



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τεχνική Έκθεση

**Προσομοίωση και διερεύνηση λειτουργίας αυτόνομου μικροδικτύου
σε δυναμικές και μεταβατικές καταστάσεις**

Συντάχθηκε από

Κυριακή Νεφέλη Μαλαμάκη	Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια ΑΠΘ
Στέλιο Δημουλιά	Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, Υποψήφιο Διδάκτορα ΑΠΘ
Χάρη Δημουλιά	Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, Καθηγητή ΑΠΘ

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2025

Περίληψη

Το παρόν κείμενο παρουσιάζει τα αποτελέσματα του ερευνητικού έργου «Προσομοίωση και διερεύνηση λειτουργίας αυτόνομου μικροδικτύου σε δυναμικές και μεταβατικές καταστάσεις» το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την RENEL ΑΕ και περιλαμβάνει:

1. Μοντελοποίηση του συνόλου ενός μελλοντικού μικροδικτύου (μΔ) σε εξειδικευμένο λογισμικό (PowerFactory της DigSilent).
2. Μοντελοποίηση των πηγών ενέργειας (ΦΒ πάρκο, και συγκρότημα μπαταριών) στην δυναμική και μεταβατική τους συμπεριφορά .
3. Διενέργεια ανάλυσης συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων και προτάσεις για τον συντονισμό των μέσων προστασίας.
4. Διενέργεια προσομοιώσεων δυναμικής συμπεριφοράς του μΔ όπως εκκινήσεις φορτίων, και απότομες μεταβολές φορτίου και προτάσεις για ενδεχόμενα πρόσθετα μέτρα σε περίπτωση αδυναμιών αντιμετώπισης των ανωτέρω δυναμικών καταστάσεων από το προτεινόμενο μίγμα πηγών.
5. Διενέργεια προσομοιώσεων ροής φορτίου σε συχνότητες ανώτερες της θεμελιώδους και προτάσεις για βελτιώσεις στην ποιότητα τάσης εφόσον η τελευταία είναι εκτός των υφιστάμενων προτύπων.

Οι προσομοιώσεις βασίσθηκαν σε κατάλληλα μοντέλα των πηγών για την συγκεκριμένη πλατφόρμα λογισμικού τα οποία ανέπτυξε ο κατασκευαστής τους (Huawei). Το υπόλοιπο δίκτυο προσομοιώθηκε σύμφωνα με μονογραμμικά διαγράμματα που προμήθευσε ο χρηματοδότης.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης δείχνουν ότι

- Το ηλεκτρικό σύστημα του μΔ μπορεί να αντιμετωπίσει συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα χωρίς την χρήση επιπρόσθετων στρεφόμενων μηχανών. Παρατίθενται οι υπολογισμοί ρευμάτων βραχυκύκλωσης τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος προς τους μελετητές του ηλεκτρικού δικτύου για την επιλογή του μεγέθους των αυτόματων διακοπών αλλά και του συντονισμού της επιλεκτικής προστασίας τους. Δίνονται σχετικές συστάσεις.
- Το ηλεκτρικό σύστημα του μΔ μπορεί να αντιμετωπίσει μεγάλες μεταβολές του φορτίου όπως δύσκολες εκκινήσεις σχετικά μεγάλων ηλεκτρικών κινητήρων χωρίς να διαταράσσεται η ποιότητα τάσης.
- Το ηλεκτρικό σύστημα του μΔ δεν θα αντιμετωπίσει θέματα ποιότητας τάσης (αρμονικές τάσης) λόγω της μικρής αρμονικής παραμόρφωσης των τάσεων που παράγουν οι converters των μπαταριών και λόγω της σύνθεσης του ηλεκτρικού δικτύου (καλωδιώσεις). Δεν αναμένονται φαινόμενα συντονισμού σε αρμονικές συχνότητες χαμηλής τάξης.

Η ομάδα έργου αποτελείτο από

Την Δρ. Μαλαμάκη Κυριακή-Νεφέλη, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (THMMY), ΑΠΘ

Τον Στέλιο Δημουλιά, Υποψήφιο Διδάκτορα στο THMMY, ΑΠΘ

Τον Χάρη Δημουλιά, Καθηγητή ΑΠΘ

Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να υπολογισθούν τα αναμενόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε συμμετρικά και ασύμμετρα βραχυκυκλώματα στους επιμέρους πίνακες των διαφόρων ομάδων φορτίων. Μέσω της γνώσης αυτών των ρευμάτων θα μπορεί να γίνει επιλογή των αυτόματων διακοπών στα διάφορα σημεία της εγκατάστασης για την εξασφάλιση της προστασίας και της επιλογικής προστασίας.

Συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης μπορεί να έχουν:

- Οι μπαταρίες με τους μετατροπείς ισχύος τους
- Τα PVs με τους μετατροπείς ισχύος τους
- Οι ηλεκτρικοί κινητήρες εφόσον είναι απ' ευθείας συνδεδεμένοι στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Με δεδομένο το γεγονός ότι η εγκατάσταση αποτελεί ένα αυτόνομο μικροδίκτυο, δεν είναι εφαρμόσιμος ο υπολογισμός των βραχυκυκλωμάτων με βάση πρότυπα όπως IEC 60609, VDE 102, IEC 61363, κλπ, διότι αυτά αναφέρονται σε διασυνδεδεμένα δίκτυα στα οποία κυριαρχούν οι στρεφόμενες μηχανές (σύγχρονες γεννήτριες) οι οποίες έχουν ιδιαίτερη συμπεριφορά σε βραχυκυκλώματα. Για τον λόγο αυτόν, ο υπολογισμός των βραχυκυκλωμάτων έγινε μέσω rms ανάλυσης με βήμα υπολογισμού 1ms.

Ο κατασκευαστής των μπαταριών και των μετατροπέων των PV (Huawei) προμήθευσε στον φορέα έρευνας (ΑΠΘ) τα αναλυτικά μοντέλα τους για χρήση στο λογισμικό PowerFactory 2025 της DigSilent για την διεξαγωγή της σχετικής έρευνας. Τα μοντέλα εμπεριέχουν όλες τις δυνατότητες λειτουργίας, τα όρια λειτουργίας καθώς επίσης και τις εσωτερικές προστασίες των μετατροπέων. Ορισμένες από τις παραμέτρους λειτουργίας, π.χ. το fault-ride-through σε χαμηλή ή υψηλή τάση επιδέχονται παραμετροποίηση. Άλλες παράμετροι όπως π.χ. το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ή η δυνατότητα παραμονής σε σύνδεση σε κατάσταση ασυμμετρίας του δικτύου ενώ δίδονται δεν επιδέχονται παραμετροποίηση διότι είναι κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία άπτονται της προστασίας των μετατροπέων.

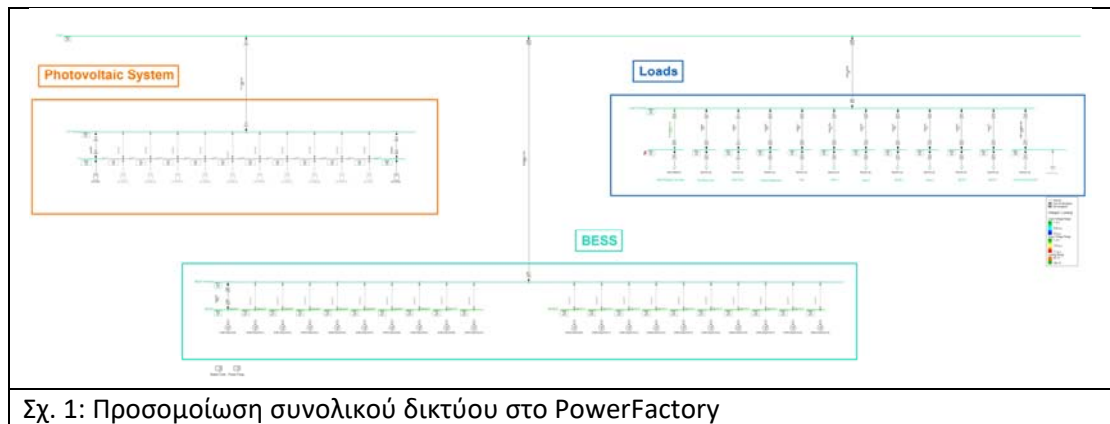
Σημειώνεται ότι οι μετατροπείς των 20 μπαταριών ελέγχονται σαν Grid-formers (Virtual Synchronous Machines-VSM) δηλαδή σαν πηγές τάσης με δυνατότητα ασύμμετρης φόρτισης. Αντίθετα οι μετατροπείς των PVs ελέγχονται σαν πηγές ρεύματος (grid-following mode).

Με δεδομένο ότι όλοι οι κινητήρες στην εγκατάσταση συνδέονται στο δίκτυο μέσω inverter ή soft-starter, δεν συνεισφέρουν με ρεύμα σε βραχυκυκλώματα. Για τον λόγο αυτόν, προσομοιώνονται (για την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων) ως γενικά φορτία συγκεκριμένης ισχύος.

Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης

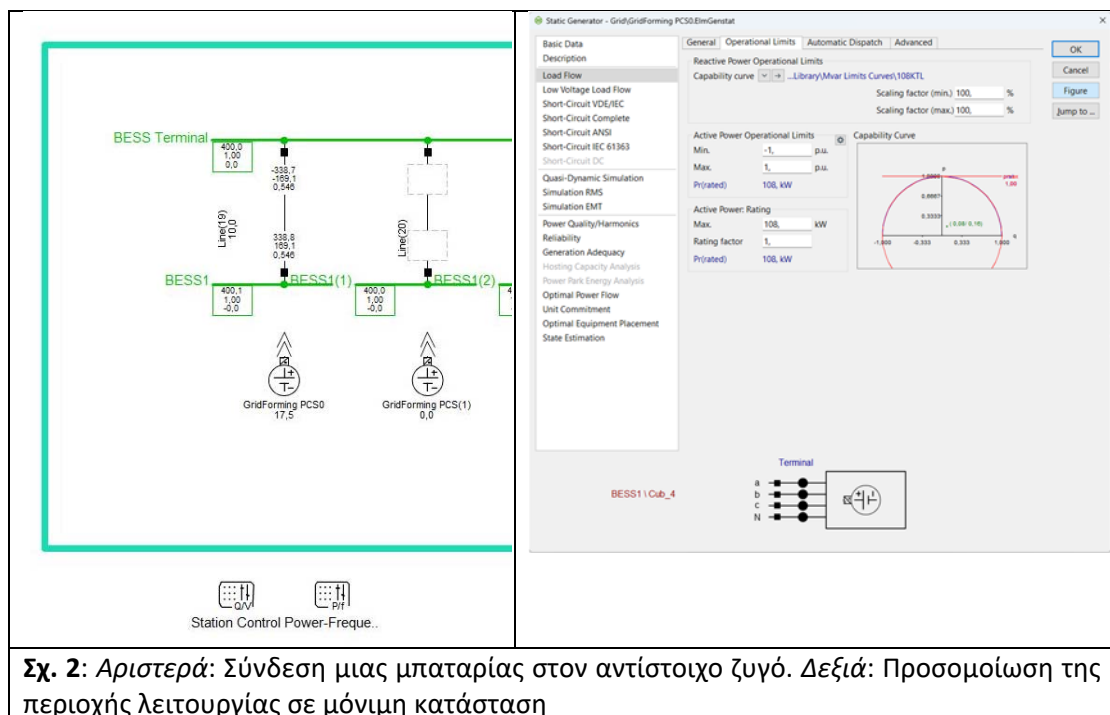
Για την προσομοίωση του συνολικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε σαν βάση το μονογραμμικό διάγραμμα που προμήθευσε ο φορέας χρηματοδότησης (RENEL)¹. Η γενική εικόνα του δικτύου στο PowerFactory φαίνεται στο Σχ. 1. Υπάρχουν τρεις κύριοι ζυγοί 400V: ο ζυγός BESS στον οποίο συνδέονται οι επιμέρους μπαταρίες, ζυγός PV στον οποίο συνδέονται οι επιμέρους δέκα inverters των PVS, και ο ζυγός των φορτίων από τον οποίο αναχωρούν οι καλωδιώσεις στους μερικούς πίνακες των ομάδων φορτίων.

¹ Μονογραμμικό διάγραμμα, αρχείο “D_081_24-SLD-01.pdf”



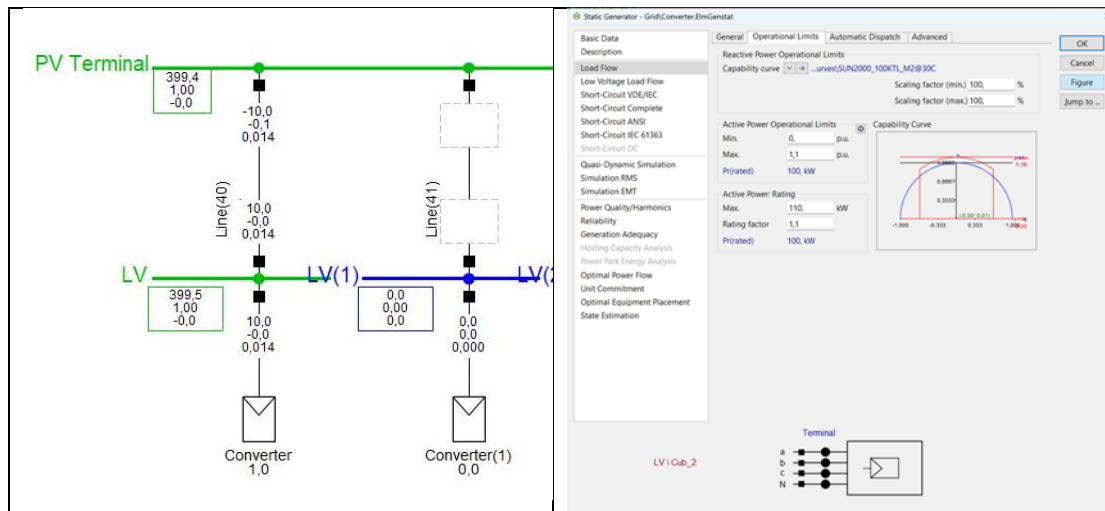
Σχ. 1: Προσομοίωση συνολικού δικτύου στο PowerFactory

Στο Σχ.2 φαίνονται λεπτομέρειες από την προσομοίωση μιας εκ των μπαταριών



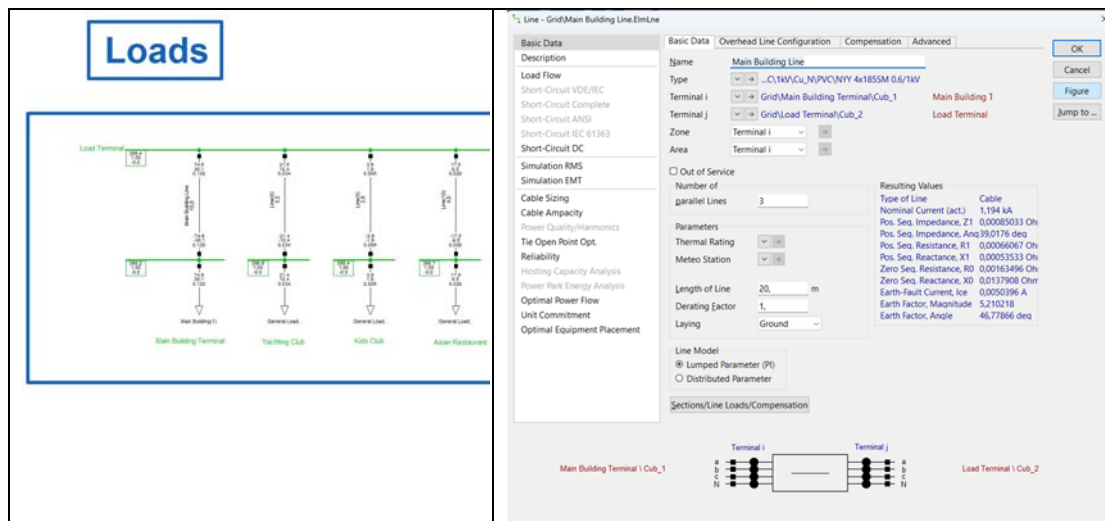
Σχ. 2: Αριστερά: Σύνδεση μιας μπαταρίας στον αντίστοιχο ζυγό. Δεξιά: Προσομοίωση της περιοχής λειτουργίας σε μόνιμη κατάσταση

Τα αντίστοιχα για έναν PV inverter φαίνονται στο Σχ. 3.



Σχ. 3: Αριστερά: Σύνδεση ενός PV inverter στον αντίστοιχο ζυγό. Δεξιά: Προσομοίωση της περιοχής λειτουργίας σε μόνιμη κατάσταση

Στο Σχ. 4 φαίνεται μέρος των φορτίων (υποπίνακες ομάδων φορτίων) που προσομοιώθηκαν σαν σταθερά φορτία. Επίσης φαίνεται και η προσομοίωση του καλωδίου από τον ΓΠΧΤ προς τον υποπίνακα «Main Building Terminal».



Σχ. 4: Αριστερά: Σύνδεση ορισμένων φορτίων στον ζυγό ΓΠΧΤ. Δεξιά: Προσομοίωση της του καλωδίου προς τον υποπίνακα «Main Building Terminal»

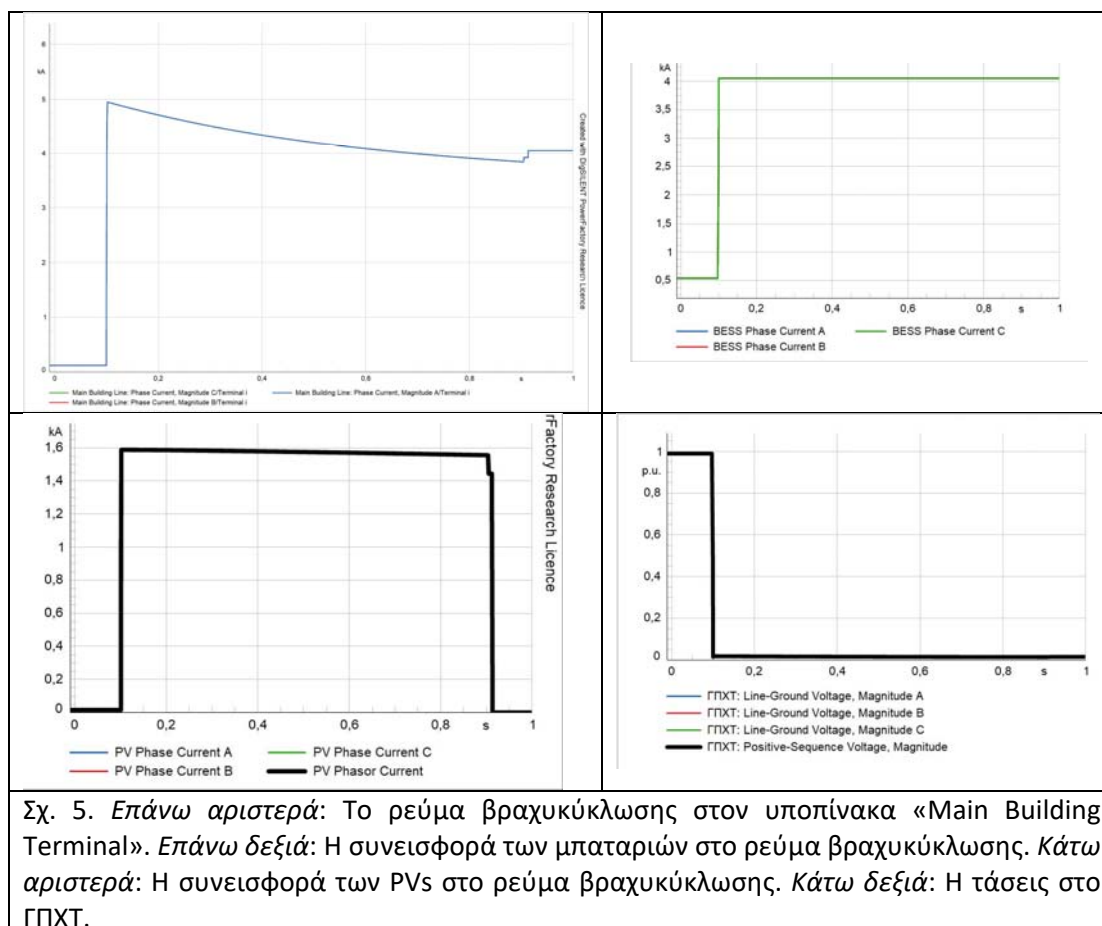
Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Υπολογίσθηκαν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης κατά την εκδήλωση: 3φασικών, 2φασικών και 1φασικών σφαλμάτων. Οι υπολογισμοί έγιναν σε όλους τους υποπίνακες των φορτίων, των inverter των PVs και στον ΓΠΧΤ.

Κατά τις προσομοιώσεις, το σφάλμα υποτίθεται ότι γίνεται στον χρόνο προσομοίωσης $t = 0.1 \text{ s}$ ενώ ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 1 s . Σαν αρχική κατάσταση θεωρήθηκε ένα συνολικό φορτίο $(P, PF) = (348 \text{ kW}, 0.9)$. Σημειώνεται ότι το μέγεθος του φορτίου δεν παίζει ρόλο στο μέγεθος του ρεύματος βραχυκύκλωσης επειδή οι Inverters των μπαταριών διατηρούν την τάση και συχνότητα σταθερή επειδή ελέγχονται σαν VSMs.

Υπολογισμοί έγιναν για αρχικές καταστάσεις όπου η μπαταρία εκφορτίζεται (π.χ. νύχτα) ή όταν φορτίζεται (π.χ. όταν η ισχύς των PV είναι μεγαλύτερη του φορτίου).

Στο Σχ. 5 φαίνονται τα ρεύματα κατά το 3φασικό (συμμετρικό) βραχυκύκλωμα στον υποπίνακα του φορτίου «Main Building Terminal» με αρχική συνθήκη όπου τα PV είχαν ελάχιστη παραγωγή (~10kW στο σύνολο).



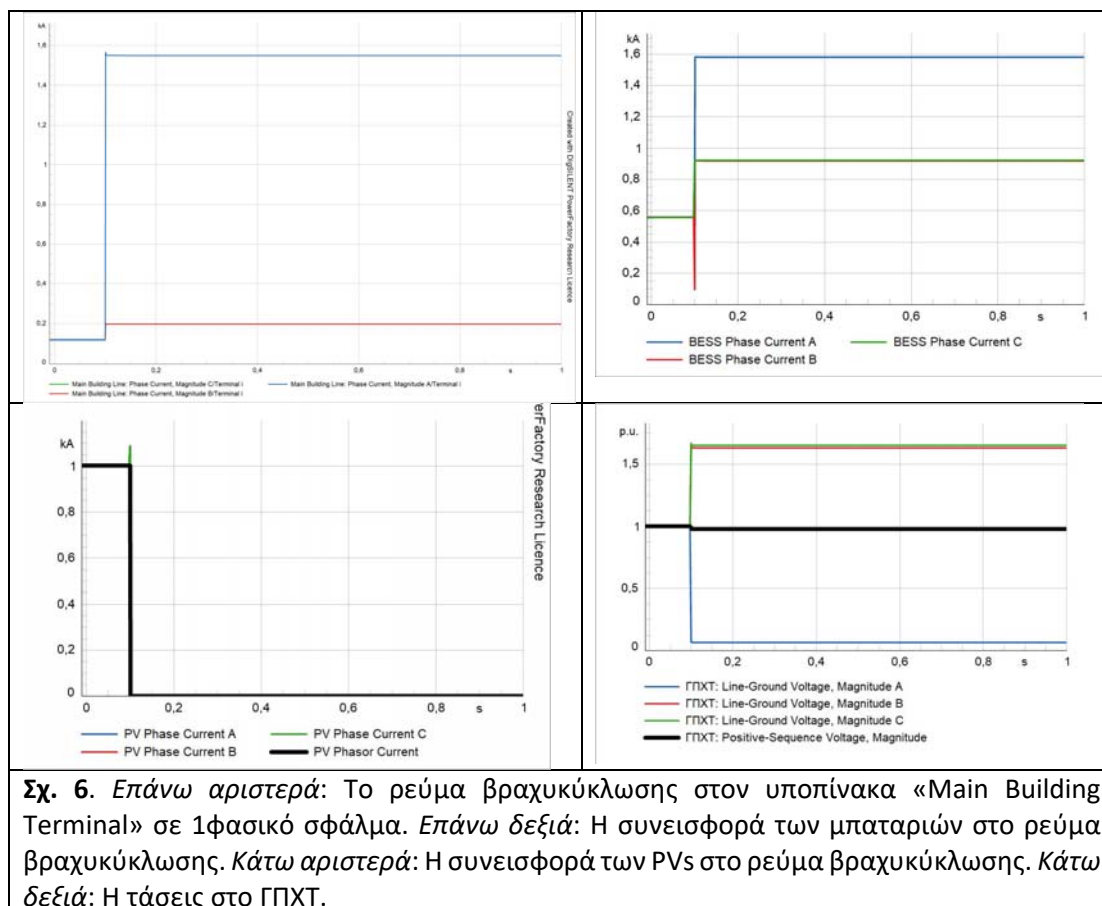
Παρατηρούμε ότι για ένα χρονικό διάστημα ~0,8s τα PVs συνεισφέρουν σε ρεύμα (άεργο ρεύμα) λόγω του FTR στο οποίο έχουν ρυθμισθεί ενώ μετά αποσυνδέονται. Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι της τάξης των 4kA και με αυτό θα πρέπει να λειτουργήσει το στιγμιαίο στοιχείο του διακόπτη στον συγκεκριμένο πίνακα μέσα σε 0,3-0,4 s.

Υπολογισμοί δείχνουν ότι, στην περίπτωση που στην αρχική κατάσταση τα PVs παρήγαγαν 700kW και επομένως τροφοδοτούσαν όλο το φορτίο και φόρτιζαν τις μπαταρίες, η συνεισφορά τους σε ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ήταν μεγαλύτερη (λόγω συνεισφοράς και σε ενεργό ρεύμα) με αποτέλεσμα το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης να φτάσει τα 5.5 kA.

Επομένως η δυσμενέστερη περίπτωση αντιστοιχεί σε λειτουργία νύχτας, δηλαδή μηδενική παραγωγή από PVs. Για τον λόγο αυτόν, όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αναφέρονται σε αρχικές συνθήκες με μηδενική ισχύ PVs.

Η περίπτωση του 1φασικού (φάση-ουδέτερος-γη) σφάλματος στον πίνακα «Main Building Terminal» φαίνεται στο Σχ. 6. Η αντίσταση σφάλματος θεωρήθηκε 0.01Ω. Παρατηρούμε ότι

το ρεύμα στην φάση που έγινε το σφάλμα γίνεται 1.55 kA ενώ στις δύο υγιείς φάσεις γίνεται 198 A.

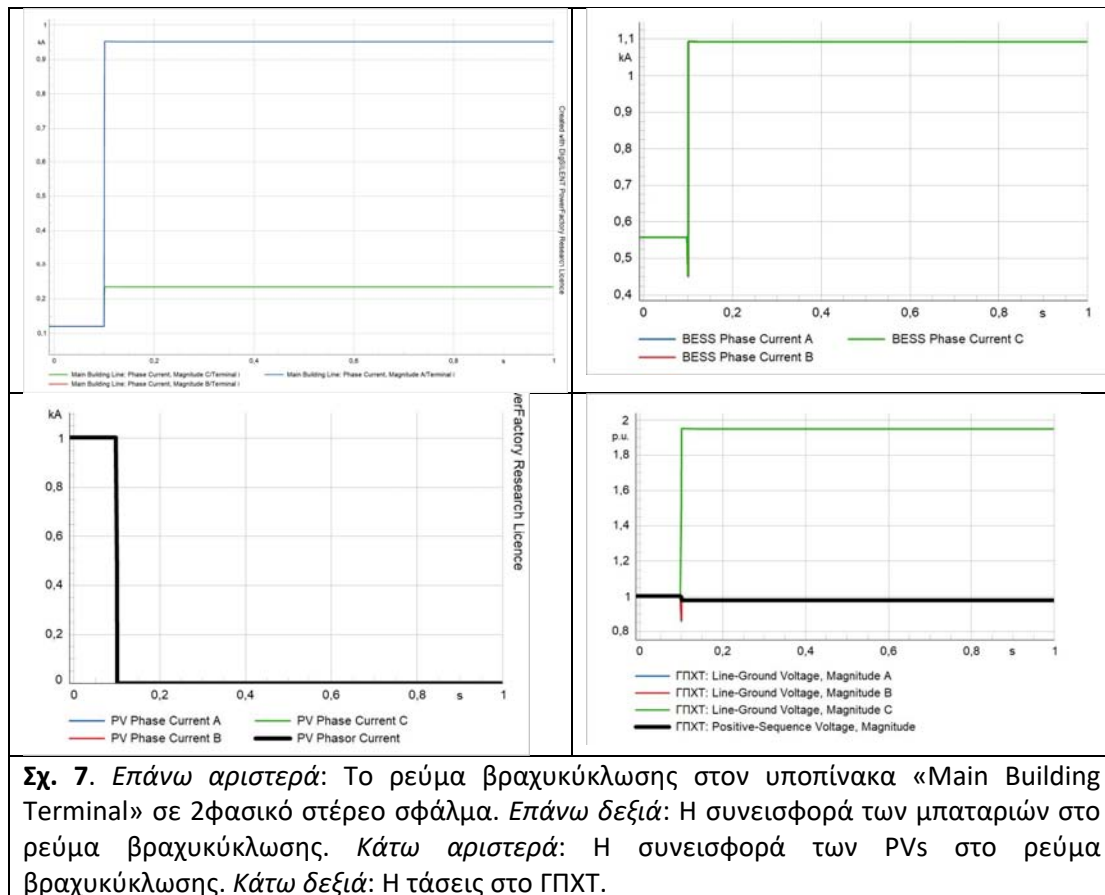


Σχ. 6. Επάνω αριστερά: Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στον υποπίνακα «Main Building Terminal» σε 1φασικό σφάλμα. Επάνω δεξιά: Η συνεισφορά των μπαταριών στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κάτω αριστερά: Η συνεισφορά των PVs στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κάτω δεξιά: Η τάσεις στο ΓΠΧΤ.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική αύξηση των υγιών τάσεων στον ΓΠΧΤ-οι φασικές τάσεις ανυψώνονται στο 1,65pu. Είναι η αντίστοιχη περίπτωση 1φασικού σφάλματος στους ακροδέκτες σύγχρονης γεννήτριας. Επειδή οι converters των μπαταριών ελέγχονται σαν VSMs, η παραπάνω συμπεριφορά είναι αναμενόμενη

Η σημαντική ασυμμετρία των τάσεων προκαλεί αποσύνδεση των PVs (στην περίπτωση φυσικά που αυτά ήταν συνδεδεμένα) όπως φαίνεται στο κάτω αριστερά μέρος του Σχ. 6. Επομένως, σε ασύμμετρα σφάλματα, μόνον οι converters των μπαταριών συνεισφέρουν σε ρεύμα βραχυκύκλωσης

Η περίπτωση του 2φασικού (μεταξύ φάσεων a-b χωρίς συμμετοχή γης) στέρους σφάλματος εξετάζεται στο Σχ. 7. Παρατηρούμε και εδώ την αποσύνδεση των PVs. Το ρεύμα στις φάσεις a-b γίνεται 951 A ενώ στην υγιή φάση 234 A (120 A προ του σφάλματος). Οι τάσεις στις φάσεις a-b μειώνονται στο 0,97pu ενώ στην υγιή ανυψώνεται στο 1,95pu.

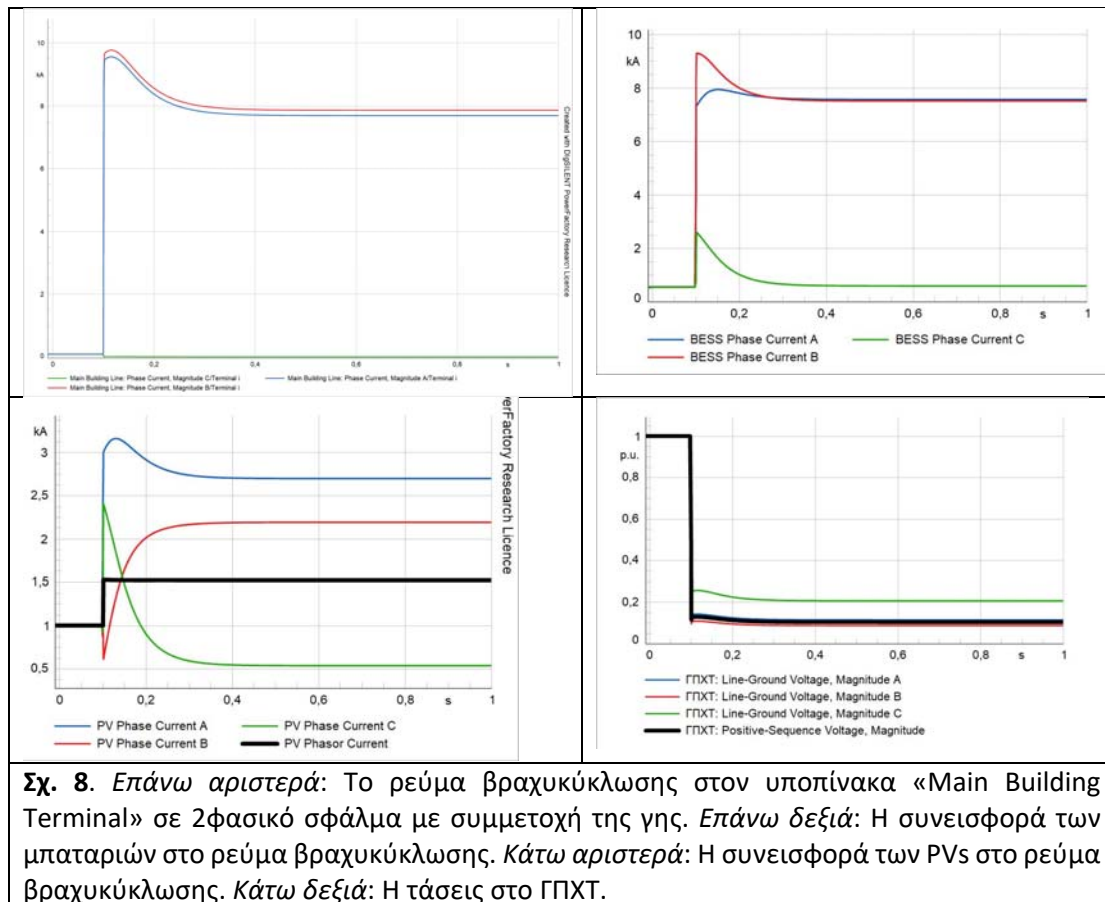


Σχ. 7. Επάνω αριστερά: Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στον υποπίνακα «Main Building Terminal» σε 2φασικό στέρεο σφάλμα. Επάνω δεξιά: Η συνεισφορά των μπαταριών στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κάτω αριστερά: Η συνεισφορά των PVs στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κάτω δεξιά: Η τάσεις στο ΓΠΧΤ.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εάν το 2φασικό σφάλμα συμπεριλαμβάνει και την γείωση, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά σε αρκετό βαθμό όπως φαίνεται στο Σχ. 8.

Αρχικά παρατηρούμε ότι λόγω της μικρότερης ασυμμετρίας και ανύψωσης των τάσεων, τα PVs συμμετέχουν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στις φάσεις a-b γίνεται πολύ μεγαλύτερο (~7,7 kA) ενώ δεν παρατηρείται ανύψωση της τάσης.

Στην περίπτωση 2φασικού σφάλματος με γη αλλά κατά την διάρκεια της νύχτας (αποσυνδεδεμένα PVs) μπορεί να αποδειχθεί ότι τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι λίγο μικρότερα (~7kA) αλλά και πάλι σημαντικά μεγαλύτερα σε σχέση με το 2φασικο σφάλμα χωρίς γη. Επομένως από άποψη προστασίας το 2φασικό σφάλμα χωρίς γη είναι δυσμενέστερη περίπτωση. Για τον λόγο αυτό τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται σε 2φασικά σφάλματα χωρίς γη.



Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 1 και αφορούν σε 3φασικά, 2φασικά χωρίς γη και 1φασικά φάσης-ουδετέρου με αντίσταση σφάλματος 0,01Ω. Με βάση τα ανωτέρω, η δυσμενέστερη περίπτωση (μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης) αντιστοιχεί στην απουσία των PVs.

Πίνακας	Ρεύμα βραχυκύκλωσης, A			Μέγιστη φασική τάση στις υγιείς φάσεις, pu	
	3φ	2φ	1φ	2φ	1φ
Main Building Terminal	4000	951	1550	1,95	1,65
Yachting Club	3937	894	1329	1.90	1.54
Kids Club	4000	923	1450	1.93	1.61
Asian Restaurant	3920	887	1300	1.89	1.52
Spa	3924	888	1305	1.89	1.52
Area 1	3850	857	1198	1.86	1.49
Area 2	3923	887	1305	1.89	1.54
MCR 3	3955	902	1360	1.90	1.55
Area 3	3923	887	1305	1.89	1.54
MCR1	3973	910	1393	1.91	1.57
MCR2	3967	908	1383	1.91	1.56
Water Facilities	3911	884	1250	1.87	1.48
ΓΠΧΤ	4053	1094	1593	1.66	1.95

Τα ανωτέρω στοιχεία έχουν σαν στόχο την σωστή επιλογή των αυτόματων διακοπών και τον συντονισμό της επιλογικής προστασίας σε όλη την εγκατάσταση. Φαίνεται ότι το μέγεθος των Inverters των μπαταριών και η μεθοδολογία ελέγχου τους σε ασύμμετρη φόρτιση μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά ρεύματα βραχυκύκλωσης για τη εκκαθάριση σφαλμάτων με συμβατικούς διακόπτες χωρίς να απαιτείται η χρήση επιπρόσθετων πηγών (synchronous condensers ή HZ). Σε περίπτωση παράλληλης λειτουργίας των HZ, τα συνολικά ρεύματα βραχυκύκλωσης προφανώς θα είναι μεγαλύτερα και υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις επιλογικής προστασίας.

Σύσταση 1: Λόγω της ανάπτυξης υπερτάσεων σε ασύμμετρα σφάλματα θα πρέπει η επιλογή των διακοπών να οδηγεί σε εκκαθάριση σφαλμάτων σε χρόνους μικρότερους του 0,5-1,0 s. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη ρύθμιση των στοιχείων στιγμιαίας λειτουργίας των διακοπών.

Σύσταση 2: Έχει παρατηρηθεί από τα μονογραμμικά σχέδια ότι η επιλογή των διακοπών έγινε με βάση την αντοχή των καλωδίων και όχι με βάση το μέγεθος του αναμενόμενου ταυτοχρονισμένου φορτίου. Η επιλογή των διακοπών με βάση το δεύτερο (δηλαδή μικρότεροι διακόπτες) θα οδηγούσε σε καλύτερο συντονισμό της επιλεκτικότητας της προστασίας.

Σύσταση 3: Σε κάθε κτίριο του συγκροτήματος θα πρέπει να κατασκευασθεί θεμελιακή γείωση και όλες οι θεμελιακές γειώσεις να ενωθούν μεταξύ τους με αγωγούς (όπως π.χ. γίνεται σε εκτεταμένα υπαίθρια ΦΒ πάρκα) έτσι ώστε η πιθανή αντίσταση γείωσης να είναι πραγματικά πολύ μικρή. Τούτο είναι αναγκαίο για την εξασφάλιση ρευμάτων βραχυκύκλωσης του ανωτέρω πίνακα με δεδομένο ότι: (1) η τάση λειτουργίας του συστήματος είναι μικρή (400 V) και (2) η κύρια πηγή (converters μπαταριών) περιορίζει γρήγορα το ρεύμα βραχυκύκλωσης στα ονομαστικά στοιχεία για λόγους προστασία των converters.

Αντιμετώπιση μεγάλων μεταβολών του φορτίου

Στην ενότητα αυτή διερευνάται η ικανότητα των πηγών να αντιμετωπίσουν απότομες και μεγάλες αλλαγές στο φορτίο. Σαν τέτοιες θεωρήθηκαν οι εκκινήσεις ασύγχρονων κινητήρων.

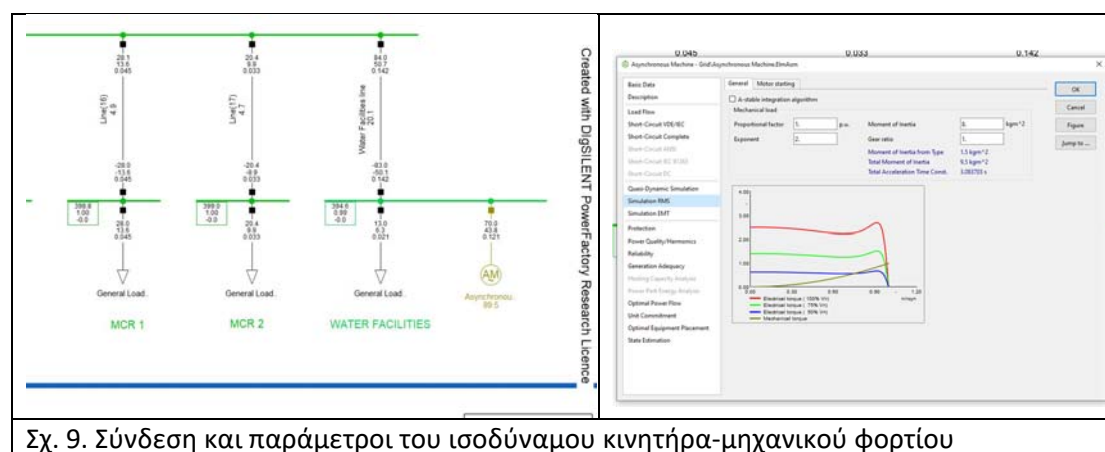
Για την δημιουργία της δυσμενέστερης κατάστασης έγιναν οι εξής υποθέσεις:

1. οι κινητήρες εκκινούν με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο. Η παραδοχή αυτή οδηγεί στα μέγιστα πιθανά ρεύματα εκκίνησης και επομένως στις μέγιστες πιθανές πτώσεις τάσης στο δίκτυο. Στην πραγματικότητα η παραδοχή αυτή είναι φανταστική διότι, σύμφωνα με τον μελετητή των ΗΜ, όλοι οι κινητήρες θα συνδέονται στο δίκτυο μέσω drives ή soft-starter εξασφαλίζοντας πολύ ομαλότερες εκκινήσεις.
2. Οι κινητήρες εκκινούν ταυτόχρονα. Στο σημείο αυτό θεωρήθηκε ένας ισοδύναμος ασύγχρονος κινητήρας ισχύος 70 και 150 kW για να προσομοιώσει την ταυτόχρονη εκκίνηση πολλών μικρότερων κινητήρων. Το μέγεθος των 70kW θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό για την αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και ισχύος λειτουργίας του συνολικού φορτίου. Η ισχύς των 150 kW επιλέχθηκε για να αντιπροσωπεύσει μια εξαιρετικά δυσμενή-και επομένως απίθανη-περίπτωση.

Στόχος των προσομοιώσεων ήταν να διερευνηθεί η ικανότητα εκκίνησης τέτοιων κινητήρων και η πτώση τάσης που αναμένεται στον ΓΠΧΤ, δηλαδή η τάση που εμφανίζεται σε όλα τα υπόλοιπα φορτία αλλά και στους PV inverters.

Η αντιμετώπιση μιας τέτοιας μεταβολής θεωρείται επιτυχής όταν ο κινητήρας φτάσει στην αναμενόμενη περιστροφική ταχύτητα και η τάση στο ζυγό του ΓΠΧΤ είναι μεγαλύτερη από 0,8 ρυ. Το τελευταίο υποδηλώνει και το όριο για χαρακτηρισμό της δυναμική μεταβολής ως μεταβολή φορτίου ή ύπαρξη σφάλματος. Σημειώνεται ότι το όριο των 0,8ρυ στην τάση θα εισαχθεί σαν παράμετρος τόσο στους PV inverters όσο και στους converters των μπαταριών για τον έλεγχό τους σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας ή σε λειτουργία FRT.

Στο Σχ. 9 φαίνεται η προσομοίωση του ισοδύναμου κινητήρα στον υποπίνακα Water Facilities και οι παράμετροι του κινητήρα και του φορτίου.



Σχ. 9. Σύνδεση και παράμετροι του ισοδύναμου κινητήρα-μηχανικού φορτίου

Ο κινητήρας έχει ονομαστικά στοιχεία: 75kW, 0.4kW, D, 2πολικός, και αντιστοιχεί σε κινητήρα από την βιβλιοθήκη του PowerFactory με κατασκευαστή την Siemens. Το μηχανικό φορτίο αντιστοιχεί σε αντλία και εσκεμμένα τέθηκε συνολική ροπή αδράνειας $J = 8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ έτσι ώστε η χρονική σταθερά επιτάχυνσης να είναι σχετικά μεγάλη: $\cong 3\text{s}$.

Στο Σχ. 10 φαίνεται η διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα με τις ακόλουθες αρχικές συνθήκες:

- Συνολικό φορτίο συστήματος 349 kW, PF=0.89
- Φορτίο κινητήρα 70kW
- Απουσία PVs (όλη η ισχύς και η εκκίνηση καλύπτεται από τις μπαταρίες)
- Η εκκίνηση ξεκινά στο χρόνο προσομοίωσης $t=0$

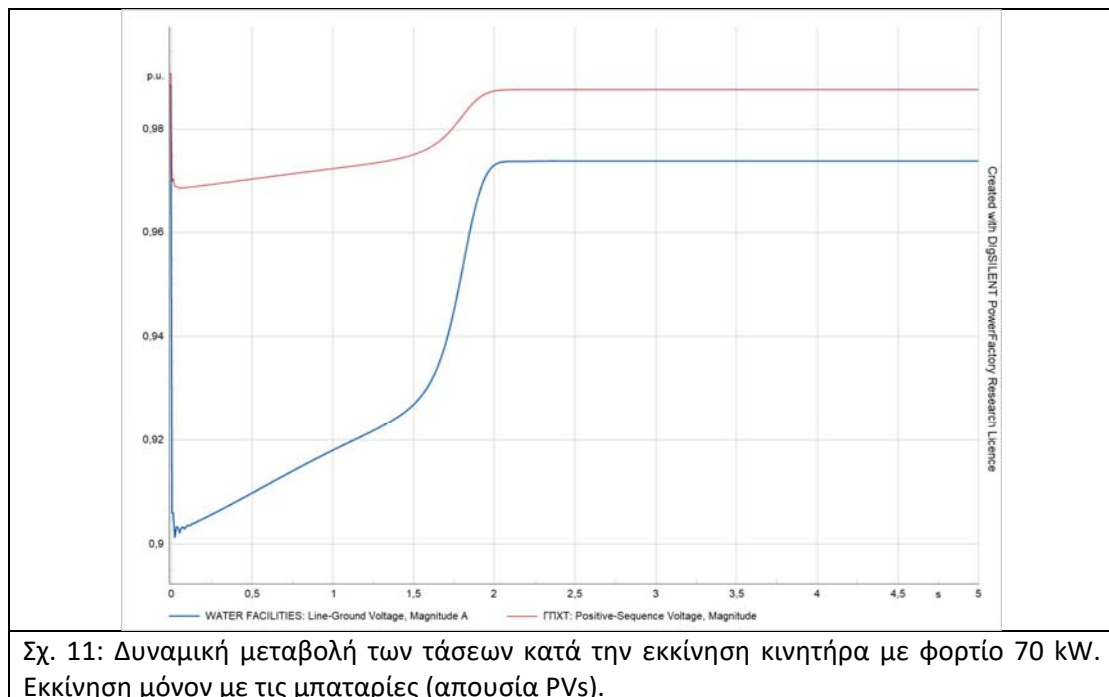
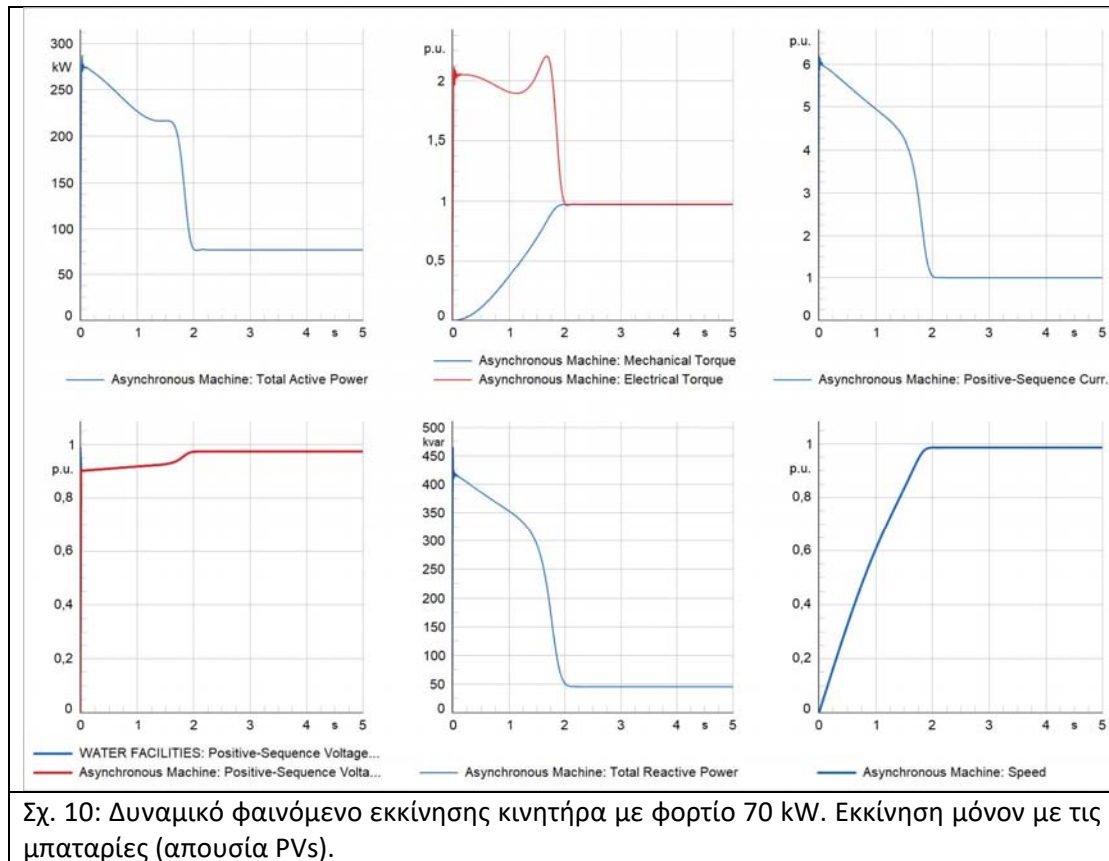
Παρατηρούμε ότι το αρχικό ρεύμα εκκίνησης ανέρχεται σε 6 ρυ (ισοδυναμεί σε αρχική ισχύ κινητήρα 270 kW). Κινητήρας εκκινεί σε λιγότερο από 2s (χρόνος για φτάσει στην μόνιμη περιστροφική ταχύτητα).

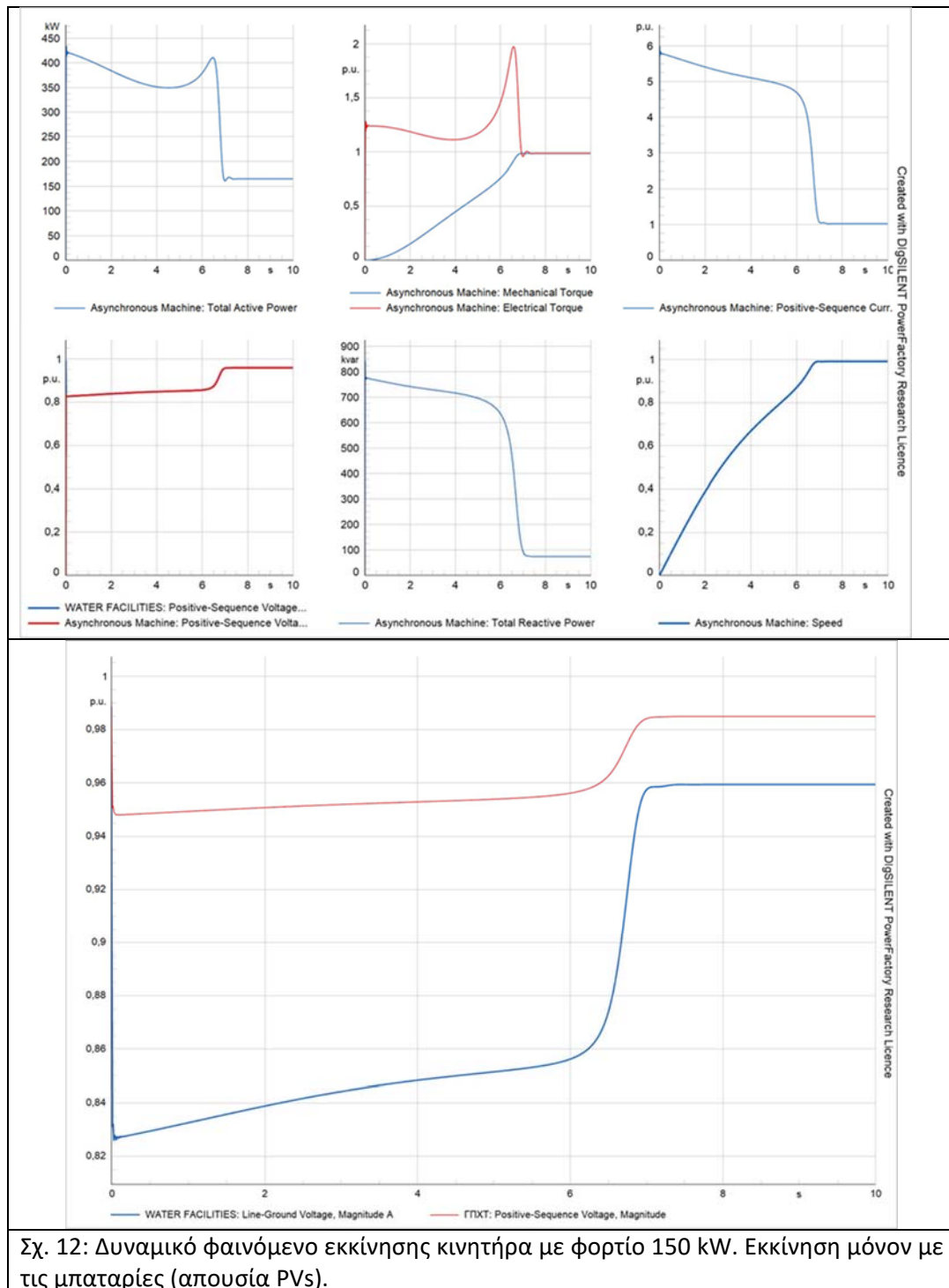
Στο Σχ. 11 φαίνονται οι τάσεις στον ΓΠΧΤ και στον υποπίνακα που τροφοδοτεί τον ισοδύναμο κινητήρα (water facilities) κατά την διάρκεια της εκκίνησης. Παρατηρούμε ότι η τάση στον υποπίνακα στιγμιαία βυθίζεται στα 0.9 ρυ (αρχική τιμή 0.99 ρυ) ενώ στον ΓΠΧΤ βυθίζεται στιγμιαία στα 0.97 ρυ (αρχική τιμή 1.0 ρυ).

Η αντίστοιχη περίπτωση με κινητήρα 150 kW φαίνεται στο Σχ. 12. Παρατηρούμε ότι η εκκίνηση (με τις ανάλογες παραμέτρους του μηχανικού φορτίου) διαρκεί περίπου 7s ενώ η

στιγμιαία βύθιση της τάσης στον υποπίνακα water facilities είναι στο 0.83 pu ενώ στον ΓΠΧΤ είναι στο 0.95 pu.

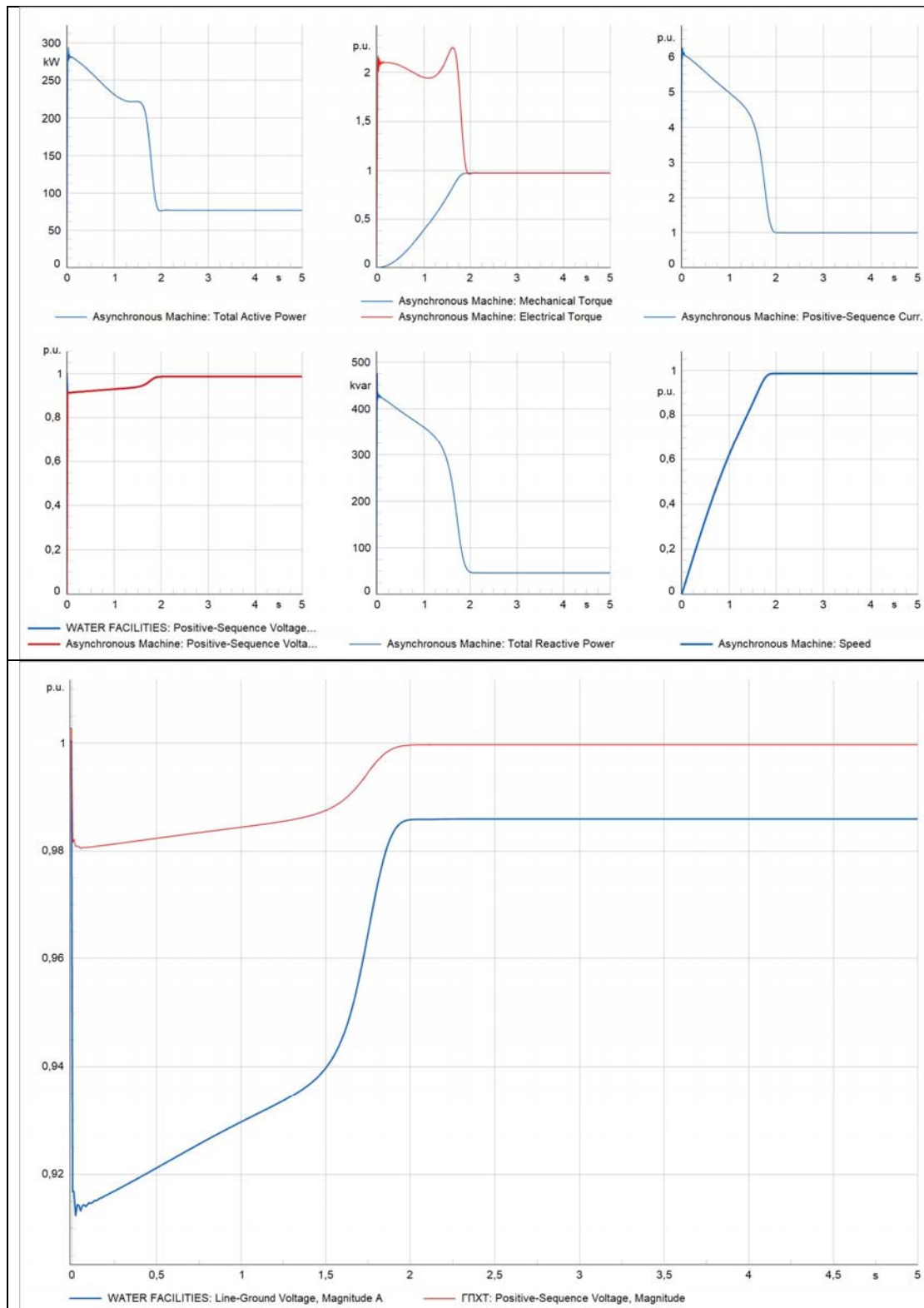
Συμπέρασμα: Το σύστημα έχει την δυνατότητα να ανταπεξέλθει επιτυχώς και ταυτοχρονισμένες εκκινήσεις πολλών κινητήρων με ισοδύναμη ισχύ σχετικά μεγάλη (150 kW) με απ' ευθείας ζεύξη στο δίκτυο χωρίς οι τάσεις στον ΓΠΧΤ να μειώνονται πέραν του 0.8 pu.





Σχ. 12: Δυναμικό φαινόμενο εκκίνησης κινητήρα με φορτίο 150 kW. Εκκίνηση μόνον με τις μπαταρίες (απουσία PVs).

Στην περίπτωση που τα PVs είναι ενεργά, η διαδικασία της εκκίνησης είναι ηπιότερη λόγω της συνεισφοράς των PVs στο ρεύμα εκκίνησης. Μια τέτοια διαδικασία εκκίνησης με μηχανικό φορτίο 70 KW φαίνεται στο Σχ. 13 όπου, κατά τις αρχικές συνθήκες, τα PVs παράγουν 700 kW και επομένως καλύπτουν όλο το φορτίο και φορτίζουν τις μπαταρίες με ισχύ περίπου 350 kW. Παρατηρούμε ότι σε αυτήν την περίπτωση η στιγμιαίες βυθίσεις στον υποπίνακα water facilities και στον ΓΠΧΤ είναι αντίστοιχα στο 0.91 pu και 0.98 pu, δηλαδή σημαντικά μικρότερες από την περίπτωση του Σχ. 11.



Σχ. 13: Δυναμικό φαινόμενο εκκίνησης κινητήρα με μηχανικό φορτίο 70 kW. Εκκίνηση με PVs ενεργά και μπαταρία σε κατάσταση φόρτισης.

Διερεύνηση εμφάνισης συντονισμών στην ηλεκτρική εγκατάσταση της Διαπόρου

1 Εισαγωγή

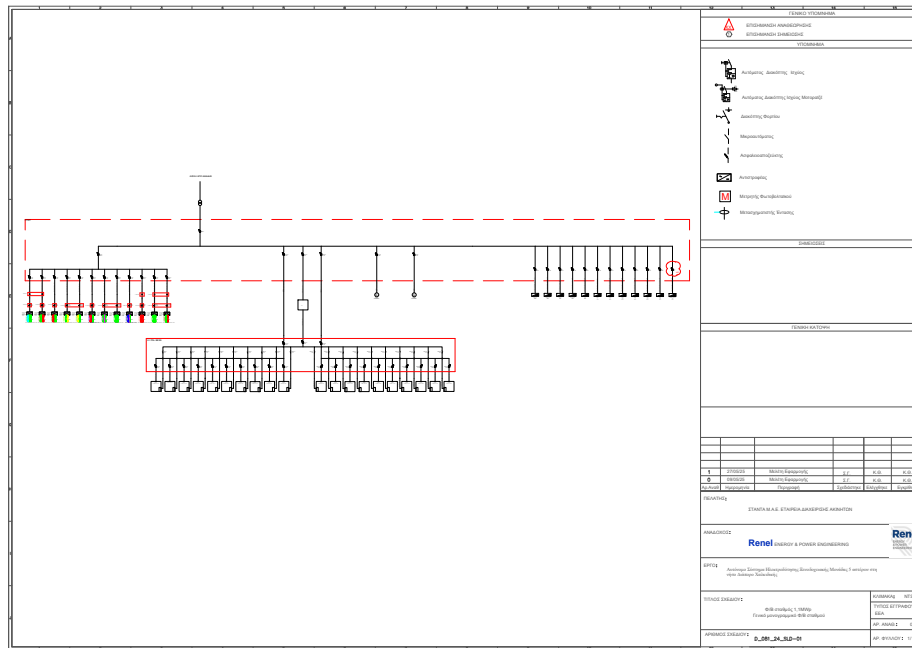
Η παρούσα τεχνική έκθεση εξετάζει το ενδεχόμενο εμφάνισης φαινομένων συντονισμού στο αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλής τάσης (XT) του ξενοδοχειακού συγκροτήματος της νήσου Διαπόρου. Η εν λόγω διερεύνηση κρίνεται σημαντική λόγω της πληθώρας πηγών εμφάνισης τάσεων και ρευμάτων σε αρμονικές συχνότητες, όπως οι μετατροπείς ενέργειας και τα μη γραμμικά φορτία. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού ανάλυσης και προσομοίωσης ηλεκτρικών δικτύων DIgSILENT Powerfactory.

Το συνολικό ηλεκτρικό δίκτυο της εγκατάστασης απεικονίζεται στο μονογραμμικό σχέδιο του Σχήματος 1. Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό δίκτυο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκές (Φ/Β) μονάδες, συστοιχίες ηλεκτροχημικών μπαταριών και φορτία. Οι Φ/Β μονάδες συζεύγονται με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω grid-following μετατροπών, ενώ οι μπαταρίες μέσω grid-forming μετατροπών. Τα φορτία και οι μετατροπείς των Φ/Β μονάδων συνδέονται απευθείας στον γενικό πίνακα XT (ΓΠΧΤ) της συνολικής εγκατάστασης, ο οποίος αποτελεί τον κύριο ηλεκτρικό ζυγό. Οι μετατροπείς των μπαταριών συνδέονται σε έτερο ζυγό, ο οποίος φέρει την ονομασία LV PNL BESS (Σχήμα 1).

Τα επιμέρους τμήματα της ηλεκτρικής εγκατάστασης παρουσιάζονται με υψηλότερη ευκρίνεια στα Σχήματα 2-5. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 2 παρουσιάζει το μονογραμμικό σχέδιο της εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων, το Σχήμα 3 παρουσιάζει το μονογραμμικό σχέδιο της εγκατάστασης των φορτιών, ενώ τα Σχήματα 4-5 παρουσιάζουν την εγκατάσταση των μπαταριών. Στα σχήματα αναγράφεται ο τύπος και το μήκος κάθε καλωδίου της εγκατάστασης.

2 Υπολογισμός ηλεκτρικών παραμέτρων καλωδίων

Η διερεύνηση εμφάνισης φαινομένων συντονισμού προαπαιτεί τον υπολογισμό των ηλεκτρικών παραμέτρων των καλωδίων της εγκατάστασης, ήτοι της ωμικής αντίστασης ανά μονάδα μήκους R (Ω/km), της επαγωγικής αντίδρασης ανά μονάδα μήκους X (Ω/km) και της χωρητικής επιδεκτικότητας ανά μονάδα μήκους B ($\mu\text{S}/\text{km}$).



Σχήμα 1: Μονογραμμικό σχέδιο της συνολικής ηλεκτρικής εγκατάστασης.

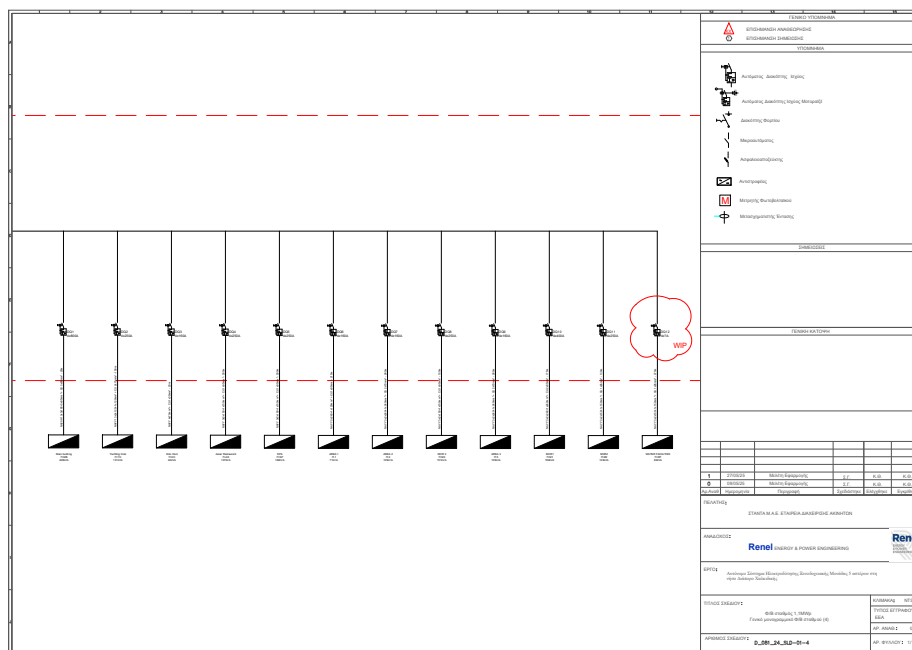
Οι εν λόγω ηλεκτρικές παράμετροι εξαρτώνται από το πάχος και το υλικό των αγωγών, καθώς επίσης και από την γεωμετρική διάταξη τους και το μονωτικό υλικό του καλωδίου. Τονίζεται ότι τα γεωμετρικά στοιχεία όσον αφορά την διάταξη και τις αποστάσεις των αγωγών εντός των καλωδίων δύναται να διαφοροποιούνται μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών του ίδιου τύπου καλωδίου. Ακόμη, συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν τιμή μόνο για την ωμική αντίσταση υπό συνεχές ρεύμα σε θερμοκρασία 20 °C. Ως εκ τούτου, ελλείψει ακριβών κατασκευαστικών παραμέτρων, πραγματοποιήθηκαν εύλογες θεωρήσεις όσον αφορά την γεωμετρία των καλωδίων, ώστε να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της επαγωγικής αντίδρασης και της χωρητικής επιδεκτικότητας.

Οι μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού της επαγωγικής αντίδρασης και της χωρητικής επιδεκτικότητας παρουσιάζονται στις εξισώσεις (1)-(2).

$$X = \omega \cdot \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{GMD}{GMR}\right) \cdot 1000 \quad (1)$$

$$B = \omega \cdot \frac{2\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_o}{\ln\left(\frac{GMD}{r_{out}}\right)} \cdot 10^9 \quad (2)$$

Στις εξισώσεις (1)-(2), ω είναι η γωνιακή συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, για την οποία ισχύει ότι $\omega = 2\pi f$, όπου f η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου.



Σχήμα 3: Μονογραμμικό σχέδιο φορτίων.

εκ τούτου, τα προκύπτοντα αποτελέσματα είναι συντηρητικά και βρίσκονται στην ασφαλή πλευρά των εκτιμήσεων.

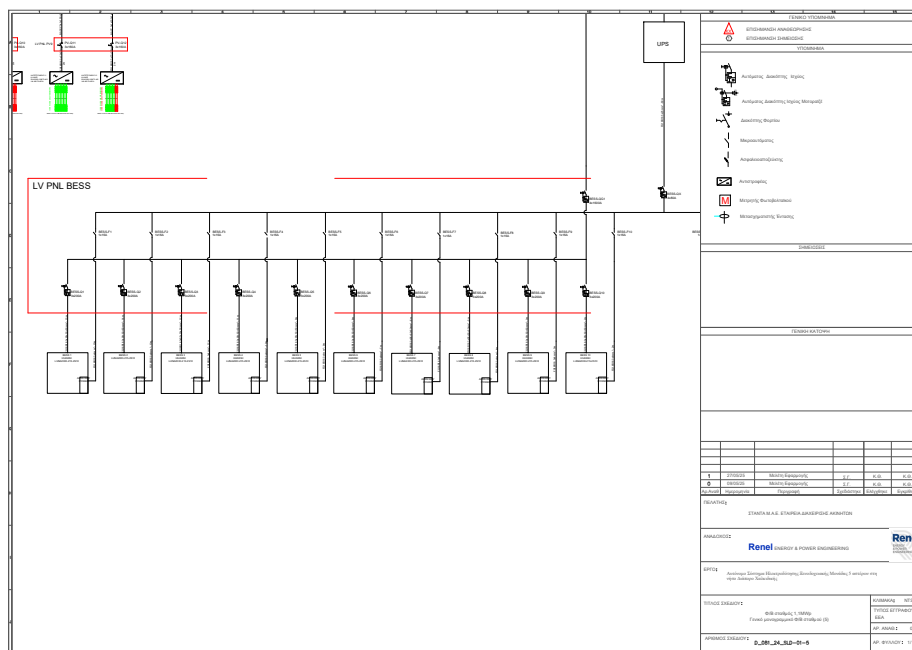
Όσον αφορά την διάταξη των αγωγών, θεωρείται ότι οι αγωγοί βρίσκονται σε διάταξη κανονικού πολυγώνου (τριγώνου, τετραγώνου ή πενταγώνου, αναλόγως του αριθμού των αγωγών εντός του καλωδίου). Παρόμοια θεώρηση πραγματοποιείται και για την περίπτωση πολλαπλών μονοπολικών καλωδίων σε ένα κύκλωμα.

Οι ηλεκτρικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση παρατίθενται στον Πίνακα 1.

3 Διερεύνηση συντονισμών

Η διερεύνηση εμφάνισης συντονισμών γίνεται μέσω προσομοίωσης του δικτύου στο λογισμικό DIGSILENT Powerfactory και υπολογισμού της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του δικτύου ως προς κρίσιμους κόμβους της εγκατάστασης. Οι κόμβοι αυτοί είναι ο ΓΠΧΤ και ζυγός ζεύξης των μπαταριών LV PNL BESS.

Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου της εγκατάστασης, όπως αυτή φαίνεται από τους κόμβους ΓΠΧΤ και LV PNL BESS, για διαφορετικές αρμονικές συχνότητες. Κατά τις προδιαγραφές του προτύπου EN50160, εξετάζεται το εύρος από την θεμελιώδη μέχρι την 50η αρμονική (2500 Hz). Η πιθανή εμφάνιση συντονισμού θα σήμαινε ότι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου, σε έναν ή και στους δύο εξεταζομένους κόμβους, θα αυξανόταν



Σχήμα 4: Μονογραμμικό σχέδιο μπαταριών (1).

υπερβολικά για κάποια συγκεκριμένη αρμονική συχνότητα. Το φαινόμενο αυτό δύναται να προκληθεί λόγω της ταυτόχρονης ύπαρξης επαγωγικών αντιδράσεων και χωρητικών επιδεκτικότητας σε ένα δίκτυο και της μεταβλητότητας αυτών ως συνάρτηση της συχνότητας. Μια υψηλή σύνθετη αντίσταση δύναται να προκαλέσει υπέρταση στην συχνότητα εμφάνισής της και αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης.

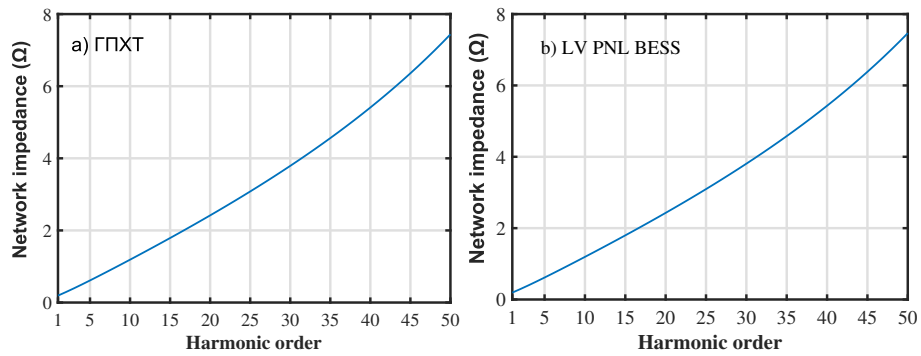
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του δικτύου ως προς τους εξεταζόμενους κόμβους. Όπως παρατηρείται, για καμία εκ των 50 πρώτων αρμονικών δεν εμφανίζεται υπερβολική αύξηση της σύνθετης αντίστασης. Αντιθέτως, η σύνθετη αντίσταση ακολουθεί ομαλή, γνησίως μονότονη αύξηση ως συνάρτηση της συχνότητας. Επομένως, δεν τίθεται θέμα πρόκλησης συντονισμών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Ως περαιτέρω διερεύνηση, η ίδια ανάλυση επαναλαμβάνεται αλλά με τις χωρητικότητες των καλωδίων αυξανόμενες πολλαπλασιαστικά κατά κάποιον παράγοντα. Στόχος της ανάλυσης αυτής είναι να προσδιορισθεί το θεωρητικό ποσοστό αύξησης των χωρητικότητας το οποίο θα οδηγούσε σε οριακή πρόκληση συντονισμού, κοντά στην 48η ή την 49η αρμονική συχνότητα.

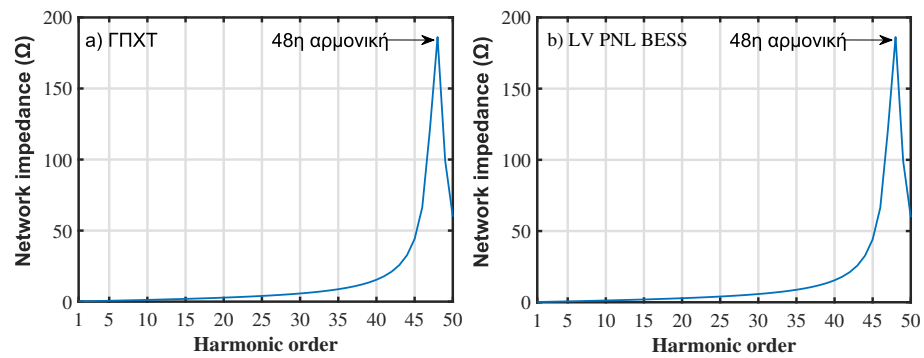
Από την ανάλυση προκύπτει ότι πενταπλασιάζοντας τις επιδεκτικότητες των καλωδίων, προκύπτει συντονισμός στην 48η αρμονική, όπως διαφαίνεται στο Σχήμα 7. Όπως παρατηρείται, για συχνότητες περίξ της 48ης αρμονικής, η ισοδύναμη αντίσταση του δικτύου ως προς και τους δύο κόμβους αυξάνεται ραγδαία, λαμ-

Πίνακας 1: Ηλεκτρικές παράμετροι ανά καλώδιο.

Καλώδιο	R (Ω/km)	X (Ω/km)	B ($\mu\text{B}/\text{km}$)
FG16R16 3x70+35mm ²	0.272	0.0764	66.17
FG16R16 3x95+50+50mm ²	0.206	0.0917	49.7
FG16R16 3x1x240+120+120mm ²	0.0801	0.08945	51.1
NA2XH 3x1x185+1x95mm ²	0.164	0.09342	41.717
NA2XH 3x1x240+1x120mm ²	0.125	0.09116	42.703
NA2XY 3x1x150+1x95mm ²	0.206	0.09501	40.543
NAYY 4x70mm ²	0.443	0.10347	122.96
NAYY 3x1x95+1x50mm ²	0.32	0.09747	133.68
NAYY 3x1x120+1x70mm ²	0.253	0.09435	136.88
NAYY 3x1x120+1x120mm ²	0.253	0.09386	137.94
NAYY 3x1x150+1x95mm ²	0.206	0.09355	138.78
NAYY 3x1x150+1x150mm ²	0.206	0.09573	134.18
NAYY 3x1x185+1x95mm ²	0.164	0.09342	139.38
NAYY 3x1x240+1x120mm ²	0.125	0.09146	142.5
NAYY 3x1x240+1x240mm ²	0.125	0.13911	80.38



Σχήμα 6: Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου ως προς τον α) ΓΠΧΤ, β) τον ζυγό LV PNL BESS ζεύξης των μπαταριών.



Σχήμα 7: Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου ως προς τον α) ΓΠΧΤ, b) τον ζυγό LV PNL BESS ζεύξης των μπαταριών, θεωρώντας πενταπλάσια χωρητικότητα για κάθε καλώδιο.