Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας – Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω έξυπνων δικτύων (smart grids)

Τσικόγιας Αθανάσιος

Περίληψη

Οι ετήσιες απώλειες των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) εκτιμώνται κατά μέσο όρο σε 4% των ονομαστικών ροών ενέργειας σε αυτά. Αυτές οι απώλειες αντιπροσωπεύουν 7 δισεκατομμύρια ευρώ σε ετήσιες απώλειες. Οι νέοι κανονισμοί της ΕΕ ξεκίνησαν να υποχρεώνουν τους διαχειριστές των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να λαμβάνουν μέτρα με στόχο της βελτίωση της αποδοτικότητας στα δίκτυά τους. Οι διάφοροι διαχειριστές και λειτουργοί των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έρχονται αντιμέτωποι με την πρόκληση ενσωμάτωσης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας[1] και την απαίτηση τροφοδοσίας ηλεκτρικών οχημάτων. Το εν λόγω άρθρο παρουσιάζει μια στρατηγική για την μεγαλύτερη υιοθέτηση εργαλείων και τεχνολογιών «έξυπνων δικτύων» που στόχο έχουν να βοηθήσουν στην εκπλήρωση και επιθυμητά την υπέρβαση ρυθμιστικών στόχων αποδοτικότητας.

---

[1] Τσικόγιας Αθανάσιος, (09/ 2011): Energy policy making and incentives on Distributed Generation in Greece and the EU, HOU – Hellenic Open University, MBA Dissertation.

Α. Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της λειτουργίας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ως τώρα δεν αποτελούσε συχνά προτεραιότητα των διαχειριστών των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνονται ως θερμικές και άλλες απώλειες. Στην πραγματικότητα, οι ετήσιες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμώνται κατά μέσο όρο σε 6% στα κράτη μέλη της ΕΕ[2],[3]. Υποθέτοντας ότι ποσοστό 2% αντιστοιχεί σε απώλειες στα δίκτυα μεταφοράς και ποσοστό 4% αντιστοιχεί σε απώλειες στα δίκτυα διανομής, η συνολική απώλεια σε ετήσια βάση, σε λειτουργικά κόστη, εκτιμάται σε χρηματική αξία 7 δισεκατομμύρια ευρώ σε κατανάλωση ενέργειας. Τα παραπάνω ποσοστά αφορούν απώλειες ισχύος και ενέργειας σε γραμμές μεταφοράς υψηλής και μέσης τάσης και πρωτεύοντες και δευτερεύοντες υποσταθμούς υψηλής και μέσης τάσης αντίστοιχα.

Ως αποτέλεσμα των πρόσφατων δυναμικών εξελίξεων στο χώρο της ενέργειας εντός της ΕΕ, οι διαχειριστές των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Distribution System Operators - DSOs) θα πρέπει να βελτιώσουν την αποδοτικότητα τους, με μέτρα όπως τον περιορισμό των απωλειών των ηλεκτρικών δικτύων διανομής τους κατά 1.5% κάθε χρόνο. Επιπλέον, επιφορτίζονται με την εύρεση νέων διαδικασιών ενσωμάτωσης «έξυπνων δικτύων – smart grids» και σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στα υφιστάμενα δίκτυα διανομής με μεγάλη διασπορά σε θέσεις που ως τώρα κατείχαν μόνο καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας[4].

Σήμερα είναι και δυνατό και επιθυμητό να παρακολουθείται, να μετράται και να βελτιώνεται η αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βελτιώσεις μπορούν να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη με την υιοθέτηση συνδυασμού hardware και software εξοπλισμού ο οποίος θα πρέπει να μπορεί να ενσωματωθεί στις υφιστάμενες υποδομές των ηλεκτρικών δικτύων.

Το παρόν άρθρο παρουσιάζει τις δυνατότητες εκσυγχρονισμού και ενίσχυσης της αποδοτικότητας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υιοθετώντας καινοτόμες τεχνολογίες των «smart-grids» περιορίζοντας ταυτόχρονα απώλειες και τα σχετικά κόστη (δείτε **Σχήμα -1-**)[5].

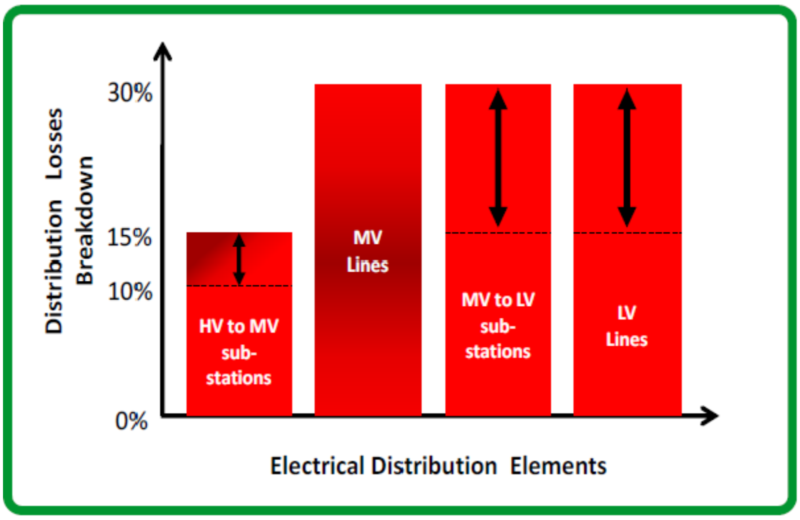
---

[2] International Energy Agency (IEA Statistics © OECD/IEA, http://www.iea.org/stats/index.asp), "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries and Energy Statistics of OECD Countries, and United Nations, Energy Statistics Yearbook".

[3] Eurelectric: Power Statistics 2010, Full report, page 16.

[4] Michel Clemence, Renzo Coccioni, Alain Glatigny , "How Utility Electrical Distribution Networks can save Energy in the Smart Grid Era", Schneider Electric, 2013.

[5] Wolfram Heckmann, Lucas Hamann, Martin Braun, Heike Barth, Johannes Dasenbrock, Chenjie Ma, Thorsten Reiman, Alexander Schelder , "Detailed analysis of network losses in a million customer distribution grid with high penetration of distributed generation", Cired paper 1478, June 2013.



Σχήμα -1- Μεταβλητότητα των απωλειών εξαρτώμενη από τη διαμόρφωση των δικτύων διανομής

Β. Βασική ορολογία

Στην περιοχή της ηλεκτρικής αποδοτικότητας, είναι πάντα χρήσιμο να καθορίζονται κοινοί αποδεκτοί όροι και οι καλύτερες πρακτικές έτσι ώστε να αποφεύγεται τυχόν σύγχιση κατά την εξέταση λειτουργικών δεδομένων που αφορούν τα δίκτυα διανομής.

Η ενεργός ενεργειακή αποδοτικότητα (Active Energy Efficiency): είναι η πράξη της πραγματοποίησης μιας μόνιμης αλλαγής στη μείωση κατανάλωσης ενέργειας μέσω της μέτρησης, της παρακολούθησης, και του ελέγχου της ενεργειακής χρήσης. Τα παραδείγματα της ενεργού ενεργειακής αποδοτικότητας περιλαμβάνουν τη δυναμική διαμόρφωση των δικτύων και τη βελτιστοποίηση του επίπεδου της τάσης.

Η παθητική ενεργειακή αποδοτικότητα (Passive Energy Efficiency): είναι η πράξη της πραγματοποίησης της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας με την προώθηση των μέτρων που μειώνουν τις θερμικές απώλειες με τη χρησιμοποίηση π.χ. εξοπλισμού χαμηλής κατανάλωσης. Τα παραδείγματα των παθητικών μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας περιλαμβάνουν την αντικατάσταση παλαιών μετασχηματιστών διανομής με σύγχρονους μετασχηματιστές διανομής πολύ χαμηλών απωλειών τεχνολογίας άμορφου πυρήνα, ή την αντικατάσταση παραδοσιακού φωτισμού με σύγχρονο φωτισμό χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

Οι τεχνικές απώλειες (technical losses): είναι φυσικές απώλειες που περιλαμβάνουν τις απώλειες φορτίου (load losses - όπως απώλειες χαλκού ή απώλειες λόγω φαινομένου

Joule) και τις απώλειες κενού φορτίου (no load losses - όπως απώλειες λόγω φαινομένου κορώνας ή απώλειες σιδήρου στους μετασχηματιστές).

Οι μη τεχνικές απώλειες (non-technical losses): είναι εμπορικές απώλειες που αποτελούνται από την παραδοθείσα και καταναλισκόμενη ενέργεια που δεν μπορεί να τιμολογηθούν σε ένα τελικό πελάτη – καταναλωτή. Αυτή η κατηγορία απωλειών, μπορεί να χωριστεί στις «ψευδείς λόγω απάτης» απώλειες όπως η κλοπή ενέργειας, ή την μη-μετρούμενη ηλεκτροδότηση π.χ. δημόσιου φωτισμού και τις «κρυφές» απώλειες όπως π.χ. η καταναλισκόμενη ενέργεια για την ψύξη των μετασχηματιστών και τη λειτουργία των συστημάτων ελέγχου, κ.α..

Οι διασπαρμένες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Distributed Energy Resources - DER): περιλαμβάνουν ποικίλες μορφές διασπαρμένης ηλεκτρο-παραγωγής όπως οι διασπαρμένες ηλεκτρογεννήτριες, ελέγξιμα φορτία που χρησιμοποιούνται σε σχήματα διαχείρισης προσφοράς – ζήτησης (DR - demand-response), μέσα αποθήκευσης ενέργειας (ηλεκτρικής ή θερμικής) και τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία μπορούν να διαδραματίσουν έναν διττό ρόλο, του φορτίου και του μέσου αποθήκευσης ενέργειας.

Γ. Ρυθμιστικές προκλήσεις

Η ευρωπαϊκή οδηγία 2012/27/EU ενεργειακής αποδοτικότητας, όπως ισχύει για τους διαχειριστές των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω:

- τα κράτη μέλη θα επιβάλλουν την υιοθέτηση στόχων υποχρέωσης ενεργειακής αποδοτικότητας 1.5% κάθε χρόνο για το χρονικό διάστημα που εκτείνεται από την 1η Ιανουαρίου 2014 μέχρι και την 31η Δεκεμβρίου 2020 (άρθρο 7).

- οι τιμολογιακές πολιτικές των διαχειριστών των δικτύων διανομής πρέπει να απεικονίζουν τις εξοικονομήσεις στα λειτουργικά κόστη των δικτύων διανομής. Αυτές οι εξοικονομήσεις ενέργειας θα επιτευχθούν και μέσω των μέτρων DR καθώς και μέσω της διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης θα περιλαμβάνουν εξοικονόμηση πόρων από τη μείωση του κόστους μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είτε μέσω νέων επενδύσεων στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είτε μέσω αριστοποίησης του κόστους των λειτουργικών διαδικασιών.

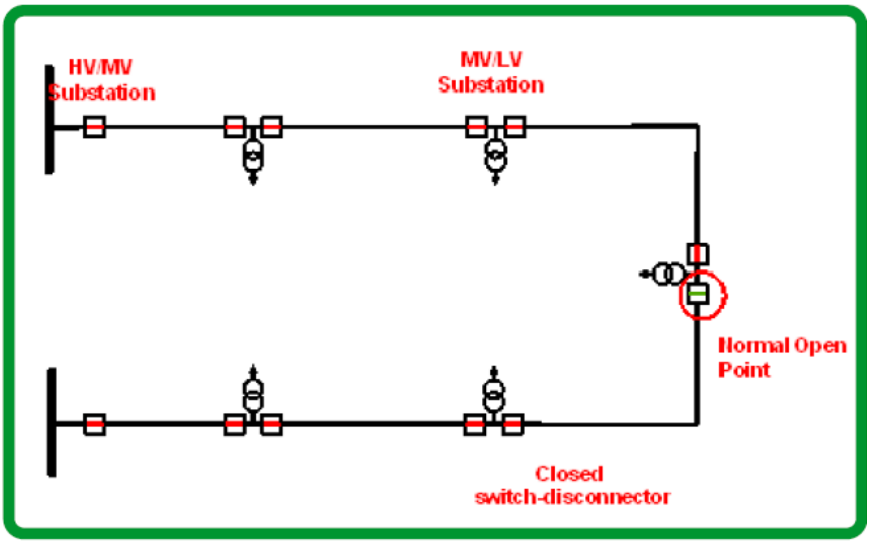
- προτάσεις για μέτρα εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας και επενδύσεις στις υποδομές των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι τις 30 Ιουνίου 2015 (άρθρο15).

- οι τιμολογιακές πολιτικές θα καθοριστούν σε τέτοια επίπεδα που θα ενθαρρύνουν τους προμηθευτές να βελτιώσουν την συμμετοχή και των καταναλωτών ενέργειας στην υλοποίηση υψηλής αποδοτικότητας των δικτύων (άρθρο 15).

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά ζητήματα και στρατηγικές αντιμετώπισης τους. Αυτές οι στρατηγικές ως παραδείγματα των καλύτερων πρακτικών μπορούν να βοηθήσουν τους διαχειριστές των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να περιορίσουν τις σχετικές δαπάνες και να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις των ανωτέρω κανονισμών.

Ζήτημα 1: Τεχνικές απώλειες στις γραμμές μέσης τάσης (ΜΤ).

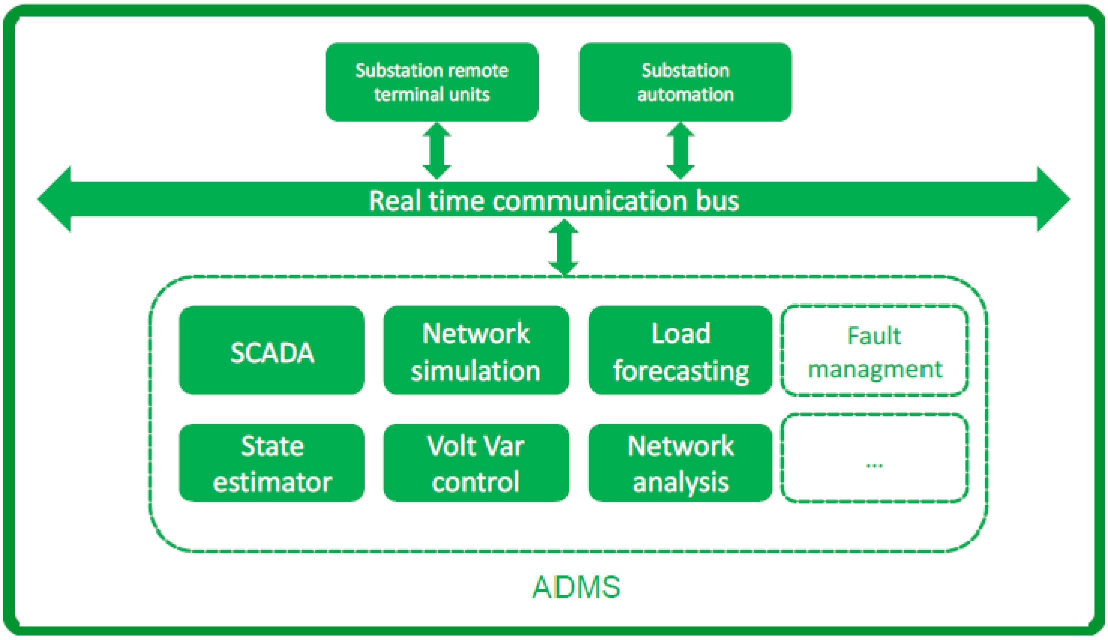
Στην Ευρώπη τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης συνήθως διαμορφώνονται σε τοπολογίες ανοικτών βρόχων και υιοθετούν πολιτικές ελέγχου προκειμένου να είναι σε θέση να απομονώσουν ένα σφάλμα και να αποκαταστήσουν τη μεταφορά ισχύος (δείτε το **Σχήμα -2-**). Τα «κανονικά ανοικτά» σημεία των βρόχων βρίσκονται σε στρατηγικά επιλεγμένες θέσεις για να μεγιστοποιήσουν τη ποιότητα εξυπηρέτησης, δηλ., χαμηλή διάρκεια διακοπής (low interruption duration - SAIDI) και χαμηλή συχνότητα διακοπής (low interruption frequency - SAIFI). Εντούτοις αυτή η στρατηγική δεν ελαχιστοποιεί τις απώλειες των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα -2- Διάγραμμα ενός δικτύου που διαμορφώνεται σε τοπολογία ανοιχτού βρόχου και που ελέγχεται προκειμένου να απομονωθεί ένα σφάλμα και να αποκατασταθεί η διανομή ισχύος.

Στρατηγική Αντιμετώπισης για το Ζήτημα 1: Προηγμένα συστήματα διαχείρισης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Advanced Distribution Management Systems - ADMS)

Τα προηγμένα συστήματα διαχείρισης διανομής (ADMS) έχουν την ανάγκη μιας τοπολογίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Συλλέγουν μετρήσεις των δικτύων, εξετάζουν τα σχεδιαγράμματα φορτίων στους υποσταθμούς Μέσης Τάσης (ΜΤ) και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ), συνυπολογίζουν τις πληροφορίες κατανάλωσης πελατών και στη συνέχεια καθορίζουν τη βέλτιστη θέση των κανονικών «ανοικτών σημείων». Σε αυτό το περιβάλλον, όταν οι διαχειριστές των συστημάτων διανομής «ανοίγουν» ή «κλείνουν» ένα αποζεύκτη φορτίου (switch-disconnector), το ADMS[6] προσομοιώνει τον αντίκτυπο στην αξιοπιστία του ανεφοδιασμού, των απωλειών και της διαχείρισης τάσης στα εμπλεκόμενα δίκτυα διανομής. Οι αλγόριθμοι υπολογίζουν τις βέλτιστες διαμορφώσεις σε ωριαία, μηνιαία, εποχιακή ή ετήσια βάση σύμφωνα με τις παρεχόμενες καμπύλες φορτίων, τη πρόγνωση καιρού, τα στοιχεία που προέρχονται σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες, τους έξυπνους μετρητές ενέργειας και τον αριθμό χειρισμών των διάφορων εμπλεκόμεων αποζευκτών - φορτίου (δείτε το **Σχήμα -3-**).



Σχήμα -3- Η προσομοίωση και η δοκιμή είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τον έλεγχο των απώλειων ενέργειας στα δικτύα διανομής.

Οι βέλτιστες θέσεις των «κανονικών ανοικτών» σημείων σε ένα δίκτυο διανομής, άρα και οι ροές ενέργειας και ισχύος εξαρτώνται από την πραγματική ζήτηση ισχύος δηλ. την ζητούμενη κατανάλωση. Η απαίτηση ισχύος και ενέργειας μεταβάλλεται δυναμικά καθ' όλη τη διάρκεια μιας δεδομένης ημέρας και επηρρέαζεται επίσης και από την διαδοχή των εποχών του χρόνου. Αυτές οι μεταβολές φορτίων έχουν σημαντική επίδραση στις βέλτιστες θέσεις των «κανονικών ανοικτών» σημείων ενός βρόχου σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι επομένως απαραίτητη η χρήση μια εφαρμογής με δυνατότητες πολλαπλής διαμόρφωσης του δικτύου διανομής με σκοπό τη δοκιμή πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων ώστε να προτείνεται μια επιλογή ικανή να προσδιορίσει τις βέλτιστες θέσεις των «κανονικών ανοικτών» αποζευκτών-φορτίου και αυτομάτων διακοπτών ισχύος. Η κατάλληλη διαμόρφωση του δικτύου διανομής θα επιτυγχάνεται σύμφωνα με τα

[6] "The Advanced Distribution Management System (ADMS) – Managing the Distribution network in the Smart Grid era, White Paper" Schneider Electric, June 2012

επιλεγμένα εκ των προτέρων κριτήρια και στόχους που θέτει ο διαχειριστής του δικτύου διανομής.

Η ανάπτυξη και η χρήση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση των απωλειών, στον περιορισμό της ανισορροπίας φόρτισης σε φορτία και μετασχηματιστές υποσταθμών Υψηλής Τάσης (ΥΤ) και Μέσης Τάσης (ΜΤ), στην αποφόρτιση υπερφορτωμένων τμήματων ενός δικτύου διανομής, στην βελτίωση της ποιότητας της τάσης και την επίτευξη ενός βέλτιστου προφίλ τάσης. Εντούτοις, οι παραπάνω δυνατότητες ένα τέτοιου συστήματος μπορεί να περιοριστούν στην περίπτωση εφαρμογής του σε μια υφιστάμενη υποδομή ενός δικτύου παλαιάς τεχνολογίας. Σε ένα τέτοιο δίκτυο περιορίζεται η δυνατότητα πραγματοποίησης των ελέγχων και χειρισμών σύμφωνα με τα επιτρεπτά κάθε φορά όρια τάσης και φόρτισης του δικτύου διανομής.

Πιλοτικές εφαρμογές τέτοιων συστημάτων ADMS[7] στην ΕΕ έχουν παράγει μερικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα όπως:

• οι απώλειες μπορούν να μειωθούν μέχρι 40% σε περίπτωση ωριαίας επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής – αν και μια τέτοια λειτουργία αποδεικνύεται μη ρεαλιστική και εφικτή από άποψη του απαιτούμενου αριθμού διαδικασιών και ελέγχου αλληλομανδαλώσεων. Ο πραγματικός διακοπτικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε δίκτυα διανομής όπως πχ. ένας αποζεύκτης – φορτίου (switch disconnector) σχεδιάζεται για να ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπως 1.000 χειρισμοί ανά διάρκεια ζωής της συσκευής. Ένα σενάριο ωριαίας επαναδιαμόρφωσης θα απαιτούσε ως και 200.000 χειρισμούς κατά τη διάρκειας ζωής ενός αποζεύκτη – φορτίου.

• οι απώλειες μπορούν να μειωθούν στο 20% σε εβδομαδιαία βάση επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής (δηλ. απαίτηση για 50 φορές ετησίως).

• οι απώλειες μπορούν να μειωθούν σε 10% σε εποχιακή βάση επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής (δηλ. απαίτηση για 4 φορές ετησίως).

• οι απώλειες μπορούν να μειώθουν σε 4% σε ετήσια βάση επαναδιαμόρφωσης του δικτύου διανομής (δηλ. απαίτηση για 1 φορά ετησίως).

Ζήτημα 2: Αντίκτυπος της διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ (Distributed Energy Resources – DER) στη διαχείριση του επιπέδου της τάσης

Μια από τις κύριες ευθύνες των διαχειριστών των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο είναι η διατήρηση των ορίων της τάσης όπως συμφωνείται μέσω της σύμβασης με τους πελάτες τους (δηλ., εντός των ορίων +/- 10% της συμφωνηθέντας τάσης λειτουργίας). Ο έλεγχος τάσης στα δίκτυα διανομής πραγματοποιείται παραδοσιακά από

[7] Schneider Electric, “The Advanced Distribution Management System(ADMS) – Managing the distribution network in the Smart Grid Area”, White Paper, March 2012

τους μετασχηματιστές, χρησιμοποιώντας μεταγωγείς λήψης τάσης (on-load & off-load tap changers) και τράπεζες πυκνωτών (capacitor banks) οι οποίοι εγχέουν άεργο ισχύ στο δίκτυο στο επίπεδο των υποσταθμών ΥΤ / ΜΤ. Ο διαχειριστής ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (DSO) καθορίζει μια επιλογή για το επίπεδο τάσης (setpoint) και προετοιμάζει τα σενάρια και το εύρος λειτουργίας με βάσει εποχιακές καμπύλες ζήτησης ισχύος και φόρτισης.

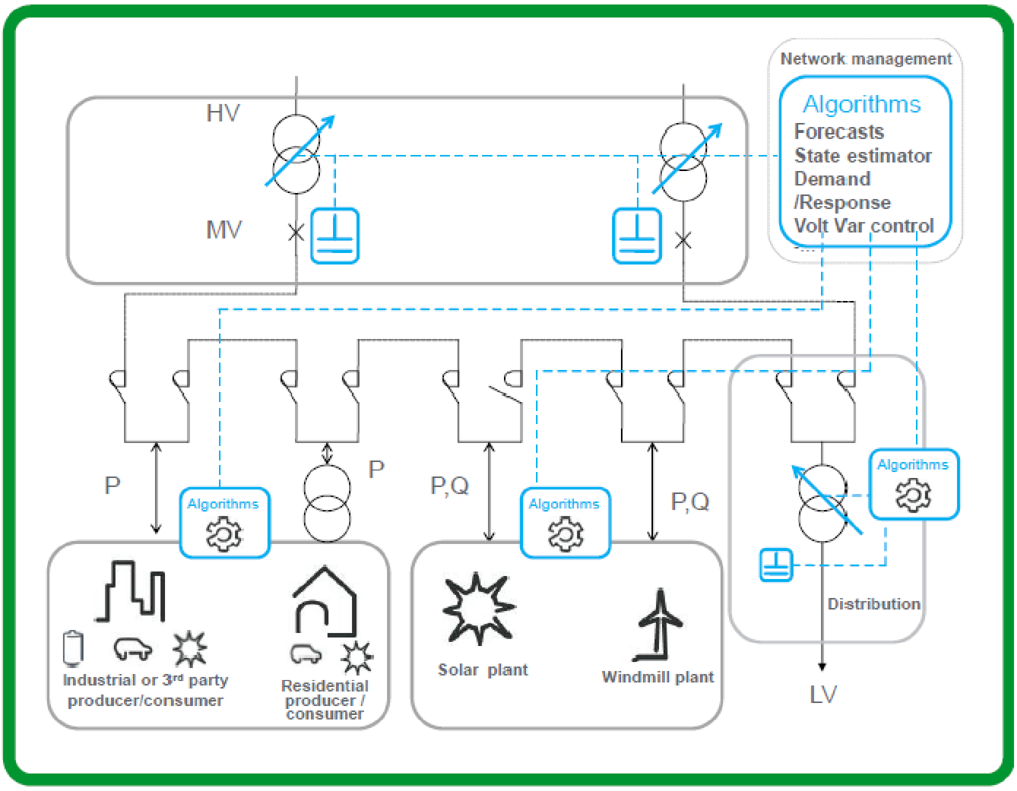
Ως αποτέλεσμα της μεγάλης έγχυσης ισχύος και ενέργειας από τις DER σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, η διαχείριση του επιπέδου της τάσης αποτελεί πλέον για τους DSO μια σημαντική πρόκληση. Πρέπει τώρα να διαχειριστούν καταστάσεις όπου το επίπεδο της τάσης μπορεί σε ένα μέρος του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να αυξάνεται και σε άλλο να ελαττώνεται. Κατά συνέπεια, οι DSOs εισάγουν στο δίκτυο αισθητήρες (sensors) για να ελέγξουν τις τάσεις τροφοδοσίας των φορτίων τους σε πραγματικό χρόνο και νέους ενεργοποιητές (actuators) που είναι σε θέση να ρυθμίζουν την τάση σε διαφορετικά επίπεδα, αξιοποιώντας κεντρικές ή/και κατανεμημένες (central and/or distributed) πολιτικές ελέγχου.

Στρατηγική Αντιμετώπισης για το Ζήτημα 2: Υποδομές δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με ρυθμισμένα επίπεδα τάσης λειτουργίας

Ο έλεγχος του εξοπλισμού μέσης τάσης παλαιότερων υποσταθμών ξεπερασμένης τεχνολογίας είναι δαπανηρός δεδομένου ότι απαιτεί σύνθετες και επεμβατικές μεθόδους. Κατά συνέπεια, η δυνατότητα συλλογής μετρήσεων «πραγματικού χρόνου» με μεγάλη ακρίβεια υπονοεί την ανάγκη υιοθέτησης νέων - σύγχρονων λύσεων και αισθητήρων με στόχο την ελαχιστοποίηση πάγιων λειτουργικών εξόδων.

Διάφορες νέες λύσεις μπορούν να υιοθετηθούν για να προσπαθήσουν να καλύψουν την παραπάνω πρόκληση. Νέοι χωρητικοί ή ανθεκτικοί διαιρέτες τάσης μπορούν να παρεμβληθούν στις συνδέσεις των καλωδίων στο κύριο επίπεδο των μετασχηματιστών ή μονάδων (Ring Main Units - RMU). Μια άλλη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν «εικονικοί αισθητήρες (virtual sensors) οι οποίοι είναι ικανοί να εκτιμήσουν ή να μοντελοποιήσουν το επίπεδο της μέσης τάσης στο δίκτυο διανομής χρησιμοποιώντας άλλες μετρήσεις και δεδομένα τα οποία μπορεί να συλλεγούν πιο εύκολα και μικρότερο κόστος. Για παράδειγμα το επίπεδο της μέσης τάσης σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να υπολογιστεί από το δευτερεύον (δηλ. το τύλιγμα χαμηλής τάσης) των μετασχηματιστών διανομής ΜΤ/ΧΤ ή από τα ρεύματα φορτίων μέσω της μοντελοποίησης της σύνθετης αντίστασης – εμπέδησης των γραμμών μεταφοράς στο δίκτυο διανομής. Ανάλογα με το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται, οι δαπάνες των απαιτούμενω αισθητήρων και εγκαταστάσεων μεταβάλλονται αντίστοιχα.

Οι ενεργοποιητές, που εγκαθίστανται συχνότερα στο επίπεδο υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ όπως μεταγωγείς λήψης τάσης (on-load & off-load tap changers), τράπεζες πυκνωτών και ρυθμιστές τάσης μπορούν επίσης να εγκατασταθούν στο επίπεδο των γραμμών μεταφοράς στο δίκτυο διανομής ή ακόμα και σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Αυτοί οι νέοι ενεργοποιητές (tap changers) μπορούν να εγκατασταθούν και σε έξυπνους μετασχηματιστές «smart – trasnformers» με μέχρι και 9 λήψεις όσον αφορά το επίπεδο τάσης. Οι μετασχηματιστές διανομής ΜΤ/ΧΤ μπορούν να μετασχηματίσουν το επίπεδο της τάσης, στην Ελλάδα από τα 20000V στα 400V με τη χρήση off-load ή on-load tap changers χρησιμοποιώντας επαφείς με μια διάρκεια λειτουργίας ως και 1 εκατομμύριο χειρισμούς, ενώ δεν απαιτούν καμμία συντήρηση.



Σχήμα -4- Ο έλεγχος τάσης υλοποιείται με την προσομοίωση και εκτέλεση αλγορίθμων συντελώντας στη διαχείριση των αλλαγών που επέρχονται από την αυξανόμενη παρουσία DER στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις ανωτέρω δύο περιπτώσεις, οι ενεργοποιητές πρέπει να ελέγχονται από τους νέους αλγορίθμους οι οποίοι εγκαθίστανται τοπικά στους υποσταθμούς πρωτεύων ή δευτερεύουσας διανομής και κεντρικά ή κατανεμημένα στο σύστημα ADMS (δείτε το **Σχήμα -4-**). Αυτή η συντονισμένη υποδομή ελέγχου τάσης που σχεδιάζεται για την ενσωμάτωση των DER μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιήσει τις τεχνικές απώλειες των δικτύων διανομής. Σε ένα βαριά φορτωμένο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λειτουργήσει στη μέγιστη τάση για να μειώσει την τρέχουσα ροή ισχύος και ενέργειας και επομένως να μειώσει τις θερμικές απώλειες λόγω φαινομένου Joule κατά μήκος των καλωδίων και των μετασχηματιστών. Εναλλακτικά η εν λόγω πολιτική ελέγχου μέσα από ένα σύστημα ADMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση του ελάχιστου επιπέδου τάσης λειτουργίας, σε ένα ελαφριά φορτωμένο δίκτυο διανομής για να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες σιδήρου στους μετασχηματιστές διανομής. Αυτές οι πιλοτικές λύσεις ελέγχου τους επιπέδου της τάσης έχουν υλποποιηθεί με επιτυχία σε διάφορα πειραματικά προγράμματα στην Ευρώπη και μπορούν να οδηγήσουν σε:

• δραστική μείωση του αριθμού των αποσυνδέσεων Φ/Β σταθμών σε περιπτώσεις διακύβευσης της ευστάθειας του δικτύου διανομής

• μείωση των τεχνικών απωλειών στις γραμμές μεταφοράς σε δίκτυα διανομής ΜΤ

• μείωση της αιχμής φορτίων

Ζήτημα 3: Τεχνικές απώλειες στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

Οι τεχνικές απώλειες στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ) αντιπροσωπεύουν περίπου 3% των συνολικών απωλειών της διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής. Οι θερμικές απώλειες λόγω φαινομένου Joule αντιπροσωπεύουν 70% αυτών των απωλειών[8] σε συνάρτηση με την εκτίμηση φορτίων του δικτύου.

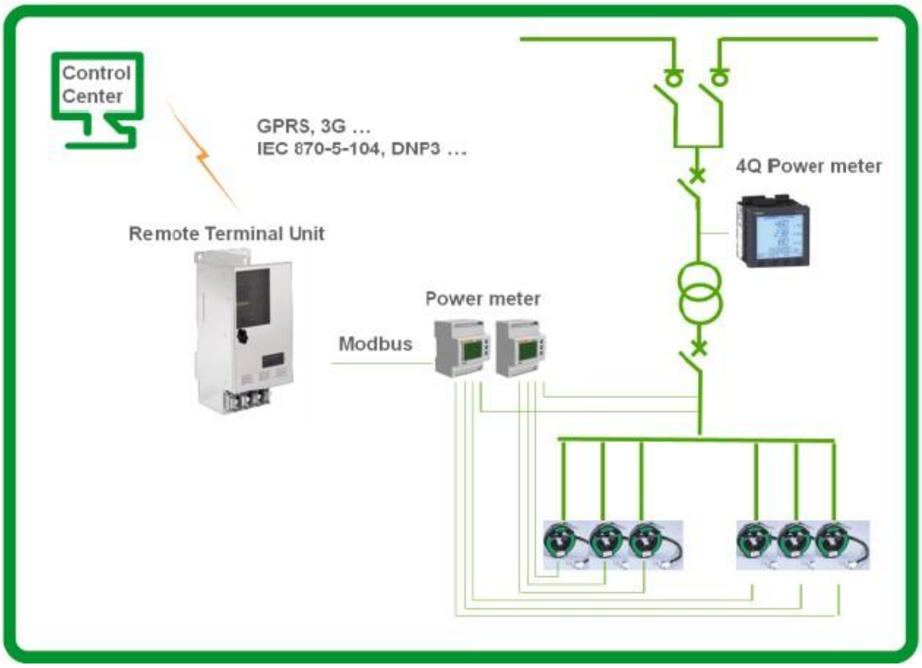
Περισσότερες απώλειες εμφανίζονται στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (ΧΤ). Οι απομακρυσμένοι καταναλωτές χαμηλής τάσης λόγω χαμηλής φόρτισης και μεγάλων μηκών καλωδίων φορτίζουν ανισομερώς τους μετασχηματιστές διανομής του ίδιου δικτύου διανομής ΧΤ. Αυτές οι δυσαναλογίες στο ποσοστό φόρτισης προκαλούν τις θερμικές απώλειες στα καλώδια και τους μετασχηματιστές λόγω του υψηλότερου ρεύματος στους αγωγούς των φάσεων και του ουδετέρου. Αυτές οι απώλειες εκτιμώντας σε λειτουργικό κόστος από 200€ ως 1.000€ ευρώ ανά υποσταθμό διανομής ΜΤ/ΧΤ το χρόνο.

Στρατηγική Αντιμετώπισης για το Ζήτημα 3: Λεπτομερής ανάλυψη των στοιχείων απόδοσης των υποσταθμών ΜΤ/ΧΤ

Το καθημερινό φορτίο, η τάση, ο συντελεστής ισχύος, τα προφίλ θερμοκρασίας λειτουργίας του υποσταθμού και το εύρος και τύπος των φορτίων του, αποτελούν χαρακτηριστικά στοιχεία που πρέπει να συλλέγονται από ένα σύστημα παρακολούθησης ενός υποσταθμού. Με την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων μπορεί να μελετηθούν σε βάθος χρόνου η καμπύλη διάρκειας τάσης, η καμπύλη φόρτισης των διαφορετικών φορτίων, το διανυσματικό διάγραμμα για τη διάγνωση των ανισορροπιών ανά φορτίο και άλλες τιμές. Αυτά τα σημεία στοιχείων μπορούν έπειτα να ομαδοποιηθούν σε εξατομικευμένα οπτικές απικονίσεις (dashboards). Προκειμένου να μειωθεί ο όγκος των αποθηκευμένων δεδομένων ο οποίος μεταδίδεται από τον υποσταθμό διανομής προς το σύστημα διαχείρισης διανομής (Distribution Management System - DMS), οι προαναφερθείσες καμπύλες μπορούν να

[8] Dr. Georgios Papaefthymiou, Christina Beestermöller, Ann Gardiner, “Ecofys Incentives to improve energy efficiency in EU Grids”, 15 April 2013

υπολογιστούν από την τοπική μονάδα απομακρυσμένων τερματικών (RTU). Αυτή η πρακτική βοηθά να στην αποφυγή της συμφόρησης των δικτύων επικοινωνίας (δείτε το **Σχήμα -5-**).



Σχήμα -5- Τα στοιχεία που συγκεντρώνονται από τις μονάδες απομακρυσμένων τερματικών (RTU) μπορούν να τροφοδοτήσουν με μετρήσεις πραγματικού χρόνου dashboards στο κέντρο ελέγχου ή σε απομακρυσμένες θέσεις μέσω cloud computing.

Οι αναχωρήσεις προς τα φορτία ΧΤ είναι εξοπλισμένες με μετρητές ενέργειας που συνδέονται με το RTU στον υποσταθμό. Το σύστημα παρακολούθησης είναι σε θέση να υπολογίσει τις ασυμμετρίες φόρτισης στις αναχωρήσεις προς τα φορτία ΧΤ σε πραγματικό χρόνο (κατά μέσο όρο κάθε 10 λεπτά) και να παρακολουθεί κάθε καταναλωτή ΧΤ στο δίκτυο. Η αποκατάσταση της συμμετρίας φόρτισης των φορτίων σε κάφε φάση εκτελείται από τις μονάδες ανακατανομής που εγκαθίστανται κατά μήκος του δικτύου που μπορούν να μετάγουν ένα καταναλωτή ΧΤ από μια φάση σε άλλη. Αυτή η ιδιαίτερη αρχιτεκτονική επιτρέπει στο δίκτυο διανομής να ενσωματώσει μεγαλύτερα ποσά ηλεκτροπαραγωγής από DER δεδομένου ότι αντιμετωπίζει τα ζητήματα της ασυμμετρίας φορτίων και βοηθά στη μείωση των ενεργειακών απωλειών. Η μετάβαση από μια φάση σε άλλη μπορεί να προγραμματιστεί είτε χρονικά (π.χ. μία φορά το χρόνο) είτε μπορεί να συμβεί με τη λογική σεναρίων λειτουργίας. Τα οφέλη αυτής της υλοποίησης περιλαμβάνουν μια κατ' εκτίμηση μείωση 200€ ως 800€ το χρόνο του λειτουργικού κόστους ενός δικτύου διανομής συνυπολογίζοντας τις μειωμένες θερμικές απώλειες στα καλώδια καθώς και μια βελτίωση της απόδοσης παραγωγής των υποσταθμών ως 30%.

Ζήτημα 4: Μη αποδοτικοί ενεργειακά μετασχηματιστές

Οι απώλειες μετασχηματιστών στο ηλεκτρικό δίκτυο της ΕΕ υπολογίζονται σε 70 έως 100 TWh με τους τρέχοντες συντελεστές φόρτισης[9]. Οι μετασχηματιστές διανομής και μετασχηματιστές ισχύος αντιπροσωπεύουν περίπου 5 εκατομμύρια μονάδες. Μετά από τα ηλεκτροφόρα καλώδια, οι μετασχηματιστές διανομής έχουν τη δεύτερη υψηλότερη δυνατότητα για βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας[10].

Στρατηγική Αντιμετώπισης για το Ζήτημα 4: Περικοπή δαπανών, απώλειες με τις βελτιώσεις τεχνολογίας μετασχηματιστών

Εάν συγκρίνουμε τους μετασχηματιστές και τις εναέριες γραμμές μεταφοράς - διανομής και τα ηλεκτροφόρα καλώδια, οι μετασχηματιστές είναι δυνητικά πιο εύκολο να αντικατασταθούν. Επιπλέον, η σύγχρονη τεχνολογία μετασχηματιστών είναι σε θέση να περιορίσει αρκετά τις απώλειες των μετασχηματιστών.

Στην τεχνολογία των μετασχηματιστών υπάρχουν δύο τύποι απωλειών: α) οι απώλειες σιδήρου και β) οι απώλειες χαλκού. Οι απώλειες σιδήρου είναι ανεξάρτητες από το φορτίο και καλούνται και (no-load losses). Οι απώλειες χαλκού είναι εξαρτώμενες του φορτίου και καλούνται (load losses).

Οι απώλειες σιδήρου (no-load losees) δηλ. οι «σταθερές» απώλειες εμφανίζονται μόλις ενεργοποιείται ένας μετασχηματιστής. Οι απώλειες χαλκού (load losses) δηλ. οι «μεταβλητές απώλειες» ποικίλλουν σύμφωνα με το φορτίο του μετασχηματιστή. Οι μετασχηματιστές διανομής και οι μετασχηματιστές ισχύος λειτουργούν 24 ώρες το 24-ωρο κάθε ημέρα της εβδομάδας, όλο το χρόνο, επομένως η ενεργειακή αποδοτικότητα τους μπορεί να επηρρεαστεί αν υπάρχουν μειώσεις τόσο στις απώλειες σιδήρου όσο και στις απώλειες χαλκού.

Για τους διαχειριστές των δικτύων διανομής, μπορεί να είναι πιό συμφέρον να μειωθούν οι απώλειες σιδήρου απ’ ότι οι απώλειες χαλκού, δεδομένου ότι οι μετασχηματιστές ενεργοποιούνται 8760 ώρες ετησίως. Αυτοί οι μετασχηματιστές δεν τροφοδοτούν κάποιο φορτίο καθόλη τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου και όταν υποστηρίζουν ένα φορτίο, δεν είναι ποτέ στη μέγιστη χωρητικότητα του φορτίου. Αφ' ετέρου μπορεί να είναι συμφέρον για τις βιομηχανικές εφαρμογές να μειωθούν οι απώλειες χαλκού, μια και αυτοί οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται εξυπηρετούν κυρίως υψηλό συντελεστή ισχύος και ταυτοχρονισμού των φορτίων.

Ο παρακάτω **Πίνακας -1-** συγκρίνει τους παραδοσιακούς/συμβατικούς μετα-σχηματιστές με τους μετασχηματιστές σύγχρονης τεχνολογίας (άμορφου πυρήνα). Τα δοθείσα στοιχεία

[9] T&D Europe position paper on “Working documents on a possible Commission Regulation implementing directive 2009/125/EC with regards to small, distribution and power transformers”, 6.11.2012, page 3.

[10] T&D Europe position paper on Study for preparing the first Working Plan of the EcoDesign Directive Report for tender No.: ENTR/06/026, published on Nov. 22nd, March 6 2008, page 2.

συντελούν στο συμπέρασμα ότι η μείωση των απωλειών μπορεί να πραγματοποιηθούν με την υιοθέτηση μετασχηματιστών νέας τεχνολογίας, όπως άμοφου πυρήνα.

Οι απώλειες χαλκού και απώλειες σιδήρου ενός μετασχηματιστή κωδικοποιούνται στο πρότυπο EN 50464-1:2007 και καθορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076. Έτσι για τις απώλειες σιδήρου (no-load losses) υπάρχει η διαβάθμιση από A0, B0 C0, D0, E0 με A0 να είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική και E0 η κατηγορία με τις μεγαλύτερες απώλειες. Αντίστοιχα για τις απώλειες χαλκού (load losses) υπάρχει η διαβάθμιση από Ak, Bk Ck, Dk με Ak να είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική και Dk η κατηγορία με τις μεγαλύτερες απώλειες[11]. Οι απώλειες συνολικά ενός μετασχηματιστή καθορίζονται από το συνδυασμό των κατηγορίων των απωλειών που προσφέρει ο εργοστασιακός κατασκευαστής των μετασχηματιστών.

Rated power	Technology	No load losses level	Load losses level	No load losses (W)	No load losses reduction
400kVA/Oil immersed	Conventional GOES	Ao	Ck: 4600W	430	0%
400kVA/Oil immersed	New GOES	Ao+	Ck: 4600W	300	30%
400kVA/Oil immersed	Amorphous	Ao++	Ck: 4600W	< 200 (160)	63%

Πίνακας -1- Συγκρίσεις απωλειών μετασχηματιστών (συμβατικής τεχνολογίας GOES, νέας GOES τεχνολογίας, και άμορφου πυρήνα)

Στην ελληνική αγορά είναι διαθέσιμοι μετασχηματιστές «κανονικών απωλειών δηλ. CoCk, «χαμηλών απωλειών δηλ. BoBk και κατά επιλογή η προσφορά μετασχηματιστών ελαίου ή ξηρού τύπου με απώλειες κατά παραγγελία σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάποιου ενεργειακού έργου, όπως αιολικά πάρκα, Φ/Β σταθμοί, κ.α.

Στην προσπάθεια βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας πλέον και στην Ελλάδα, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής και προσφοράς από τους εργοστασιακούς κατασκευαστές μετασχηματιστών, για δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, και τάξης απωλειών A0Ak κατά EN50541-1 σύμφωνα με τις απαιτήσεις του νέου ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥ (ΕΕ) με αριθ. 548/2014 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 21ης Μαΐου 2014. Ο εν λόγω κανονισμός αποτελεί την εφαρμογή της οδηγίας 2009/125/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου όσον αφορά τους μετασχηματιστές μικρής, μεσαίας και μεγάλης ισχύος, όπου όλοι οι μετασχηματιστές που τίθενται σε λειτουργία (εγκαθίστανται στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας) μετά την 1η Ιουλίου 2015 πρέπει να είναι σε συμφωνία με τον

[11] Schneider Electric, "Use and Maintenance of Oil – Immersed Distribution Transformers, Elvim Range", page 19, Schneider 318-05AD/04.09 .

παραπάνω Κανονισμό-απαίτηση οικολογικού σχεδιασμού (EcoDesign). Στον παραπάνω Κανονισμό αναφέρεται ότι όλοι οι μετασχηματιστές που τίθενται σε λειτουργία (εγκαθίστανται στο δίκτυο διανομής) μετά την 1η Ιουλίου 2015 πρέπει να είναι σε συμφωνία με την απαίτηση οικολογικού σχεδιασμού[12].

Μερικοί κατασκευαστές έχουν εξετάσει επιτυχώς μια πλήρη σειρά των άμορφων μετασχηματιστών ελαίου από 100kVA μέχρι 1600kVA. Διάφοροι μετασχηματιστές έχουν εγκατασταθεί στη Γαλλία, τη Γερμανία, και το Βέλγιο για περισσότερα από ένα έτη με θετικά αποτελέσματα. Προκειμένου να αξιολογηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των μετασχηματιστών είναι σημαντικό να κεφαλαιοποιηθούν οι απώλειες. Η οικονομική αξία των απωλειών που παράγονται κατά τη διάρκεια της διάρκειας ζωής μετασχηματιστών αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μερίδιο της επένδυσης.

Οι διαχειριστές των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση προσθέτουν την αξία των απωλειών που παράγονται κατά τη διάρκεια της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού στο κόστος αγοράς. Η οικονομική αξία των απωλειών υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό του ποσού απωλειών (W), όπως δηλώνεται από τον εργοστασιακό κατασκευαστή του, με την αξία που υποδεικνύεται από τον αγοραστή (που εκφράζεται σε €/W). Ο υπολογισμός στον παρακάτω **Πίνακα -2-** δείχνει ότι το συνολικό κόστος επένδυσης (Total Cost of Ownersip – TCO) ενός μετασχηματιστή άμορφου πυρήνα είναι χαμηλότερο από ένα συμβατικό μετασχηματιστή με τυπικές στάθμες απωλειών, παρά το γεγονός ότι το κόστος αγοράς (Capital Cost) για τον μετασχηματιστή άμορφου πυρήνα είναι υψηλότερο.

Rated power (kVA)	No load loss level & Value (W)	Load loss level & Value (W)	Efficiency (n)	Purchasing cost (W)	No load loss cost (€/W)	Load loss cost (€/W)	Total investment (€)
400kVA/Oil immersed/ Conventional GOES	C0:610W	Ck: 4600W	98.71	7250	8	1	16730
400kVA/Oil immersed/ Amorphous	A0++: 200W	Ck: 4600W	98.81	10125	8	1	16325

Πίνακας -2- Συγκρίσεις δαπανών των συμβατικών μετασχηματιστών και του άμορφου πυρήνα

Δ. Συμπέρασμα

[12] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) με αριθ. 548/2014 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 21ης Μαΐου 2014, διαθέσιμος από το hyperlink στις 04/02/2015: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:JOL_2014_152_R_0001

Πολλά δίκτυα διανομής πλέον εκσυγχρονίζονται με την υιοθέτηση οργάνων και συστημάτων τηλεμετρίας σε επίπεδο υποσταθμών δευτερεύουσας διανομής ισχύος. Ως αποτέλεσμα της ογκώδους εισαγωγής της διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής, στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο δύσκολη η διαχείριση τους. Για την επίτευξη των στόχων ενεργειακής αποδοτικότητας της ΕΕ και της αύξησης του βαθμού διείσδυσης των ΑΠΕ (Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) θα πρέπει να γίνουν επενδύσεις σε δικτυομένο εξοπλισμό μετρήσεων, παρακολούθησης και τηλεμετρίας πραγματικού χρόνου.

Αν και οι δυναμικές μεταβολές και τα εμπόδια και στρεβλώσεις της αγοράς της ενέργειας μπορούν να αυξήσουν τα βραχυπρόθεσμα κόστη κεφαλαίου, θα πρέπει αυτές να γίνουν ενισχύοντας τις υφιστάμενες υποδομές με στόχο τα μακροπρόθεσμα πλεονεκτήματα που θα προκύψουν όπως οι χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες, τα μειωμένα ενεργειακά απόβλητα και ένα ευέλικτο δίκτυο.

Σχετικά με τον συγγραφέα

Ο Τσικόγιας Αθανάσιος είναι Διπλωματούχος Ενεργειακός Ηλεκτρολόγος Μηχ/κός & Μηχ/κός Η/Υ και κάτοχος του MEng. Power Systems Engineering από το Πανεπιστήμιο του UMIST. Επίσης είναι κάτοχος μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διοίκηση Επιχειρήσεων (MBA) από το Ελληνικό Ανοιχτό Πανεπιστήμιο.

Ο Τσικόγιας Αθανάσιος συνεργάζεται με την εταιρεία Schneider Electric από το 2006 και σήμερα κατέχει τη θέση του Data Center Solutions Architect στη Διεύθυνση IT. Από τη θέση του ασχολείται με την ανάπτυξη, σχεδιασμό, βελτιστοποίηση και υποστήριξη ολοκληρωμένων και καινοτόμων λύσεων για έργα Data Centers για την κάλυψη των αναγκών των πελατών της Schneider Electric. Έχει εργαστεί στην Αγγλία στην εταιρία ABB Τεχνολογίες Αυτοματισμών - Λύσεις για Φυσικοχημικές Διεργασίες, ως μέλος της Ομάδας Ανάπτυξης Καινοτομικών Προϊόντων στο Daresbury Park. Με την επιστροφή του στην Ελλάδα ανέλαβε στη Schneider Electric καθήκοντα Μηχανικού Προδιαγραφών με αντικείμενο την προώθηση των εξοπλισμών / λύσεων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, για Data Centers, για συστήματα διαχείρισης κτηρίων (BMS / Power Monitoring) και για έργα μορφών ΑΠΕ (όπως Φ/Β, Α/Π, βιοάεριο, βιομάζα).