

**ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΜΙΚΡΟ-ΔΙΚΤΥΟ ΑΠΕ ΓΙΑ ΑΔΙΑΛΕΙΠΤΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ****Κ. Θ. Μανδράκη<sup>1</sup>, Α. Π. Μπαρακίτης<sup>1</sup> και Α. Γ. Παπαθανασίου<sup>1</sup> \***<sup>1</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ(\*[pathan@chemeng.ntua.gr](mailto:pathan@chemeng.ntua.gr))**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα μικροδίκτυο (ισχύος 5 KW) με κύριο χαρακτηριστικό τη μερική αυτόνομη από το κύριο δίκτυο ηλεκτρισμού με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος σε μικρές αλλά πολύ σημαντικές μονάδες δικτύου (Grid-Cells), όπως εργαστήρια με ευαίσθητο εξοπλισμό ή εντατικές μονάδες νοσοκομείων. Το μικροδίκτυο δημιουργείται από έναν αντιστροφέα (inverter) ο οποίος τροφοδοτείται και από ΑΠΕ, αλλά και από το κυρίως δίκτυο ηλεκτροδότησης. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια και μια ανεμογεννήτρια, ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ ως μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιείται μια διάταξη συσσωρευτών μολύβδου. Ο κεντρικός αντιστροφέας διαχειρίζεται τόσο τη φόρτιση των μπαταριών όσο και το μικροδίκτυο. Η ηλεκτρική τάση και η συχνότητα του μικροδικτύου δεν εξαρτώνται από τις αντίστοιχες του κυρίως δικτύου και επομένως παραμένουν καλά ελεγχόμενες στο εσωτερικό δίκτυο. Όταν συμβεί διακοπή ηλεκτροδότησης ο αντιστροφέας λαμβάνει ισχύ είτε από ΑΠΕ (ΦΒ ή ανεμογεννήτρια) είτε από τους συσσωρευτές 'προστατεύοντας' έτσι το εσωτερικό του δίκτυο.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σχεδόν όλες οι ανθρώπινες δραστηριότητες συνδέονται στενά με την ηλεκτρική ενέργεια. Η διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας σχεδόν σε κάθε τομέα της σύγχρονης ζωής έχει δημιουργήσει την ανάγκη για καλής ποιότητας και αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με μια τελευταία μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την Ευρώπη (28)<sup>[1]</sup>, ο κοινωνικοοικονομικός αντίκτυπος των διακοπών ρεύματος και των διακυμάνσεων είναι σημαντικός και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Επίσης πολύ σημαντικές είναι και οι επιπτώσεις της κακής ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας σε ορισμένες ευαίσθητες και πολύ σημαντικές υποδομές όπως είναι τα νοσοκομεία τα οποία διαθέτουν πολύ ακριβά και ευαίσθητα μηχανήματα που υποστηρίζουν ανθρώπινες ζωές ή τα εργαστήρια τα οποία διαθέτουν πολύ ακριβό και ευαίσθητο εξοπλισμό. Η κακής ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια έχει σημαντικό αντίκτυπο σε κόστος<sup>[2]</sup>. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται έως τώρα είναι η χρήση γεννητριών πετρελαίου ως υποστηρικτικών μονάδων παροχής ενέργειας σε περιπτώσεις διακοπών και η χρήση UPS για πολύ ευαίσθητα μηχανήματα. Όμως η πρακτική αυτή έχει αποδειχθεί ότι έχει βασικά προβλήματα<sup>[3]</sup>:

- Οι κοινές ηλεκτρογεννήτριες χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, επομένως αντιτίθενται στη σύγχρονη πρακτική της αποσύνδεσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.
- Απαιτούν συχνή συντήρηση η οποία αυξάνει τα λειτουργικά κόστη.
- Υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές σε περιπτώσεις όπου τέτοια συστήματα απέτυχαν να λειτουργήσουν τη στιγμή που έπρεπε επειδή είχαν αφεθεί ασυντήρητα ή δεν είχαν καύσιμα.

Εδώ προτείνουμε τη χρήση των αυτόνομων ηλεκτρικών συστημάτων που βασίζονται κυρίως σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) για τροφοδοσία ρεύματος, αποθήκευση ενέργειας για εφεδρική ισχύ, και κύρια σύνδεση δικτύου, σε πολύ μικρές μονάδες δικτύου (το πολύ ένα κτίριο) για την υποστήριξη κρίσιμων και ευαίσθητων υποδομών με αδιάλειπτη και υψηλής ποιότητας ενέργεια. Μέχρι τώρα οι ΑΠΕ συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την αποτροπή της κλιματικής αλλαγής, αλλά η ιδέα της χρήσης τους και για την ενεργειακή ασφάλεια και σταθερότητα είναι επίσης ελκυστική. Για το λόγο αυτό,

δημιουργήσαμε μια μικρή κυψέλη δικτύου (grid cell, GC) αποτελούμενη από φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ, μια ανεμογεννήτρια, μπαταρίες και αντιστροφείς ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό το GC συνδέεται με το κυρίως δίκτυο ηλεκτροδότησης και στόχος είναι η βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας και όχι η αυτονομία. Το μικροδίκτυο βρίσκεται στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, δηλαδή εντός αστικής περιοχής, όπου η σύνδεση με το κύριο δίκτυο είναι εύκολη.

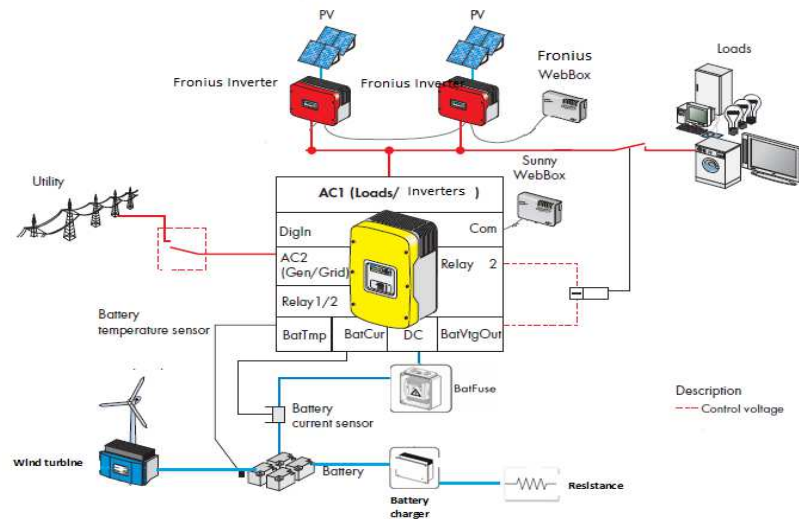
### ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της εφαρμογής του μικροδικτύου (Micro-grid) είναι η εξασφάλιση μερικής αυτονομίας από το κύριο δίκτυο ηλεκτρισμού με παράλληλη βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας σε μικρές αλλά πολύ σημαντικές μονάδες δικτύου, όπως εργαστήρια με ευαίσθητο εξοπλισμό. Η αυτονομία βασίζεται στην παροχή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ) και στην αποθήκευση αυτής, παρόλα αυτά χαρακτηρίζεται μερική καθώς ταυτόχρονα το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο και με το κύριο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια και μια ανεμογεννήτρια ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ ως μέσο αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας, για χρήση της σε περίπτωση αδυναμίας ικανοποίησης των απαιτήσεων της μονάδας από τις ΑΠΕ ή το κύριο δίκτυο, χρησιμοποιείται μια διάταξη συσσωρευτών μολύβδου. Ως κύρια συσκευή ελέγχου της διανομής της ενέργειας χρησιμοποιείται ένας “έξυπνος” αντιστροφέας (central inverter), ο οποίος εξισορροπεί τα φορτία και διαχειρίζεται το ισοζύγιο ηλεκτρικής ισχύος. Ως κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται οι ΑΠΕ, οι διακυμάνσεις των οποίων εξομαλύνονται από το κύριο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και από τους συσσωρευτές μέσω του κεντρικού αντιστροφέα. Έτσι εξασφαλίζονται μικρότερες διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας, προστατεύοντας την τροφοδοτούμενη μονάδα από τις διακυμάνσεις της παρεχόμενης ισχύος από το κεντρικό δίκτυο καθώς και από περιπτώσεις ολικής αποτυχίας του δικτύου (διακοπή ρεύματος).

Τα βασικά στοιχεία της εγκατάστασης είναι τα εξής :

- Ηλιακοί συλλέκτες
- Αντιστροφείς φωτοβολταϊκής ενέργειας
- Ανεμογεννήτρια
- Συσσωρευτές μολύβδου
- Φορτιστής συσσωρευτών
- Κεντρικός αντιστροφέας
- Καταγραφικά / κεντρικός υπολογιστής
- Υποστηριζόμενο εργαστήριο

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι τοποθετημένοι στην νότια πρόσοψη και στην οροφή του κεντρικού κτηρίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών. Η μελέτη και η εγκατάστασή τους έγινε από το 1999 έως το 2001. Υπάρχουν συνολικά 8 επιφάνειες ηλιακών συλλεκτών, αποτελούμενες από διαφορετικό αριθμό ηλιακών μονάδων συνολικής ισχύος 7 KWp. Οι ηλιακές μονάδες (modules) είναι τύπου EuroSolar PL8. Οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν συνεχές ρεύμα (DC) και η κάθε ηλιακή επιφάνεια συνδέεται με έναν αντιστροφέα, που μετασχηματίζει το παραγόμενο συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.

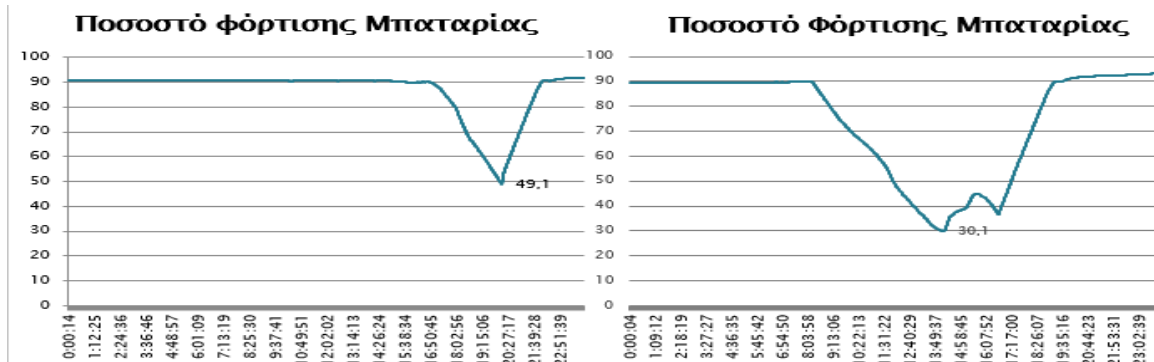


**Σχήμα 1.** Σχηματικό Διάγραμμα εγκατάστασης

Μόλις υπάρξει επαρκές επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας, ο ηλιακός μετατροπέας αρχίζει να τροφοδοτεί ισχύ. Κατά τη λειτουργία του ο αντιστροφέας διατηρεί την τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά πάσα στιγμή εντός του εύρους της βέλτιστης ισχύος. Ο ηλεκτρισμός που παράγεται μπορεί να τροφοδοτηθεί στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης ή να χρησιμοποιηθεί απευθείας από τα συνδεδεμένα φορτία. Η ανεμογεννήτρια του δικτύου έχει μέση παραγωγή 1 KW. Το εύρος λειτουργίας είναι για ταχύτητες ανέμου μεταξύ 3,5m/s και 12,5 m/s. Η ενέργεια της ανεμογεννήτριας διοχετεύεται στη μονάδα των συσσωρευτών. Η μονάδα συσσωρευτών απαρτίζεται από 8 συσσωρευτές μολύβδου συνδεδεμένους ανά 4 σε σειρά και στη συνέχεια ανά δύο παράλληλα. Οι συσσωρευτές είναι τύπου υγρού διαλύτη (lead- acid battery) και έχουν 12V ονομαστική τάση και 103 Ah χωρητικότητα. Η συνολική τάση της μονάδας είναι 48V και η χωρητικότητα 206 Ah. Ο φορτιστής συσσωρευτών προστατεύει τις μπαταρίες από υπερβολική φόρτιση υιοθετώντας τη μέθοδο διαμόρφωσης Pulse Width Modulation (PWM). Η λειτουργία του φορτιστή είναι μάλλον συμπληρωματική λόγω της ύπαρξης του κεντρικού αντιστροφέα. Ο κεντρικός αντιστροφέας είναι ένας φορτιστής μπαταρίας και δημιουργεί και το μικροδίκτυο 230V-50Hz. Η λειτουργία του είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του κυρίως δικτύου ηλεκτρισμού. Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών οδηγούνται στο μικροδίκτυο που δημιουργεί ο κεντρικός αντιστροφέας. Η ισχύς που παράγουν τα φωτοβολταϊκά είτε καταναλώνεται άμεσα στο μικροδίκτυο είτε χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών και αν υπάρξει περίσσεια εγχέεται στο κυρίως δίκτυο. Όταν το κύριο ηλεκτρικό δίκτυο αποτύχει (διακοπή ρεύματος) ο SMA Inverter διατηρεί την αδιάκοπη παροχή ενέργειας μέσω των ηλιακών συλλεκτών ή μέσω των μπαταριών εάν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Ο αντιστροφέας μπορεί επίσης να φορτίζει τις μπαταρίες μέσω του κύριου δικτύου ηλεκτρισμού, εάν δεν υπάρχει άλλη πηγή. Το εργαστήριο ελέγχεται μέσω ενός κεντρικού υπολογιστή. Το Sunny Webbox, που καταγράφει τα δεδομένα του κεντρικού αντιστροφέα, είναι προσβάσιμο από το διαδίκτυο. Τα ευαίσθητα φορτία του μικροδικτύου αποτελούνται κυρίως από υπολογιστές και τα αντίστοιχα κλιματιστικά του χώρου. Το μικροδίκτυο επίσης τροφοδοτεί και το χώρο που στεγάζεται.

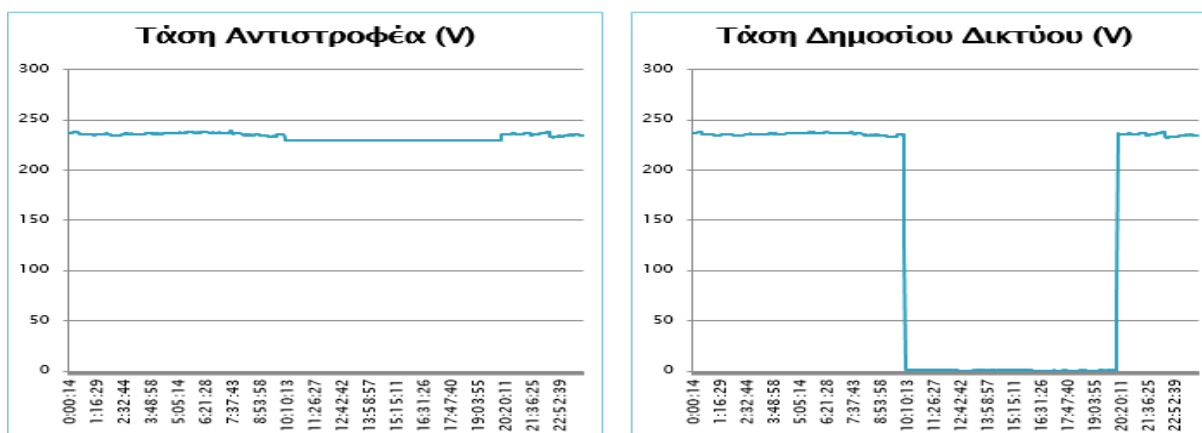
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος του μικροδικτύου σε διακοπή ηλεκτροδότησης μικρής η μεγάλης διάρκειας. Επίσης μελετήθηκε η ενέργεια απόδοση των ΑΠΕ, καθώς και οι ευεργετικές επιπτώσεις της χρήσης αυτών στο περιβάλλον. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης της συμπεριφοράς του μικροδικτύου σε περιπτώσεις μεγάλων διακοπών ρεύματος, στιγμιαίας διακοπής, σε βυθίσεις τάσεις καθώς και το ενεργειακό ισοζύγιο.



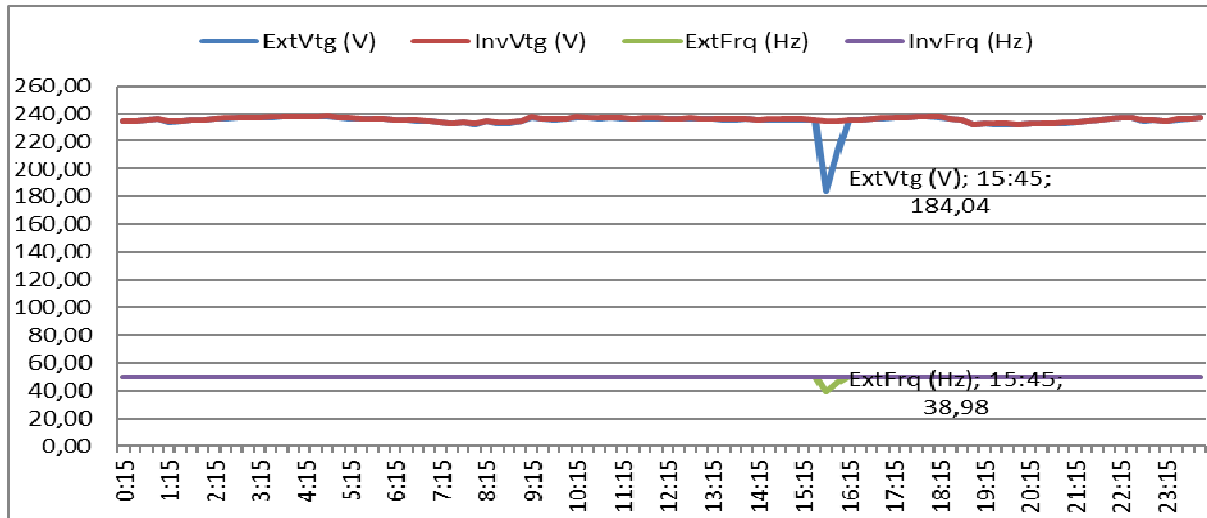
**Σχήμα 12.** Δεξιά: 3/11/2018 Διακοπή 8 ωρών από 10:02 έως 20:09 Αριστερά: 2/12/2018. Διακοπή 8,5 ωρών από 8:15 έως 16:40

Μελετώντας την διακοπή στις 3/11/2018, η διακοπή ρεύματος διήρκεσε περίπου οκτώ ώρες. Το μικροδίκτυο κατάφερε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του φορτίου, και όπως φαίνεται στο διάγραμμα διατήρησε σταθερή τάση και συχνότητα (βλ. σχ.3). Από τις 10:02 έως τις 17:59 τροφοδοτούσε το φορτίο μέσω της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά, που ήταν επαρκή για την κάλυψη των αναγκών. Όπως φαίνεται στο σχ.2 στις 17:59 άρχισε να λαμβάνει ενέργεια από την μονάδα συσσωρευτών, για περίπου δύο ώρες έως τις 20:09 όπου το κεντρικό δίκτυο επανήλθε. Το χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης της μονάδας των συσσωρευτών ήταν 48.9%. Από τις 20:09 έως τις 23:32, δηλαδή για 3,5 ώρες ο SMA αντιστροφέας ήταν στην φάση Float, η οποία είναι φόρτιση συντήρησης των συσσωρευτών, από την οποία αντλούσε ενέργεια από το κύριο δίκτυο.



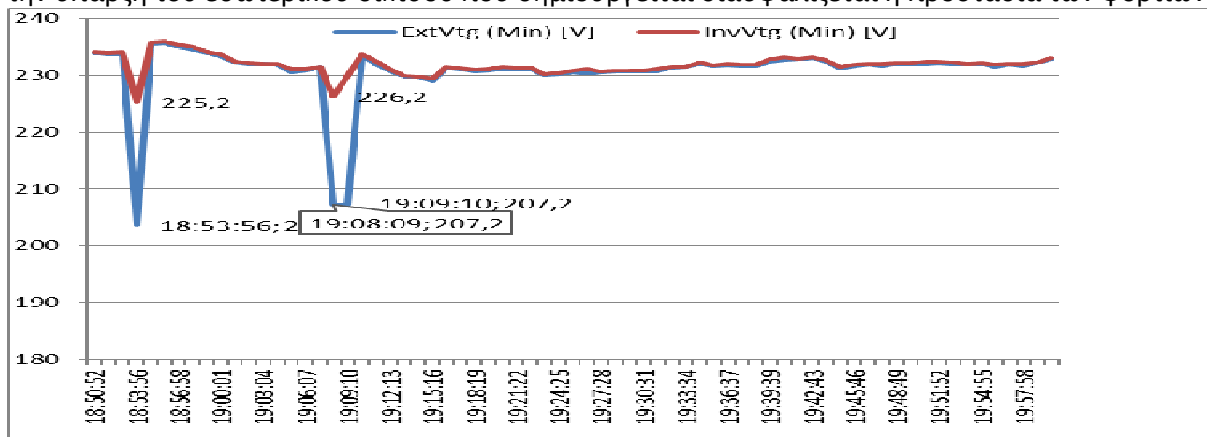
**Σχήμα 3.** Διαγράμματα τάσεων στις 3/11/2018

Σε μία άλλη περίπτωση φαίνεται η συμπεριφορά του συστήματος σε μικρές διακοπές ρεύματος που θα μπορούσαν να προκαλέσουν προβλήματα σε υπολογιστές και ευαίσθητες συσκευές. Όπως φαίνεται στο σχ.4 η τάση του αντιστροφέα (In Vtg) και η συχνότητα αυτού (In Frg) εμφανίζουν μικρότερες διακυμάνσεις και μέσα στα αποδεκτά πλαίσια εν αντιθέσει με τη συμπεριφορά του δημοσίου δικτύου (Ext Vtg, Ext Frg).



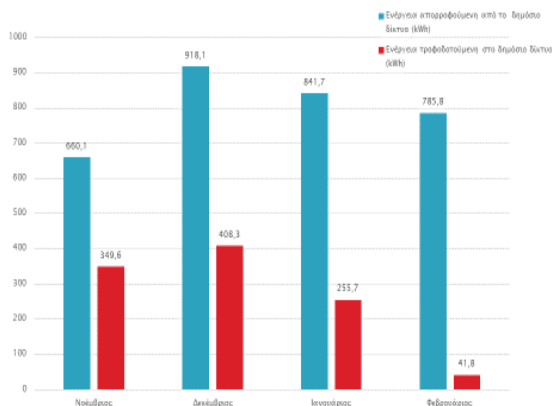
Σχήμα 4. Διάγραμμα τάσης και συχνότητας κατά τη διάρκεια στιγμιαίας διακοπής ρεύματος

Τέλος στο σχ. 5 φαίνεται η συμπεριφορά του μικροδικτύου στις επικίνδυνες πτώσεις τάσης. Με την ύπαρξη του εσωτερικού δικτύου που δημιουργείται διασφαλίζεται η προστασία των φορτίων.

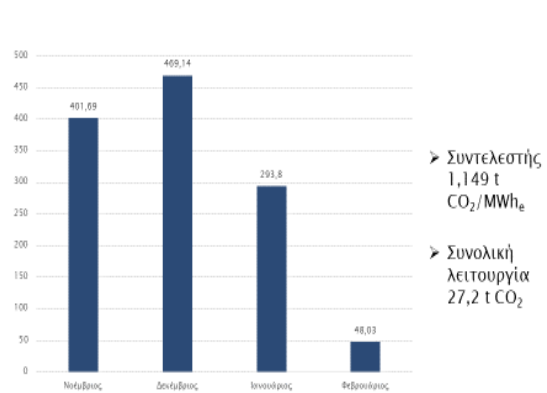


Σχήμα 5. Διάγραμμα τάσης κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης από το δημόσιο δίκτυο

### ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



### Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> (kg)



➤ Συντελεστής  
1,149 t  
CO<sub>2</sub>/MWh<sub>e</sub>

➤ Συνολική  
λειτουργία  
27,2 t CO<sub>2</sub>

Σχήμα 6. Ραβδογράμματα συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας και τροφοδοτούμενης από ΑΠΕ (δεξιά) και μείωσης εκπομπών CO<sub>2</sub> στο περιβάλλον λόγω χρήσης ΑΠΕ

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η χρήση του μικροδικτύου ηλεκτροδότησης σε περιπτώσεις που η συνεχής παροχή ρεύματος είναι απαραίτητη είναι καθοριστική. Είναι το σύστημα που χρειάζονται εργαστηριακές μονάδες για την συνεχή λειτουργία τους καθώς και νοσοκομειακές μονάδες και οικιακές μονάδες, που λειτουργούν σε πόλεις και είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι:

- Εξομαλύνει τις έντονες διακυμάνσεις
- Δεν εμφανίζει νεκρούς χρόνους
- Αποδίδει ενεργειακά όλες τις εποχές
- Είναι ευέλικτο (απόδοση από 5-15kW)
- Έχει μηδενικές εκπομπές
- Είναι αθόρυβο
- Δεν έχει λειτουργικά έξοδα
- Δεν απαιτεί μεγάλο όγκο εγκαταστάσεων

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] VVA, Copenhagen Economics, Neon, Deloitte March 2018, Study on the quality of electricity market data of transmission system operators, electricity supply disruptions, and their impact on the European electricity markets Final report
- [2] <https://energypress.gr/news/mplakaoyt-stin-athina-i-ptosi-grammis-metaforas-sto-kyt-pallinis-prokalese-vrahykykloma>
- [3] <https://www.ecmweb.com/ops-amp-maintenance/top-nine-reasons-generators-fail-start>