώ συνήθως παραλείπονται στα “back-to-back” συστήματα.

7.5.3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής μετατροπέα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της διάταξης για τους παρακάτω λόγους [16], [17]:

- Αποτελεί τη γαλβανική απομόνωση μεταξύ του AC και του DC συστήματος καθώς δεν είναι δυνατή η επαγωγή της DC τάσης στον μετασχηματιστή.
- Παρέχει εναλλασσόμενες τάσεις στις δύο γέφυρες του μετατροπέα με διαφορά φάσης 30 μοιρών (για τους CSC)

Ένας μετασχηματιστής μπορεί να έχει συνδεσμολογία μίας φάσης (single-phase arrangement) ή συνδεσμολογία τριών φάσεων (three-phase arrangement). Η συνδεσμολογία του μετασχηματιστή εξαρτάται από τις απαιτήσεις για τάση, τα ονομαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή, τις συνθήκες μεταφοράς καθώς και από τη διάταξη του σταθμού του μετατροπέα. Επιπλέον, ανάλογα με τη συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται, αλλάζει και το βάρος του μετασχηματιστή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.17 [16]. Καθώς οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος μπορούν πλέον να μετασχηματίζουν ισχύ πάνω από 11 GW και σε τάσεις άνω των 1,100 kV, είναι αυτονόητο πως και οι αντίστοιχοι μετασχηματιστές των μετατροπέων πρέπει να έχουν μια πολύ υψηλή δυνατότητα μετασχηματισμού της ισχύος. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που οι μετασχηματιστές αυτοί είναι αρκετά ογκώδεις και μπορούν να φτάσουν σε βάρος μέχρι και τους 600 τόνους (Σχήμα 7.18) [15].



Σχήμα 7.17: Εύρος βάρους μετασχηματιστών για διάφορες συνδεσμολογίες [16]



Σχήμα 7.18: Μετασχηματιστής μετατροπέα 800 kV UHVDC [15]

Γενικά ένας μετασχηματιστής μετατροπέα διαφέρει από ένα τυπικό μετασχηματιστή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος λόγω των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας. Ένας μετασχηματιστής HVDC πρέπει να αντέχει συνδυασμένες AC και DC καταπονήσεις σε αντίθεση με ένα τυπικό μετασχηματιστή που πρέπει να αντέξει μόνο AC. Για αυτό και οι μονώσεις των τυλιγμάτων σε έναν μετασχηματιστή μετατροπέα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ενισχυμένες ώστε να αντέχουν σε συνδυασμένες AC και DC καταπονήσεις καθώς και σε τυχόν ατμοσφαιρικές υπερτάσεις ή υπερτάσεις λόγω χειρισμών. Ακόμη, το υψηλό περιεχόμενο αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος λειτουργίας έχει ως συνέπεια να παρατηρούνται αυξημένες απώλειες στα τυλίγματα καθώς και σε άλλα δομικά στοιχεία, όπως απώλειες δυναμορευμάτων λόγω αρμονικών.

7.5.4 Αυτεπαγωγές εξομάλυνσης

Οι αυτεπαγωγές εξομάλυνσης (Σχήμα 7.19) συνήθως περιλαμβάνονται σε κάθε πόλο του σταθμού μετατροπής και συνδέονται σε σειρά στην έξοδο των μετατροπέων. Οι αυτεπαγωγές παρουσιάζουν κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά όπως τα παρακάτω [16]:

- Εξομάλυνση του DC ρεύματος, με σκοπό την αποφυγή ασυνέχειας του ρεύματος σε χαμηλά επίπεδα μεταφοράς ισχύος.
- Μείωση της συχνότητας εμφάνισης σφαλμάτων μεταγωγής.

- Αποτελούν επιπρόσθετα τμήματα των DC φίλτρων που χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των αρμονικών και την μείωση των παρεμβολών σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας.



Σχήμα 7.19: Αυτεπαγωγή εξομάλυνσης [18].

7.5.5 Εκτροπείς υπερτάσεων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε μία εγκατάσταση εκτίθεται σε διαφόρων ειδών υπερτάσεις. Αυτές μπορεί να προκαλούνται από κεραυνούς που προσβάλλουν το σύστημα, από χειρισμούς διακοπών και από εσωτερικά ή εξωτερικά σφάλματα που είναι πιθανό να συμβούν. Έτσι, λοιπόν, με σκοπό να προστατευθούν οι ζυγοί HVAC, τα AC φίλτρα, οι μετατροπείς στην είσοδο και έξοδο τους, οι ζυγοί HVDC και τα DC φίλτρα καθώς και ο αγωγός επιστροφής ή ο ουδέτερος του συστήματος από τις πιθανές υπερτάσεις χρησιμοποιούνται εκτροπείς υπερτάσεων (Σχήμα 7.20) [6]. Βασικός στόχος των εκτροπέων είναι η μείωση της υπέρτάσης στα άκρα των συσκευών του εξοπλισμού και να διατηρείται αυτή σε επίπεδο χαμηλότερο από το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) του εξοπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με την παράλληλη σύνδεση στα άκρα του εξοπλισμού, στοιχείων που εμφανίζουν μη-γραμμικές χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης.



Σχήμα 7.20: Εκτροπείς υπερτάσεων HVDC 500kV (αριστερά) και 1100kV (δεξιά) [15]

7.6 Σύγκριση συστημάτων HVDC με HVAC και εφαρμογές

Τα HVDC και HVAC συστήματα μεταφοράς εμφανίζουν διαφορές μεταξύ τους. Η σύγκριση τους δεν είναι μια εύκολη διαδικασία καθώς σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων που συνδέονται με την γραμμή μεταφοράς. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι [6], [16]:

- Τα οικονομικά στοιχεία της μεταφοράς ισχύος και στα δύο συστήματα.
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθενός από τα δύο συστήματα και πώς αυτά επηρεάζουν την απόδοσή τους.
- Τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των δύο συστημάτων.
- Τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων

Για το λόγο αυτό, στις επόμενες ενότητες δεν γίνεται ρητή αναφορά σε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του HVDC καθώς κάτι τέτοιο θα ήταν άστοχο. Αντίθετα, σημειώνονται τα χαρακτηριστικά που εμφανίζει το HVDC σε διάφορες

καταστάσεις, συγκριτικά πάντα με το HVAC, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και οι βασικές εφαρμογές του.

7.6.1 Μεταφερόμενη ισχύς και απώλειες

Οι δυνατότητες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των HVAC και HVDC γραμμών μεταφοράς είναι διαφορετικές. Για την ίδια τάξη μόνωσης, η συνεχής τάση V_d θα είναι ίση με την peak τιμή της εναλλασσόμενης τάσης V_a , όπως φαίνεται στην (7.1). Επιπλέον, για το ίδιο μέγεθος αγωγών και θεωρώντας αμελητέο το επιδερμικό φαινόμενο, τα ρεύματα που ρέουν στο HVDC και στο HVAC θα είναι ίσα μεταξύ τους (7.2) [16].

$$V_d = \sqrt{2} V_a \quad (7.1)$$

$$I_d = I_a \quad (7.2)$$

Έστω ότι έχουμε μια διπολική γραμμή μεταφοράς HVDC και μια τριφασική HVAC γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος. Η μεταφερόμενη ισχύς στο κάθε κύκλωμα θα είναι:

HVDC:

$$P_d = 2V_d I_d \quad (7.3)$$

HVAC:

$$P_a = 3V_a I_a \cos \varphi = 3 \left(\frac{V_d}{\sqrt{2}} \right) I_a \cos \varphi \quad (7.4)$$

Διαιρώντας τις (7.3) και (7.4) προκύπτει

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{2 \sqrt{2}}{3 \cos \varphi} \quad (7.5)$$

Αντίστοιχα η μεταφερόμενη ισχύς ανά αγωγό ισούται με:

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{\sqrt{2}}{\cos \varphi} \quad (7.6)$$

Έστω ότι έχουμε μια άλλη περίπτωση όπου οι μεταφερόμενες ισχύεις είναι ίσες μεταξύ τους και η μεταφορά γίνεται σε αγωγούς με ίσες διατομές και υπό μέγιστη τάση V_d . Επομένως ισχύει:

$$P_d = P_a \Rightarrow I_a = \left(\frac{2\sqrt{2}}{3\cos\varphi} \right) I_d \quad (7.7)$$

Οι απώλειες Joule για τα δύο δίκτυα θα είναι ίσες με:

HVDC:

$$P_{loss-dc} = 2I_a^2 R \quad (7.8)$$

HVAC:

$$P_{loss-ac} = 3I_a^2 R = 3 \left[\left(\frac{2\sqrt{2}}{3\cos\varphi} \right) I_d \right]^2 R = \left(\frac{8}{3\cos^2\varphi} \right) I_d^2 R \quad (7.9)$$

Με διαίρεση των (7.8) και (7.9) προκύπτει ότι:

$$P_{loss-dc} = \left(\frac{3}{4\cos^2\varphi} \right) P_{loss-ac} \quad (7.10)$$

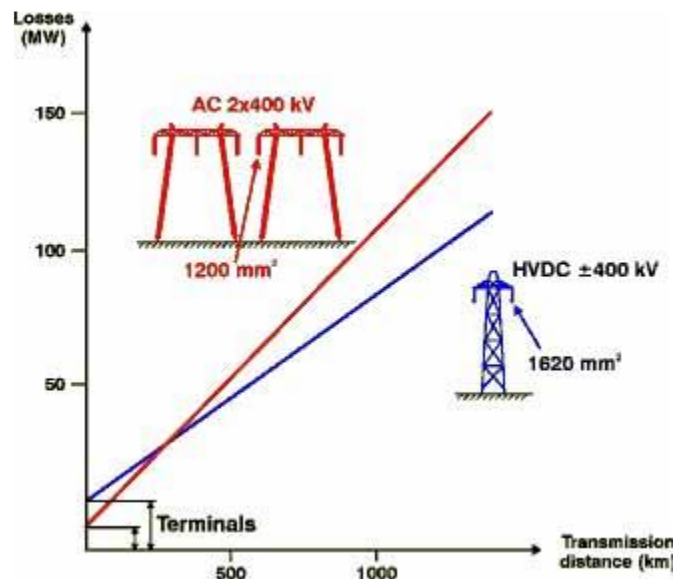
Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μεταφερόμενη ισχύς ανά αγωγό είναι μεγαλύτερη στο HVDC δίκτυο (σχέση 7.6), όταν συγκρίνονται αγωγοί ίσων διατομών, με ίδια ρεύματα και με ίση στάθμη μόνωσης.
- Οι απώλειες στο HVDC σύστημα είναι μικρότερες στην περίπτωση όπου η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίδια και οι διατομές των αγωγών ίσες μεταξύ τους και στα δύο συστήματα (σχέση 7.10)

Η διαφορά στις απώλειες ισχύος είναι ακόμη μεγαλύτερη εάν ληφθεί υπόψη στην ανάλυση η μεγαλύτερη αντίσταση των αγωγών υπό HVAC (λόγω επιδερμικού φαινομένου). Ωστόσο κατά την ανάλυση των απωλειών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες των τερματικών σταθμών, οι οποίες στην περίπτωση των HVDC συστημάτων είναι σημαντικές λόγω της λειτουργίας των μετατροπέων [6] [16].

Στο Σχήμα 7.21 φαίνονται οι απώλειες ισχύος ενός HVDC και ενός HVAC συστήματος μεταφοράς ισχύος 1200 MW σε συνάρτηση με την απόσταση. Φαίνεται

πως μετά από μια κρίσιμη απόσταση (περίπου 400 km) οι συνολικές απώλειες του HVDC είναι συγκριτικά μικρότερες.

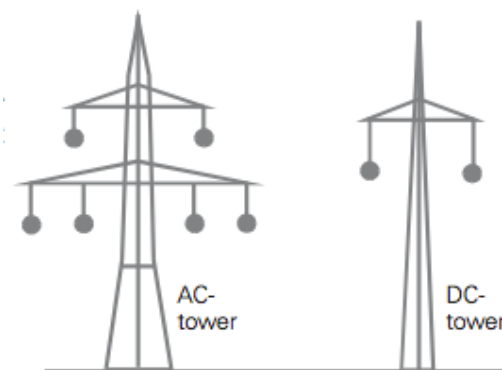


Σχήμα 7.21: Απώλειες ισχύος γραμμών μεταφοράς 1200MW συναρτήσει της απόστασης μεταφοράς [17].

7.6.2 Κόστος εγκατάστασης

7.6.2.1 Κόστος γραμμών

Κατά γενικό κανόνα οι HVDC γραμμές μεταφοράς στοιχίζουν λιγότερο από τις HVAC. Μία διπολική HVDC γραμμής μεταφοράς έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ισχύ όσο μία HVAC τριφασική γραμμή διπλού κυκλώματος, η οποία έχει έξι αγωγούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.22 [6]. Επομένως, είναι λογικό πως στην περίπτωση του συστήματος HVDC οι πυλώνες στήριξης των αγωγών θα είναι μικρότεροι, πιο απλοί και άρα και πιο οικονομικοί, σε σχέση με τους πυλώνες του αντίστοιχου συστήματος HVAC.

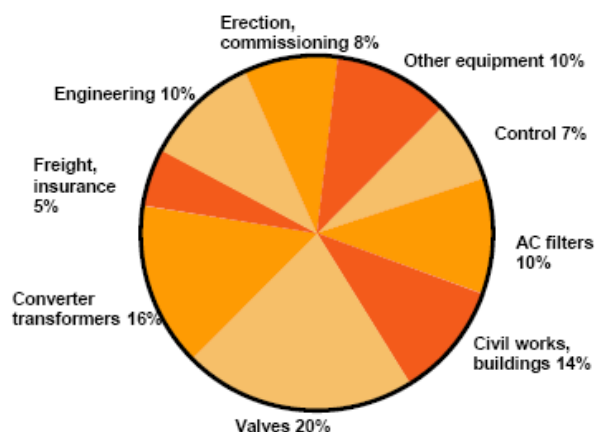


Σχήμα 7.22: Πυλώνες στήριξης αγωγών AC (αριστερά) και DC (δεξιά) [17]

7.6.2.2 Κόστος υποσταθμού

Σε αντίθεση με το κόστος των γραμμών, το κόστος του υποσταθμού είναι ιδιαίτερα αυξημένο στα συστήματα HVDC. Οι τερματικοί σταθμοί του συστήματος μεταφοράς είναι ογκωδέστεροι και στοιχίζουν πολύ περισσότερο στην περίπτωση της HVDC μεταφοράς λόγω της ανάγκης μετατροπής της τάσης [6].

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένας σταθμός μετατροπής HVDC αποτελείται από πολλά τμήματα (μετατροπείς, μετασχηματιστές, φίλτρα, πηνία εξομάλυνσης κτλ) σε αντίθεση με έναν τυπικό υποσταθμό ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης που χρησιμοποιείται στα συστήματα HVAC, που είναι σαφώς πιο απλός. Το μεγαλύτερο κόστος της εγκατάστασης ενός σταθμού μετατροπής HVDC καταλαμβάνουν οι διατάξεις των μετατροπένων αλλά και οι μετασχηματιστές (Σχήμα 7.23).



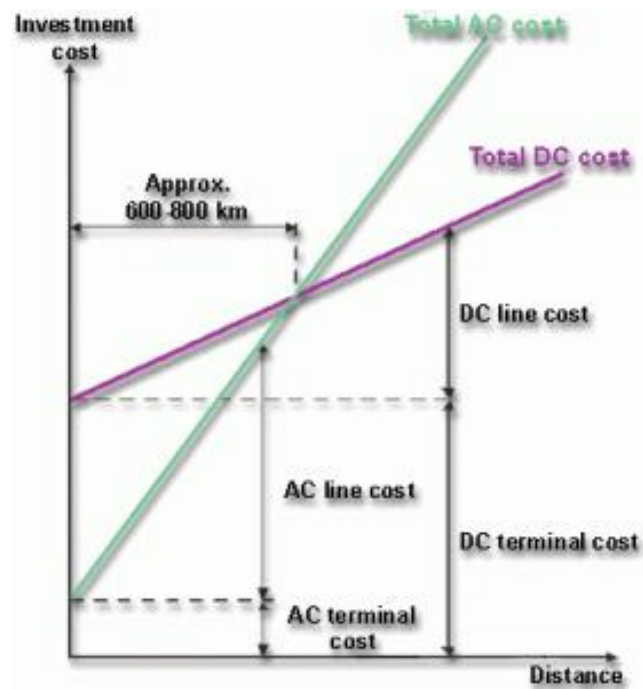
Σχήμα 7.23: Επιμερισμός κόστους σταθμού μετατροπής HVDC [16]

7.6.2.3 Κρίσιμη απόσταση

Συνδυάζοντας αυτά τα δύο κόστη έχει αποδειχθεί πως υπάρχει μια κρίσιμη απόσταση, πάνω από την οποία είναι αρκετά πιο οικονομική η εγκατάσταση ενός συστήματος μεταφοράς με συνεχή τάση.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.24, η απόσταση αυτή είναι περίπου 600-800 km για εναέρια γραμμές μεταφοράς [6]. Επομένως, αντιλαμβάνεται κανείς πως τα δίκτυα HVDC είναι πιο συμφέρον να χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις (Σχήμα 7.25), καθώς η επιλογή του HVAC συνεχίζει να είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά για τις μικρές αποστάσεις. Βέβαια στην περίπτωση των υπόγειων και υποθαλάσσιων διασυνδέσεων η κρίσιμη απόσταση μεταξύ HVAC και

HVDC είναι πολύ μικρότερη, περίπου στα 50 km [6]. Οι λόγοι για αυτή την διαφορά εξηγούνται στην ενότητα 7.6.4.



Σχήμα 7.24: Κόστος συνολικής εγκατάστασης μεταφοράς συναρτήσει της απόστασης [17].



Σχήμα 7.25: HVDC γραμμές στην Ινδία [16]

7.6.3 Διασύνδεση ασύγχρονων HVAC δικτύων μεταφοράς

Η διασύνδεση δικτύων που λειτουργούν με διαφορετική ονομαστική συχνότητα ή ασύγχρονα λόγω διαφορετικών ανοχών στα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους δεν είναι δυνατή μέσω HVAC κυρίως για λόγους ευστάθειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η Ιαπωνία όπου περίπου το μισό δίκτυό της λειτουργεί στα 60 Hz ενώ το υπόλοιπο στα 50 Hz (Σχήμα 7.26). Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, το δίκτυο των ανατολικών πολιτειών είναι ασύγχρονο σε σχέση με αυτό των δυτικών αν και λειτουργούν και τα δύο με την ίδια ονομαστική συχνότητα. Το ίδιο ισχύει και μεταξύ των δικτύων της Σκανδιναβίας και της δυτικής Ευρώπης. Στις περιπτώσεις αυτές, η ανταλλαγή ενέργειας γίνεται εφικτή μέσω HVDC διασυνδέσεων. Τα ασύγχρονα δίκτυα είτε φθάνουν στον ίδιο σταθμό μετατροπής και διασυνδέονται είτε παρεμβάλλεται μεταξύ τους HVDC γραμμή μεταφοράς. [6]



Σχήμα 7.26: Back-to-back διασύνδεση στην Ιαπωνία [19].

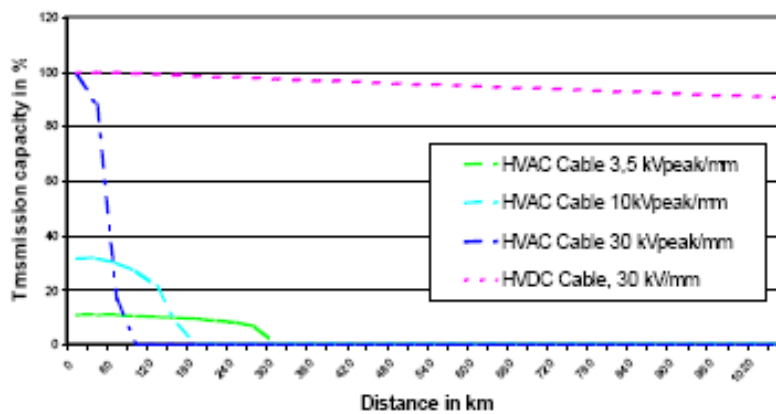
7.6.4 Υπόγεια και υποθαλάσσια διασύνδεση ΣΗΕ

Τα υπόγεια και υποθαλάσσια καλώδια παρουσιάζουν αυξημένη χωρητικότητα, καθώς οι αγωγοί τους περιβάλλονται από ένα λεπτό στρώμα μόνωσης και μία μεταλλική θωράκιση. Στην περίπτωση καλωδίων AC, η χωρητικότητα του καλωδίου εμφανίζεται ως ένα επιπρόσθετο φορτίο παράλληλα με το υπάρχον φορτίο του συστήματος. Επομένως, χρειάζεται ένα επιπρόσθετο χωρητικό ρεύμα φόρτισης για τη λειτουργία του καλωδίου. Όσο μεγαλύτερο είναι το καλώδιο τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του και επομένως απαιτείται μεγαλύτερο χωρητικό ρεύμα. Ωστόσο, η ύπαρξη του χωρητικού αυτού ρεύματος προκαλεί περεταίρω αύξηση των απωλειών στους αγωγούς και επομένως τίθεται περιορισμός στο μήκος της υπόγειας ή υποθαλάσσιας διασύνδεσης με συστήματα AC. Η χρήση πηνίων αντιστάθμισης μπορεί

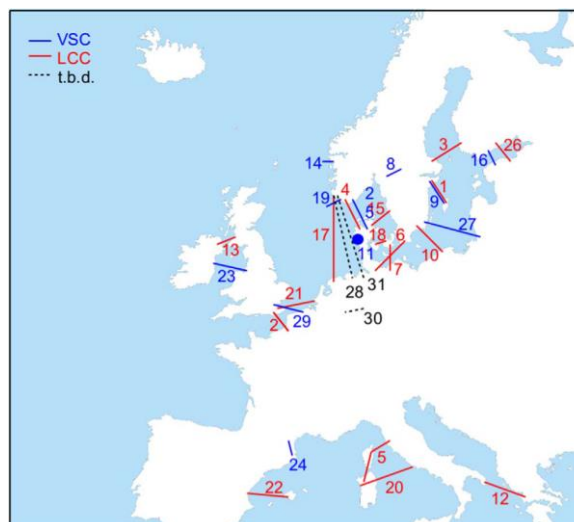
να οδηγήσει σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταφοράς, ωστόσο, δεν θεωρείται τεχνοοικονομικά συμφέρουσα επιλογή για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 km. [6]

Αντίθετα, στην περίπτωση της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με DC, η χωρητικότητα του καλωδίου φορτίζεται μόνο όταν εμφανίζεται μεταβολή της τάσης, οπότε δεν απαιτείται χωρητικό ρεύμα φόρτισης στη μόνιμη κατάσταση [16]. Θεωρητικά, δεν υπάρχει περιορισμός στην απόσταση μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω καλωδίων υπό HVDC [6].

Στο Σχήμα 7.27 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που εμφανίζει μια υπόγεια HVDC γραμμή 30 kV έναντι διάφορων HVAC γραμμών συναρτήσει της απόστασης. Για το λόγο αυτό τα HVDC συστήματα αποτελούν μια πολύ ελκυστική λύση και πολλές φορές τη μοναδική εφικτή για τη σύνδεση νησιών ή υπεράκτιων αιολικών πάρκων (Σχήμα 7.28).



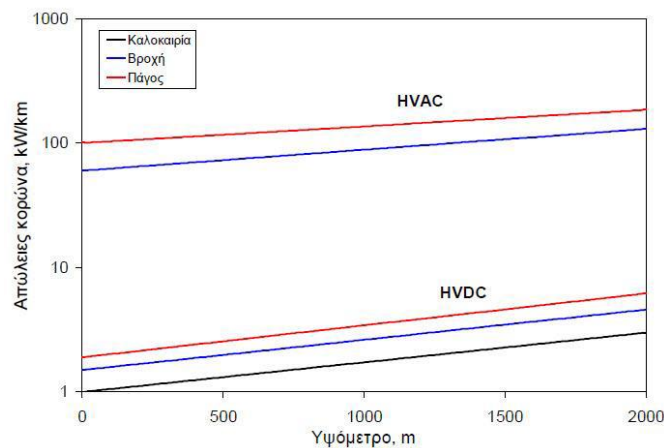
Σχήμα 7.27: Ικανότητα μεταφοράς γραμμών σε συνάρτηση με την απόσταση [16]



Σχήμα 7.28: Οι HVDC διασυνδέσεις στην Ευρώπη [20].

7.6.5 Απώλειες κορώνα

Και στα δύο συστήματα μεταφοράς η ονομαστική φόρτιση καθορίζει τις διατομές των αγωγών της γραμμής μεταφοράς ενώ οι απώλειες κορώνα καθορίζουν τη σχεδίαση της δέσμης των αγωγών μεταφοράς. Σε συνθήκες καλοκαιρίας οι απώλειες κορώνα είναι συγκρίσιμες στα δύο συστήματα, της τάξης των μερικών kW/km, και αυξάνουν με το υψόμετρο της θέσης εγκατάστασης. Όμως σε συνθήκες βροχής ή πάγου ενώ οι DC απώλειες κορώνα αυξάνουν ελάχιστα οι AC απώλειες κορώνα μπορεί να αυξηθούν 10-100 φορές φθάνοντας σε τιμές εκατοντάδων kW/km [6]. Στο Σχήμα 7.29 παρουσιάζεται η επίδραση του υψομέτρου στις απώλειες κορώνα σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες για συστήματα HVAC 800 kV και HVDC 600 kV.



Σχήμα 7.29: Απώλειες κορώνα σε συνάρτηση με το υψόμετρο και τις καιρικές συνθήκες [6].

7.6.6 Επιδερμικό φαινόμενο

Κατά την AC λειτουργία εμφανίζεται η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου. Σύμφωνα με αυτό, όταν σε έναν αγωγό ρέει AC ρεύμα, αυτό τείνει να συγκεντρώνεται περισσότερο στην επιφάνεια του αγωγού και όχι στο κέντρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες στον αγωγό, οι οποίες εκφράζονται ως αυξημένη τιμή αντίστασης στο AC σε σχέση με την αντίστοιχη στο DC. Σε περίπτωση όμως HVDC συστημάτων, η πυκνότητα του ρεύματος είναι ομοιόμορφη στην επιφάνεια των αγωγών και έτσι δεν παρατηρείται το επιδερμικό φαινόμενο, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μικρότερη DC αντίσταση και άρα μειωμένες απώλειες [16].

7.6.7 Έλεγχος ροής ενέργειας

Η HVDC μεταφορά εξασφαλίζει εύκολο και ταχύτατο έλεγχο στη ροή ενέργειας, ακόμη και αντιστροφή στην κατεύθυνση της ροής, μέσω των συστημάτων ελέγχου των μετατροπών. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται HVDC διασυνδέσεις παράλληλα με υφιστάμενες HVAC, με σκοπό να βελτιώσει τη συμπεριφορά και την ευστάθεια του συστήματος [6].

7.6.8 Επίδραση στην ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου

Η σύνδεση νέων δικτύων σε υφιστάμενα αυξάνει την ισχύ βραχυκύκλωσης του συστήματος με συνέπεια πολλές φορές να απαιτείται αντικατάσταση του εξοπλισμού, διακοπών ισχύος, ζυγών, μέσων προστασίας, με άλλο μεγαλύτερου ρεύματος βραχυκύκλωσης [6]. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση HVDC διασυνδέσεων, στις οποίες δεν παρατηρείται συνεισφορά των μετατροπών στο AC ρεύμα βραχυκύκλωσης, εκτός από το ονομαστικό τους ρεύμα. [16]

7.6.9 Διακοπτικά στοιχεία

Λόγω της έλλειψης φυσικού μηδενισμού του ρεύματος στη DC πλευρά ενός HVDC συστήματος, η διακοπή του κυκλώματος είναι σχετικά δύσκολη. Η μόνωση των DC διακοπών πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αντέξει τις υψηλές τιμές του DC ρεύματος, τόσο σε κατάσταση ονομαστικής λειτουργίας, ιδιαίτερα όμως σε συνθήκες σφάλματος. Επομένως, η κατασκευή τέτοιου εξοπλισμού είναι αρκετά πιο δύσκολη και παρουσιάζει μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τους κλασσικούς διακόπτες εναλλασσόμενης τάσης.

7.6.10 Αρμονικές τάσης και ρεύματος

Σε αντίθεση με τα HVAC συστήματα, όπου η παραγωγή αρμονικών είναι αρκετά περιορισμένη, τα HVDC συστήματα προκαλούν αρμονικές τόσο στην AC όσο και στην DC πλευρά. Οι απώλειες λόγω των αρμονικών, η χρήση φίλτρων στην AC πλευρά και αυτεπαγωγών εξομάλυνσης στη DC πλευρά για την εξάλειψή τους, προκαλούν μια περαιτέρω αύξηση του κόστους λειτουργίας και κατασκευής ενός συστήματος HVDC [16].

7.7 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος στα HVDC συστήματα

Στα σύγχρονα συστήματα μεταφοράς ισχύος HVDC χρησιμοποιούνται δύο βασικές τεχνολογίες μετατροπών:

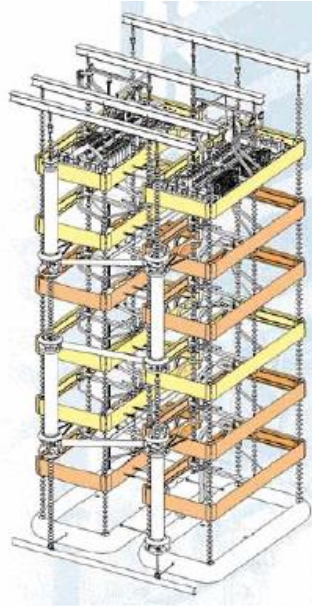
- Μετατροπέας πηγής ρεύματος (Current Source Converter – CSC). Πρόκειται για την παραδοσιακή τεχνολογία μετατροπέα με θυρίστορ, οπότε προκύπτει η τεχνολογία μεταφοράς με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης που βασίζεται σε μετατροπείς πηγής ρεύματος (CSC–HVDC). Η τεχνολογία CSC–HVDC είναι μια ώριμη τεχνολογία με αρκετές εγκαταστάσεις ανά την υφήλιο. Η τεχνολογία CSC–HVDC εξακολουθεί να είναι η πλέον οικονομικά αποδοτική λύση για μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις
- Μετατροπέας πηγής τάσης (Voltage Source Converter – VSC). Πρόκειται για νέα τεχνολογία μετατροπέα που χρησιμοποιεί κυρίως διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT), οπότε προκύπτει η τεχνολογία μεταφοράς με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης που βασίζεται σε μετατροπείς πηγής τάσης (VSC–HVDC).

7.7.1 HVDC με μετατροπείς πηγής ρεύματος

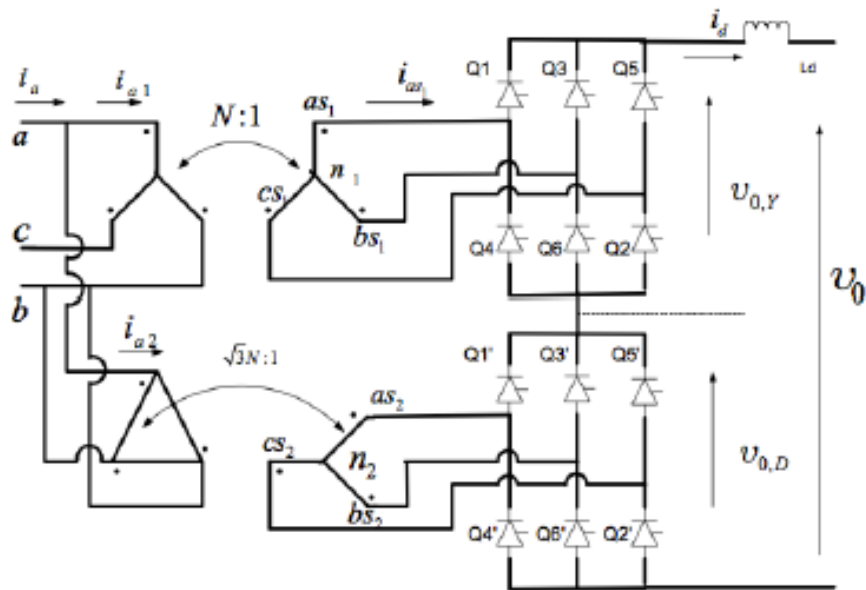
Τα συμβατικά συστήματα μεταφοράς με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής ρεύματος με θυρίστορ (CSC–HVDC). Το βασικό δομικό στοιχείο του μετατροπέα αυτού είναι μία τριφασική γέφυρα ανόρθωσης πλήρους κύματος, η οποία ονομάζεται επίσης γέφυρα έξι παλμών ή γέφυρα Graetz. Ο όρος της γέφυρας έξι παλμών οφείλεται στο γεγονός ότι για κάθε περίοδο της τάσης εισόδου, η τάση εξόδου έχει έξι παλμούς [16].

Κάθε γέφυρα έξι παλμών αποτελείται από έξι ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία ή βαλβίδες από θυρίστορ. Το θυρίστορ είναι ένας ελεγχόμενος ημιαγωγικός διακόπτης, ο οποίος μπορεί να αντέξει σε αρκετά υψηλά ρεύματα (4 kA) και είναι ικανός να διακόψει πολύ υψηλές τάσεις (μέχρι 10kV). Συνδέοντας πολλά θυρίστορ σε σειρά είναι δυνατόν να χτίσουμε μία βαλβίδα (valve) θυρίστορ (Σχήμα 7.30), η οποία μπορεί να λειτουργεί σε αρκετά υψηλές τάσεις (μερικές εκατοντάδες kV) [16], [17].

Ωστόσο, τα σύγχρονα συστήματα CSC–HVDC χρησιμοποιούν γέφυρα δώδεκα παλμών, προκειμένου να μειώσουν τις ανάγκες για φιλτράρισμα των αρμονικών (κυρίως 5^{ης} και 7^{ης}) που απαιτούνται με τη γέφυρα έξι παλμών. Πιο συγκεκριμένα η γέφυρα 12 παλμών αποτελείται από δύο γέφυρες 6 παλμών συνδεδεμένες σε σειρά στην DC πλευρά ενώ η κάθε γέφυρα τροφοδοτείται από το δίκτυο AC μέσω ειδικού μετασχηματιστή (μετασχηματιστής μετατροπέα). Το δευτερεύον του μετασχηματιστή στη μία γέφυρα είναι συνδεδεμένο σε αστέρα ενώ στην άλλη σε τρίγωνο (Σχήμα 7.31). [17].



Σχήμα 7.30: Διάταξη μιας βαλβίδας θυρίστορ 500kV [21]



Σχήμα 7.31: Γέφυρα 12 παλμών με θυρίστορ [17]

Η μονάδα των θυρίστορ λειτουργεί υπό την συχνότητα του δικτύου (50Hz ή 60Hz) και είναι δυνατός ο έλεγχος του επιπέδου της παραγόμενης DC τάσης, μέσω του ελέγχου της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Αυτός είναι και ο βασικός τρόπος με τον οποίο ελέγχεται η ροή της μεταφερόμενης ισχύος γρήγορα και αποτελεσματικά. [16]

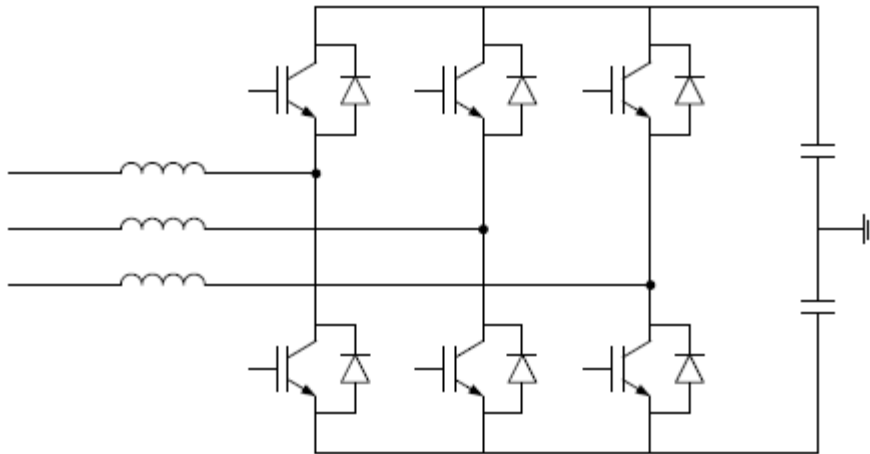
Για τη λειτουργία των μετατροπέων CSC είναι απαραίτητο η AC τάση να προηγείται του AC ρεύματος. Αυτό σημαίνει, ότι η διαδικασία της μετατροπής απαιτεί

την κατανάλωση άεργου ισχύος [16]. Η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται στο σύστημα μέσω των AC φίλτρων ή μέσω πυκνωτών αντιστάθμισης [16].

7.7.2 HVDC με μετατροπείς πηγής τάσης

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία VSC-HVDC η οποία βασίζεται σε μετατροπείς πηγής τάσης (VSC-Voltage Source Converter). Η τεχνολογία HVDC με VSC γνωστή και ως “HVDC Light” εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του '90. Λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των VSCs καθώς και των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση τους, τείνει να αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα συμβατικά CSC-HVDC συστήματα [17]. Στους VSCs γίνεται χρήση ελεγχόμενων ημιαγωγικών διακοπών, όπως των IGBTs. Αυτό συνιστά και τη βασική διαφορά ανάμεσα στους VSCs και τους συμβατικούς μετατροπείς που χρησιμοποιούν θυρίστορ, αφού στην περίπτωση των VSCs μπορεί να γίνει όχι μόνο έναυση αλλά και σβέση των IGBTs με χρήση σημάτων στην πύλη τους κατά τη διάρκεια που αυτά διαρρέονται από ρεύμα. Έτσι, λοιπόν, δεν παρουσιάζεται ανάγκη ύπαρξης ενεργή τάση μεταγωγής από το συνδεδεμένο AC δίκτυο [16].

Η διάταξη που χρησιμοποιείται στα HVDC συστήματα αποτελείται από μια 6-παλμική γέφυρα που περιλαμβάνει 6 διακόπτες και 6 αντιπαράλληλες διόδους (Σχήμα 7.32). Ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να δημιουργήσει δύο επίπεδα τάσης (+0,5V,-0,5V) [17]. Τα IGBTs όταν πολώνονται ορθά μπορούν να άγουν προς μία μόνο κατεύθυνση, αλλά η χρήση μίας διόδου συνδεδεμένης αντιπαράλληλα με το IGBT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.32, προσφέρει τη δυνατότητα στον μετατροπέα να άγει ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Επίσης, τα IGBTs έχουν μεγάλη σύνθετη αντίσταση πύλης και γι' αυτό απαιτείται μικρή ποσότητα ενέργειας για τη μετάβασή τους. Επιπλέον, οι διακόπτες λειτουργούν σε μία μέση συχνότητα περίπου 1kHz και ανοιγοκλείνουν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κατώτερες αρμονικές να απαλείφονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να απαιτούνται φίλτρα μόνο για την απαλοιφή αρμονικών υψηλότερων συχνοτήτων. Η λειτουργία του μετατροπέα επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) [16]. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας το ρεύμα ρέει μέσω των IGBT ενώ όταν λειτουργεί ως ανορθωτής το ρεύμα ρέει μέσω των διόδων.

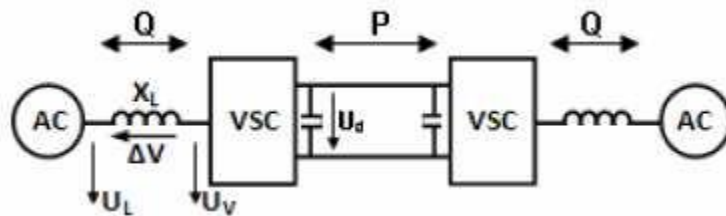


Σχήμα 7.32: Γέφυρα 6 παλμών με IGBT και αντιπαράλληλες διόδους [17]

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των μετατροπέων VSCs, θεωρείται κάθε τερματικός σταθμός της διασύνδεσης ως μία πηγή τάσης συνδεδεμένη στο AC δίκτυο μεταφοράς, μέσω μίας τριφασικής αντίδρασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.33. Οι δύο τερματικοί σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας HVDC διασύνδεσης [16]. Η τάση αναφοράς U_v , την οποία παίρνουμε ως την τάση στο μετασχηματιστή του μετατροπέα προς τη μεριά των IGBTs, είναι ανάλογη της DC τάσης, όπως εκφράζεται και από την (7.11) [16]

$$U_v = k_u U_d \tag{7.11}$$

Ο συντελεστής k_u μπορεί να ελεγχθεί μέσω της PWM διαμόρφωσης. Αμελώντας την αντίσταση του μετασχηματιστή, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για την ενεργό και την άεργο ισχύ: [16]



Σχήμα 7.33: Κυκλωματικό ισοδύναμο γραμμής HVDC με VSC [16]

$$P = U_d I_d = \frac{U_L U_v}{X_L} \sin \delta \tag{7.12}$$

$$Q = \frac{U_L(U_L - U_V \cos \delta)}{X_L} \quad (7.13)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς θεωρούνται θετικές όταν η ροή ισχύος είναι από το AC δίκτυο προς τον μετατροπέα. Επιπλέον, η γωνία δ θεωρείται θετική στην περίπτωση που η τάση εξόδου του μετατροπέα έπεται της AC τάσης του δικτύου [16].

Η (7.12) δείχνει ότι η ενεργός ισχύς είναι ανάλογη του DC ρεύματος και της DC τάσης. Επίσης, καθορίζεται κυρίως από την μεταβολή της γωνίας δ . Θετική γωνία δ συνεπάγεται ότι η ενεργός ισχύς ρέει από το AC δίκτυο προς τον μετατροπέα. Παρόλα αυτά, η άεργος ισχύς καθορίζεται κυρίως από τη διαφορά μεταξύ του εύρους της τάσης του AC ζυγού τάσης και της τάσης εξόδου του μετατροπέα, σύμφωνα με την (7.13). Η άεργος ισχύς τροφοδοτείται από την τάση με το υψηλότερο δυναμικό προς την τάση με το χαμηλότερο δυναμικό [16].

7.7.3 Σύγκριση CSC-VSC

- Όσον αφορά τη ρύθμιση της ροής ισχύος, μέσω του VSC δημιουργείται η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και της άεργου ισχύος. Αυτό γίνεται εφικτό λόγω της δυνατότητας ελέγχου της έναυσης και της σβέσης των διακοπτικών στοιχείων, που χρησιμοποιούνται στους VSC, σε συνδυασμό με την διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM). Αντιθέτως, στους CSC η ροή της ενεργού και της άεργου ισχύος είναι δύο αλληλένδετα μεγέθη τα οποία ελέγχονται από την γωνία έναυσης των θυρίστορ (ή την γωνία σβέσης) και από την rms τιμή της πολικής τάσης στην είσοδο του μετατροπέα [17].
- Άλλο ένα βασικό χαρακτηριστικό των VSC είναι η δυνατότητα ρύθμισης της άεργου ισχύος. Οι CSC, συνεχώς λειτουργούν με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Επομένως, υπάρχει η ανάγκη για αντιστάθμιση. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης φίλτρων με μεταβλητό χωρητικό στοιχείο [17].
- Στα συστήματα που χρησιμοποιούν CSC ο έλεγχος των θυρίστορ της διάταξης έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται στη έξοδο του μετατροπέα. Η ιδιότητα αυτή καθιστά αναγκαία την παρουσία ενός άπειρου ζυγού. Στα συστήματα VSC ο έλεγχος των διακοπτικών στοιχείων υλοποιείται μέσω της σύγκρισης δύο σημάτων, τα οποία δεν συνδέονται με την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου που είναι συνδεδεμένη η διάταξη. Συνεπώς, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει χωρίς την παρουσία άπειρου ζυγού. [17]

- Στα συστήματα VSC οι αρμονικές της τάσης εμφανίζονται σε υψηλές συχνότητες αφού εξαρτώνται από τη διακοπτική συχνότητα των IGBT. Αντίθετα, στα συστήματα CSC εμφανίζονται αρμονικές ρεύματος με συχνότητα $5 \cdot f$ και άνω. Συνεπώς, στη δεύτερη περίπτωση πρέπει να καταφύγουμε σε τεχνικές μείωσης των αρμονικών. Για την ελάττωση των αρμονικών σε ένα σύστημα VSC αρκεί η χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου [17].
- Σε ένα σύστημα CSC τα ρεύματα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στη DC πλευρά ελαττώνονται λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής που παρουσιάζει η διάταξη. Αντίθετα, σε ένα σύστημα VSC το ρεύμα σφάλματος περιορίζεται μόνο από την αυτεπαγωγή της γραμμής και τον μετασχηματιστή. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η χρήση διακόπτη ισχύος (circuit breaker) [17].

8 Βιβλιογραφία

- [1] 'Fundref', <http://www.crossref.org/fundref/>, 4 December 2014.
- [2] Α. Σαφιογιάννη, Σημειώσεις Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ξάνθη, 2007.
- [3] G. Anderson, Modelling and Analysis of Electric Power Systems, Zurich: ETH, 2008.
- [4] Κ. Βούρνας and Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Αθήνα: Συμμετρία, 2010.
- [5] A. Alassia, . S. Bañalesa, O. Ellabana, G. Adamb and C. Maclverb, "HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [6] Π. Μικρόπουλος, HVDC ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, Θεσσαλονίκη, 2005.
- [7] P. Fairley, "IEEE Spectrum - China's State Grid Corp Crushes Power Transmission Records," 10 Ιανουάριος 2019. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/the-smarter-grid/chinas-state-grid-corp-crushes-power-transmission-records>. [Accessed Μάιος 2021].
- [8] A. Nishioka, F. Alvarez and T. Omori, "Global Rise of HVDC and Its Background".*GLOBAL INNOVATION REPORT*.
- [9] A. Giorgi, R. Rendina, G. Georgantzis, C. Marchiori, G. Paziienza, S. Corsi, C. Pincella, M. Pozzi, G. Danielsson, H. Jonasson, A. Orini and R. Grampa, "THE ITALY-GREECE HVDC LINK," *CIGRE*, 2002.
- [10] "ΑΔΜΗΕ: Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής," [Online]. Available: <https://www.admie.gr/>.
- [11] "Αριάδνη Interconnection," [Online]. Available: <https://www.ariadne-interconnection.gr/>.
- [12] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, 2015.
- [13] R. Rudervall, J. Charpentier and R. Sharma, "High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper," in *Energy Week 2000*, Washington, D.C, USA, 2000.

- [14] M. Bahrman and B. Johnson, "The ABCs of HVDC Transmission Technology," *IEEE power & energy magazine*, 2007.
- [15] ABB, "HVDC Special Report 60 years of," [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/aff841e25d8986b5c1257d380045703f/140818%20ABB%20SR%2060%20years%20of%20HVDC_72dpi.pdf.
- [16] Α. Πανώρη, "HVDC Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας," Θεσσαλονίκη, 2010.
- [17] Λ. Μπελελής and Έ. Κατσή, "Έλεγχος HVDC διασύνδεσης με μετατροπείς πηγής τάσης," Θεσσαλονίκη, 2013.
- [18] E. Csanyi, "Electrical Engineering Portal," [Online]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/hvdc-converter-station-single-line-diagram>.
- [19] L. Papangelis, Local and centralized control of multi-terminal DC grids for secure operation of combined AC/DC systems, Liege, Belgium: Universite de Liege, 2018.
- [20] E. Pierria, O. Bindera, N. Hemdana and M. Kurrata, "Challenges and opportunities for a European HVDC grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- [21] General Electric, "Systems High Voltage Direct Current," 2016. [Online]. Available: GEGridSolutions.com/HVDC.