

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ**

I. Το πρόβλημα

Η κακή ποιότητα τάσης-ρεύματος νομοτελειακά συναντάται σε όλες τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις του κόσμου, καθώς παντού υπάρχουν:

1) **ηλεκτρονικά ισχύος** (inverter, dc converter, soft starter) για τον έλεγχο και την ομαλή εκκίνηση κινητήρων, τα οποία όμως «ρυπαίνουν» την ηλεκτρική εγκατάσταση με αρμονικές.

2) **ασυμφωνίες μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων και των μηχανικών φορτίων** που καλούνται να εξυπηρετήσουν. Δηλαδή, λόγω θεμάτων τυποποίησης, αναγκών εκκίνησης του κινητήρα, μεταβολών του φορτίου από μεγάλες τιμές σε πολύ χαμηλές, οι κινητήρες στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι ονομαστικής μηχανικής ισχύος πολύ μεγαλύτερης του φορτίου που εξυπηρετούν. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε χαμηλό βαθμό απόδοσης και πρόσθετα ρεύματα τροφοδοσίας, τα οποία με τη σειρά τους μειώνουν την ποιότητα τάσης-ρεύματος καθώς δεν παράγουν κανένα ωφέλιμο έργο.

3) **επαγωγικά φορτία (κινητήρες)** που πρέπει να τροφοδοτηθούν με άεργα ρεύματα, για να παραχθούν τα αναγκαία για τη λειτουργία τους Ηλεκτρομαγνητικά (H/M) πεδία.

Η κακή ποιότητα τάσης ρεύματος οδηγεί σε [1], [2], [3]:

- i) αυξημένες απώλειες του H/M πεδίου στην εγκατάσταση
- ii) μειωμένους βαθμούς απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων και των Μετασχηματιστών Ισχύος
- iii) πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας
- iv) αύξηση της μέγιστης ζήτησης ισχύος
- v) μειωμένη δυνατότητα χρήσης της ηλεκτρικής εγκατάστασης

vi) πρόωρη φθορά του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και δραστική αύξηση του κόστους συντήρησης.

Στην συνέχεια εξετάζονται αναλυτικότερα με τη σειρά οι αιτίες που δημιουργούν κακή ποιότητα τάσης και ρεύματος.

Η πρώτη αιτία είναι οι αρμονικές ρεύματος και τάσης, που δημιουργούνται τόσο λόγω της ύπαρξης ηλεκτρονικών ισχύος, όπως ήδη αναφέρθηκε, όσο και λόγω ύπαρξης πυκνωτών μέσα στην ηλεκτρική εγκατάσταση, οι οποίοι δεν είναι κατάλληλα διαστασιολογημένοι και συντονισμένοι μεταξύ τους αλλά και με τα υπόλοιπα στοιχεία της εγκατάστασης. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η δημιουργία υπεραντισταθμίσεων και αρμονικών ρεύματων - τάσης.

Οι αρμονικές, μειώνοντας την ποιότητα τάσης-ρεύματος, αυξάνουν ιδιαίτερα τις απώλειες του Η/Μ πεδίου καθώς οδηγούν

i) σε αύξηση του επιδερμικού φαινομένου, δηλαδή το ρεύμα δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την ωφέλιμη διατομή του καλωδίου αλλά μόνο ένα μικρό μέρος, με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση των απωλειών.

ii) σε αύξηση των δινορευμάτων που επάγονται σε γειτονικές μεταλλικές κατασκευές, με αποτέλεσμα πρόσθετες απώλειες.

iii) σε αύξηση των φαινομένων γεινίασης μεταξύ των καλωδίων τροφοδοσίας, καθώς παρουσία αρμονικών σημαίνει πολύ μεγαλύτερα ρεύματα άρα και επαγωγές μεγαλύτερων αντίθετων τάσεων στα γειτονικά καλώδια και δραστική αύξηση των απωλειών.

Επιπλέον οι αρμονικές προκαλούν:

1. Εμφάνιση ροπής πέδησης, δηλαδή ροπής που λειτουργεί σαν φρένο, σε κινητήρες οπουδήποτε μέσα στην ηλεκτρική εγκατάσταση, με συνέπεια τη δραματική μείωση του βαθμού απόδοσης.

2. Αύξηση του ρεύματος ουδετέρου κάτι ιδιαίτερα επικίνδυνο, καθώς αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της προστασίας του συστήματος γειώσεων (λόγω εφαρμογής ουδετερογείωσης).
3. Υπερφόρτιση των Μ/Σ ισχύος του υποσταθμού και σημαντική αύξηση των απωλειών τους με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Αυτό συμβαίνει καθώς οι Μ/Σ ισχύος είναι φτιαγμένοι να λειτουργούν με μαγνητικές ροές στο σιδηρομαγνητικό τους κύκλωμα που δημιουργούνται από ρεύματα στα 50Hz και όχι από αρμονικές ρεύματος στα 150, 250, 350 Hz. Επιπλέον, οι αρμονικές ρεύματος δημιουργούν πρόσθετες απώλειες Cu στα τυλίγματα των Μ/Σ ισχύος.
4. Αδικαιολόγητη ενεργοποίηση θερμικών ή θερμομαγνητικών διακοπών, με αποτέλεσμα το σταμάτημα της λειτουργίας σημαντικών φορτίων, γραμμών παραγωγής και την πρόκληση μεγάλης οικονομικής ζημιάς. Οι αδικαιολόγητες αυτές ενεργοποιήσεις προέρχονται από το γεγονός ότι, ενώ το κανονικό ρεύμα τροφοδοσίας ενός φορτίου είναι π.χ. 100A, οι αρμονικές ρεύματος προστίθενται σε αυτό, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένα ρεύμα 170A, 200A ή υψηλότερο.
5. Καταστροφή ηλεκτρονικών των PLC και άλλων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου της εγκατάστασης, με αποτέλεσμα και πάλι την παρακώλυση της παραγωγικής διαδικασίας και την πρόκληση οικονομικής ζημιάς.

Εκτός από τις αρμονικές, **στην αύξηση των απωλειών του H/M πεδίου και στην σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης των κινητήρων συμβάλει η ασυμφωνία μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων και των μηχανικών φορτίων τους.** Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ασυμφωνία αυτή είναι επιβεβλημένη για διάφορους τεχνικούς λόγους και συναντάται σε όλες τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις του κόσμου. Καθώς το μηχανικό φορτίο είναι μικρότερο από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα, η επιπλέον ισχύς και ενέργεια που καταναλώνει ο κινητήρας δεν μετατρέπεται σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ αλλά σε απώλειες Cu και Fe πάνω στα τυλίγματα και στο σιδηρομαγνητικό κύκλωμα του κινητήρα. Ταυτόχρονα, η επιπλέον ισχύς έχει

ως συνέπειες την ύπαρξη ενός μεγαλύτερου ρεύματος (από όσο είναι αναγκαίο) τροφοδοσίας, την πρόκληση πτώσεων τάσης και την αύξηση των απωλειών του Η/Μ πεδίου.

Τέλος, τα άεργα ρεύματα, τα οποία διατρέχουν τα σπλάχνα κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης (ακόμα και αν υπάρχει κεντρική αντιστάθμιση με $\cos\phi=1$, κάτι που ωφελεί κυρίως τη ΔΕΗ), είναι η 3η αιτία για την αύξηση των απωλειών του Η/Μ πεδίου και την μείωση του βαθμού απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων.

II. Η λύση

Η τεχνογνωσία χαρακτηρίζει την λειτουργία και τις δραστηριότητες της SEMAN A.E. σε όλα τα επίπεδα. Κάθε έργο που αναλαμβάνει η SEMAN A.E. τυγχάνει ιδιαίτερου, κάθε φορά, σχεδιασμού, ακολουθώντας όμως πάντα τα εξής βήματα:

α) Καταγραφή δεδομένων και μετρήσεις της ηλεκτρικής εγκατάστασης

Αρχικά γίνονται οι **καταγραφές** των ονομαστικών δεδομένων και οι **μετρήσεις** της πραγματικής κατάστασης λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Τις εργασίες αυτές αναλαμβάνει το επιστημονικό επιτελείο της εταιρείας, το οποίο διαθέτει την αναγκαία τεχνογνωσία αλλά και κατάλληλες συσκευές μέτρησης, τελευταίας γενιάς, των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών, του φάσματος αρμονικών ρεύματος-τάσης μέχρι την 35η και των μεταβατικών φαινομένων.

Οι καταγραφές των ονομαστικών δεδομένων και στοιχείων αφορούν τους Μ/Σ ισχύος των υποσταθμών, τους Γενικούς Πίνακες μέσης και χαμηλής τάσης, την συνολική ανάπτυξη της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης (σχεδίαση μονογραμμικού σχεδίου) με μήκη και διατομές καλωδίων, θέσεις υποπινάκων τροφοδοσίας, τα ονομαστικά στοιχεία κινητήρων, Inverter, Soft Starter, τον

εντοπισμό του πλήθους καλωδίων που οδεύουν μαζί σε σχάρες και την γειτνίασή τους με μεταλλικές κατασκευές.

Οι μετρήσεις της πραγματικής κατάστασης λειτουργίας αφορούν τους Μ/Σ ισχύος, τους Γενικούς Πίνακες μέσης και χαμηλής τάσης, διάφορους υποπίνακες τροφοδοσίας, Inverter, Soft Starter, άλλα ηλεκτρονικά ισχύος που πιθανόν είναι εγκατεστημένα και τους κινητήρες, όπου κρίνεται αναγκαίο βάσει της τεχνογνωσίας. Οι μετρήσεις γίνονται άμεσα ή σε βάθος χρόνου οπότε τα δεδομένα καταγράφονται σε φορητούς Η/Υ που συνδέονται με τις συσκευές μέτρησης. Σε διάφορα επίμαχα σημεία της εγκατάστασης, όπου εμφανίζονται επικίνδυνοι συντονισμοί, γίνονται μετρήσεις των μεταβατικών φαινομένων με τους υψηλής τεχνολογίας φορητούς παλμογράφους της εταιρίας. Οι παλμογράφοι αυτοί δίνουν την δυνατότητα μετρήσεων ακόμα και στη μέση τάση.

Η παραπάνω διαδικασία είναι απολύτως απαραίτητη, αφού οδηγεί στον εντοπισμό των ιδιαίτερων προβλημάτων της υπό εξέταση ηλεκτρικής εγκατάστασης.

β) Εκπόνηση επιστημονικής μελέτης

Με βάση τα δεδομένα των καταγραφών και των μετρήσεων, τα οποία δίνουν μια ολοκληρωμένη εικόνα θεωρητικής ανάπτυξης και πραγματικής λειτουργίας της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης **εκπονείται η επιστημονική μελέτη.**

Αρχικά γίνεται μοντελοποίηση και προσομοίωση της λειτουργίας της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης βάση της τεχνογνωσίας και των θεωρητικών μοντέλων προσομοίωσης της SEMAN A.E., χρησιμοποιώντας τα στοιχεία και τις μετρήσεις που έχουν καταγραφεί. **Τα θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται έχουν σχεδιαστεί από τους επιστήμονες της SEMAN A.E.** και βασίζονται στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και σε μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης. **Οι επιστήμονες της SEMAN A.E. έχουν δημοσιεύσει πληθώρα εργασιών πάνω σε αυτά τα μοντέλα, στα πιο έγκριτα διεθνή επιστημονικά περιοδικά.** Λεπτομέρειες για το θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού των απωλειών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που

βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αναφέρονται στη συνέχεια.

Με τη βοήθεια των αρχικών προσομοιώσεων εντοπίζονται όλα τα προβληματικά σημεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης όπως για παράδειγμα, συντονισμοί που δημιουργούν εμφάνιση αρμονικών, χαμηλοί βαθμοί απόδοσης των ηλεκτρικών κινητήρων, υπεραντισταθμίσεις που οδηγούν τελικά σε χωρητικά cosφ και ακόμη μεγαλύτερο πολλαπλασιασμό των αρμονικών κ.ο.κ. Στη συνέχεια συνθέτονται, βάσει της τεχνογνωσίας της SEMAN A.E., διάφορες λύσεις, που αφορούν ενεργητικά και παθητικά φίλτρα απόσβεσης αρμονικών, ηλεκτρονικά ισχύος για τη προσαρμογή της τάσης τροφοδοσίας ανάλογα με το φορτίο, αντισταθμιστές αέργου ισχύος πάνω στα τυλίγματα των κινητήρων, συνδυασμοί των παραπάνω και ακολουθούν νέες προσομοιώσεις.

Κάθε νέα προσομοίωση βελτιώνει τα αποτελέσματα της προηγούμενης μέσα σε ένα επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος ολοκληρώνεται όταν το κριτήριο της βελτιστοποίησης της ποιότητας τάσης και ρεύματος και της μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης των κινητήρων επιτευχθεί.

Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη για να βρεθεί η βέλτιστη λύση για το υπό εξέταση έργο εξοικονόμησης, καθώς σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση τα πάντα βρίσκονται υπό διαρκή αλληλεπίδραση. Δηλαδή, σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση μια παρέμβαση εξοικονόμησης μπορεί να λύνει ένα πρόβλημα αλλά να δημιουργεί σε άλλα σημεία, μέσω συντονισμών – πολλαπλασιασμού αρμονικών, πολλά άλλα. Λόγω ακριβώς των παραπάνω, θεωρούμε ότι κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση είναι μοναδική και χρήζει διαφορετικής αντιμετώπισης.

Η διαδικασία του επαναληπτικού αλγορίθμου με τις προσομοιώσεις που γίνονται βάση της τεχνογνωσίας της SEMAN A.E. οδηγεί τελικά στην σύνθεση της βέλτιστης λύσης, όπου όλες οι παρεμβάσεις βρίσκονται σε απόλυτη συνεργασία μεταξύ τους με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της

ποιότητας τάσης-ρεύματος, μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των κινητήρων και μέγιστη εξοικονόμηση.

γ) Σχεδιασμός παρεμβάσεων

Όταν ολοκληρωθεί η επιστημονική μελέτη και βρεθεί η βέλτιστη λύση παρεμβάσεων για τη συγκεκριμένη ηλεκτρική εγκατάσταση, γίνεται ο **τελικός σχεδιασμός των παρεμβάσεων** από το επιστημονικό επιτελείο της SEMAN A.E..

Ο σχεδιασμός αυτός αφορά τη σύνθεση πρωτότυπων συστημάτων, βάσει της τεχνογνωσίας της SEMAN A.E., χρησιμοποιώντας υλικά και συστήματα αναγνωρισμένων διεθνών οίκων, ανάλογα με την ιδιαιτερότητα της υπό εξέταση ηλεκτρικής εγκατάστασης, για την πρακτική εφαρμογή της τεχνογνωσίας.

δ) Εφαρμογή παρεμβάσεων

Στη συνέχεια το επιστημονικό επιτελείο της SEMAN A.E. εγκαθιστά όλες τις απαραίτητες παρεμβάσεις στην ηλεκτρική εγκατάσταση, **χωρίς να ενοχλήσει και να παρακωλύσει την λειτουργία και την παραγωγική διαδικασία του εργοστασίου**. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη κατάλληλη τεχνογνωσία που έχει αναπτύξει η SEMAN A.E. για το σκοπό αυτό.

Τελικά στον πελάτη παραδίδεται η ολοκληρωμένη λύση εξοικονόμησης.

Ακολουθεί η ανάλυση του μοντέλου υπολογισμών απωλειών του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου που χρησιμοποιείται για τις θεωρητικές προσομοιώσεις της επιστημονικής μελέτης.

III. Μοντέλο Υπολογισμού Απωλειών του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου

α. Ωμική Αντίσταση

Έστω ένας αγωγός διατομής S από υλικό με ειδική αντίσταση ρ . Αν ο αγωγός έχει μήκος l τότε η ωμική του αντίσταση στο συνεχές ρεύμα είναι:

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{Σχέση 1})$$

Αν όμως, στον αγωγό εφαρμοσθεί εναλλασσόμενη τάση, τότε παρουσιάζεται μία αύξηση στην αντίστασή του που οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο (skin effect). Το ρεύμα δεν ρέει πλέον ομοιόμορφα μέσα από όλη τη διατομή του αγωγού, αλλά παρουσιάζεται μία μείωση της ρευματικής πυκνότητας στο μέσο αυτού. Το ρεύμα ρέει για αυξανόμενες συχνότητες όλο και πιο πολύ στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, κάτι που οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της ωμικής αντίστασης. Ειδικότερα, στην περίπτωση ύπαρξης αρμονικών, το επιδερμικό φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο έντονο.

Για αγωγό κυκλικής διατομής αποδεικνύεται [4] ότι η αντίσταση στο εναλλασσόμενο ρεύμα είναι:

$$R_{ac} = l \frac{k\rho}{2\pi\alpha} \frac{M_o(ka)}{M_1(ka)} \sin \left[\theta_1(k\alpha) - \theta_o(ka) - \frac{\pi}{4} \right] \quad (\text{Σχέση 2})$$

όπου:

- $k^2 = 2\pi f \mu \sigma$, f η συχνότητα, μ η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού και σ η ειδική αγωγιμότητά του
- ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού

- α η ακτίνα του αγωγού
- M_0, θ_0 το μέτρο και η φάση της συνάρτησης Bessel πρώτου είδους, μηδενικής τάξης J_0 έτσι ώστε : $J_0(x)^{0,5} = M_0(x) e^{j\theta_0(x)}$
- M_1, θ_1 όπως προηγούμενα, αλλά για την αντίστοιχη συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης, δηλαδή $J_1(x)^{0,5} = M_1(x) e^{j\theta_1(x)}$

β. Αμοιβαία επαγωγή

Έστω δύο αγωγοί με τις ονομασίες 1 και 2 αντίστοιχα, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Αν ο αγωγός 1 διαρρέεται από ένα ρεύμα I_1 , τότε θα δημιουργηθεί εξαιτίας του μία μαγνητική ροή Ψ_1 . Ένα μέρος αυτής της ροής Ψ_{21} θα περάσει και από τον αγωγό 2. Ορίζεται ως αμοιβαία επαγωγή, ή αλληλεπαγωγή M_{21} , ο σταθερός λόγος:

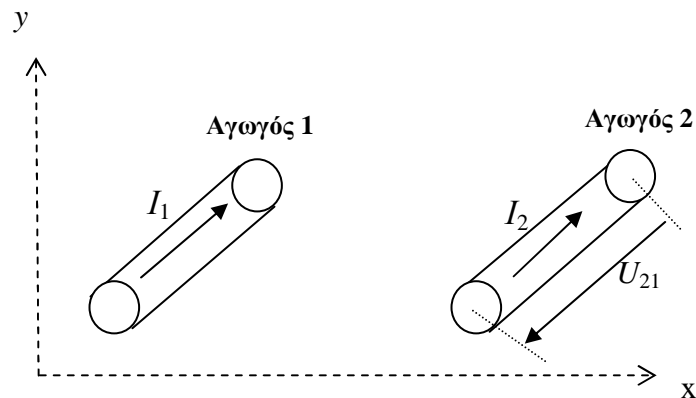
$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_1} \quad (\text{Σχέση 3})$$

Λόγω της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής Ψ_{21} , επάγεται στον αγωγό 2 τάση, η οποία στο πεδίο του χρόνου δίνεται από την σχέση:

$$U_{21} = M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (\text{Σχέση 4})$$

Με ανάλογο τρόπο ορίζεται και η αμοιβαία επαγωγή M_{12} . Όταν δύο αγωγοί βρίσκονται σε ένα ομοιογενές, γραμμικό και ισότροπο μέσο μπορεί να αποδειχθεί [5] ότι $M_{12} = M_{21} = M$. Είναι προφανές ότι η αυτεπαγωγή ενός αγωγού είναι ειδική περίπτωση της αλληλεπαγωγής, δηλαδή:

$$L_{11} = \frac{\Psi_{11}}{I_1} \quad \text{και} \quad L_{22} = \frac{\Psi_{22}}{I_2} \quad (\text{Σχέση 5})$$



Σχήμα 1: Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση καλωδίων

γ. Αυτεπαγωγές συστήματος n αγωγών

Έστω n αγωγοί, ακτίνας a_i ($i=1, \dots, n$) και σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας μ_{ri} , οι οποίοι φέρουν ρεύμα I_i . Η επαγωγική τάση κατά μήκος του αγωγού i , λόγω των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών των υπολοίπων αγωγών, είναι στο πεδίο του χρόνου:

$$U_i(t) = M_{i1} \frac{dI_1}{dt} + M_{i2} \frac{dI_2}{dt} + \dots + L_{ii} \frac{dI_i}{dt} + \dots + L_{in} \frac{dI_n}{dt} \quad (\text{Σχέση 6})$$

Η σχέση 6 με μετασχηματισμό Laplace γίνεται στο πεδίο της συχνότητας:

$$\bar{U}_i = M_{i1} \cdot j \omega \bar{I}_1 + M_{i2} \cdot j \omega \bar{I}_2 + \dots + L_{ii} \cdot j \omega \bar{I}_i + \dots + L_{in} \cdot j \omega \bar{I}_n \quad (\text{Σχέση 7})$$

Η συνολική πτώση τάσης στον αγωγό i , αν ληφθεί υπόψη και η ωμική του αντίσταση, δίνεται από την σχέση:

$$\Delta \bar{U}_i = \bar{I}_i \cdot R_{aci} + \bar{U}_i \quad (\text{Σχέση 8})$$

όπου \bar{I}_i το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό i , R_{aci} η ωμική αντίσταση στο εναλλασσόμενο ρεύμα του αγωγού i που δίνεται από τη σχέση 2, και \bar{U}_i δίνεται από την σχέση 7.

δ. Απώλειες του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου

Οι συνολικές τώρα απώλειες στον αγωγό i , λόγω του ρεύματος \bar{I}_i που τον διαρρέει και λόγω των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων των γειτονικών αγωγών, δίνονται από τη σχέση:

$$P_{\thetaερμ} = R_e [\Delta \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i] [Watt] \quad (\text{Σχέση 9})$$

Η σχέση 9 στην περίπτωση που δεν υπάρχουν άλλοι αγωγοί και αγνοηθεί το επιδερμικό φαινόμενο, καταλήγει στην απλή γνωστή σχέση:

$$P_{\thetaερμ} = \bar{I}_i \cdot R_{dci} \cdot \bar{I}_i = I_i^2 R_{dci} [Watt] \quad (\text{Σχέση 10})$$

η οποία ισχύει μόνο στην περίπτωση του συνεχούς ρεύματος και για ένα αγωγό θωρακισμένο από ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις.

Είναι φανερό ότι στην πράξη σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου τα καλώδια οδεύουν το ένα δίπλα στο άλλο και υπάρχουν αρμονικές ρεύματος-τάσης, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η σχέση 9 για τον ακριβή υπολογισμό των απωλειών. Η γνωστή σχέση 10 μπορεί να δώσει μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών των απωλειών. Με τη σχέση 9 συνυπολογίζονται και τα φαινόμενα γεινίασης των αγωγών καθώς και το επιδερμικό φαινόμενο που δημιουργείται κυρίως λόγω των αρμονικών ρεύματος.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση 9 μπορεί να επεκταθεί και να συμπεριλάβει και τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις λόγω δινορευμάτων που επάγονται σε μεταλλικές κατασκευές, όπως οι σχάρες όδευσης των καλωδίων ή μεταλλικά πεδία.

$$\Delta \bar{U}'_i = \bar{I}_i \cdot R_{aci} + \bar{U}_i + L_{im} \cdot \bar{I}_\delta \quad (\text{Σχέση 11})$$

και

$$P_{\theta\epsilon\rho\mu} = \Delta \bar{U}'_i \cdot \bar{I}_i \text{ [Watt]} \quad (\text{Σχέση 12})$$

όπου L_{im} είναι η αλληλεπαγωγή μεταξύ της μεταλλικής κατασκευής (π.χ. σχάρας) και του αγωγού i και \bar{I}_δ είναι το συνολικό ρεύμα δινορευμάτων που επάγεται στις σχάρες, λόγω των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων όλων των καλωδίων.

Από όλα τα παραπάνω είναι φανερό ότι για τον υπολογισμό απωλειών σε ένα αγωγό i θα πρέπει να υπολογιστούν πρώτα οι αμοιβαίες επαγωγές M_{ij} ($j=1, \dots, n$), η L_{im} και η R_{aci} . Ο υπολογισμός της R_{aci} μπορεί να γίνει άμεσα από την σχέση 2. Ο υπολογισμός των M_{ij} , L_{im} απαιτεί μία πολύ σύνθετη διαδικασία, η οποία βασίζεται στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) [6]. Με τη βοήθεια της ΜΠΣ και μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές που εμφανίζονται στο παραπάνω σύνθετο ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα των n αγωγών [7-12].

Η πεπλεγμένη ροή Ψ_{ij} που διέρχεται από τον αγωγό i λόγω του πεδίου του αγωγού j [6-8] δίνεται από τη σχέση:

$$\Psi_{ij} = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S \nabla \times \vec{A} \cdot d\vec{S} \quad (\text{Σχέση 13})$$



όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή στον αγωγό i λόγω της επίδρασης του αγωγού j , S είναι η διατομή του αγωγού i και $\nabla \times \vec{A}$ είναι η στροφή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, η οποία υπολογίζεται [6-12] με την ΜΠΣ και μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Από την στιγμή λοιπόν που υπολογιστούν οι πεπλεγμένες ροές Ψ_{ii} εύκολα υπολογίζονται και οι αλληλεπαγωγές M_{ii} και L_{im} που οδηγούν τελικά στον υπολογισμό των απωλειών του H/M πεδίου από τη σχέση 12.

IV. Βιβλιογραφία

- [1] IEEE Std 1036-1992, IEEE Guide for application of Shunt Power Capacitors.
- [2] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [3] A. P. Sakis Meliopoulos, "*Power System Grounding and Transients, An Introduction*", Marcel Dekker Inc, 1988.
- [4] Θ. Τσιμπούκης, "*Εισαγωγή στην βασική θεωρία του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου*", Τόμοι I έως II, Θεσσαλονίκη : University Press, 1991.
- [5] J. Weiss and Z. Csendes, "A one-step finite element method for multiconductor skin effect problems", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3796-3803, October 1982.
- [6] K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "Finite Element Computation of Field and Eddy Currents of a System Consisting of a Power Transmission Line Above Conductors Buried in Nonhomogeneous Earth", IEEE Power Engineering Society, 1997 Summer meeting, Berlin, July 20-24, 1997.
- [7] K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "Finite Element Computation of Field and Eddy Currents of a System Consisting of a Power Transmission Line Above Conductors Buried in Nonhomogeneous Earth", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 3, July 1998.
- [8] K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "An Artificial Intelligence System for a Complex Electromagnetic Field Problem, Part I: Architecture and Training Procedure", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 1, January 1999.
- [9] K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, " An Artificial Intelligence System for a Complex Electromagnetic Field Problem, Part II: Method Implementation and Performance Analysis", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 1, January 1999.

- [10] K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "Fuzzy Logic for scaling Finite Elements Solutions of Electromagnetic Field," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 33, No 3., May 1997.
- [11] K. J. Satsios, I. G. Damousis, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "An Innovative Genetic System for the Prediction of an Inductive Interference Problem," *Machine Learning & Applications, Advanced Course on Artificial Intelligence, (ACAI 1999)*, Chania, Greece, July 5-16, 1999.
- [12] K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "The Influence of Nonhomogenous Earth on the Inductive Interference caused to Telecommunication Cables by nearby AC Electric Traction Lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 3, July 2000.