

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ SIMULINK ΤΗΣ MATLAB**

Υπεύθυνοι καθηγητές:
Γ.ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ
Κ.ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ
Ι.ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ

Αριθμός Μητρώου: 2014030073

3 Ιουνίου 2021

Ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου που ήταν, είναι και θα είναι δίπλα μου, τους φίλους και την κοπέλα μου που μου στάθηκαν σε όλα αυτά τα χρόνια, όπως επίσης και τους καθηγητές μου που με βοήθησαν στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια οδηγούμαστε με ταχύτατους ρυθμούς προς ένα πιο έξυπνο σύστημα διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση όλο και περισσότερων μονάδων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ένας βασικός παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτό. Έχει επομένως, ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξετάσουμε τον τρόπο αλληλεπίδρασης αυτών των μονάδων, το κατά πόσο είναι αξιόπιστες και σε τι βαθμό, όπως επίσης και την επίδραση που θα έχουν στον τρόπο ζωής της κοινωνίας που θα τις χρησιμοποιούν.

Η τάση που αρχίζει να δημιουργείται γύρω από την ανάπτυξη έξυπνων δικτύων και ειδικότερα των λεγόμενων μικροδικτύων, αποτελεί επίσης αντικείμενο μελέτης. Η μορφή, ο τρόπος λειτουργίας τους, η ασφάλεια αλλά και η ευστάθειά τους είναι μόνο μερικά από τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας για την βέλτιστη λειτουργία τους.

Η δυναμική μελέτη ενός συστήματος μικροδικτύου παρουσιάζει πολλές από τις προαναφερθείσες πτυχές αυτών των προβλημάτων, και αποτελεί επί της ουσίας μια κοινή τομή μεταξύ των μονάδων παραγωγής του μέλλοντος και της ενσωμάτωσής τους σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισής τους.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή αναφορικά με το υπάρχον δίκτυο αλλά και των πλέων σύγχρονων τάσεων για ανάπτυξη νέων δομών όπως είναι τα μικροδίκτυα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα μέσα από τις μαθηματικές εξισώσεις που τα διέπουν, καθώς και τα οφέλη που παρουσιάζουν στην παραγωγή ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα αποθήκευσης που χρησιμοποιήθηκε με βάση στις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Περιέχει τις χημικές εξισώσεις αυτής της τεχνολογίας καθώς και τα πλεονεκτήματά της απέναντι σε άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η στοχαστικότητα του ανέμου και το μοντέλο της ανεμογεννήτριας, ενώ παράλληλα γίνεται και μια εισαγωγή στις διάφορες τεχνολογίες γεννητριών παραγωγής ενέργειας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής και ειδικότερα της γεννήτριας παραγωγής ρεύματος με βάση το Ντίτζελ.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται οι διάφοροι μετατροπείς καθώς και οι τεχνολογίες των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν στον εκάστοτε.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφονται τα διάφορα σενάρια λειτουργίας που θεωρήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση τα σενάρια που εισήχθησαν στην Simulink και εξάγονται διάφορα συμπεράσματα.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και αφορούν τόσο τα σενάρια που εξετάστηκαν όσο και την ίδια την Simulink.

Λέξεις κλειδιά:

Μικροδίκτυο, δυναμική ανάλυση, φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολική μονάδα παραγωγής, σύστημα αποθήκευσης, μηχανή ντίτζελ.

Abstract:

Lately we are moving as a society into a smarter and more reliable electricity management system. It is very interesting to observe, analyse and be prepared for this new era of electricity distribution, that comes as a result from the increased integration of renewable energy sources.

The new trend that promises to help in these advanced problems caused by this integration, is described by the microgrid development and therefore, their analysis is fundamental. Their form, the way they work and their overall safety including their stability over disturbances, are some of the characteristics that need to be taken into account for their optimal operation.

The current thesis describes a microgrid dynamic analysis with Matlab-Simulink. In other words, it contains the problems that are mentioned above and it tries to describe a system like this in a way that will be easily understood by everyone. The overall system is based on a simple microgrid which contains photovoltaic arrays integrated with a storage system based on Lithium Batteries, a permanent magnet technology in wind power generator and a diesel based synchronous generator. The results are shown, with the whole system working in order to cover the requested energy consumption.

Keywords:

Microgrid, dynamic analysis, photovoltaic systems, wind generator, battery energy storage systems, diesel generator

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	6
1.1	Συμβατικό σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	7
1.2	Έξυπνα δίκτυα	7
1.3	Μικροδίκτυο	8
1.4	Περιγραφή συστήματος	10
2	Φωτοβολταϊκά Συστήματα	11
2.1	Βασικά χαρακτηριστικά και περιγραφή Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	11
2.2	Μαθηματική ανάλυση του μοντέλου των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	12
2.3	Ο αλγόριθμος MPPT	20
2.4	Προδιαγραφές Συστήματος Φωτοβολταϊκών Συλλεκτών	22
3	Μοντέλο Συστήματος Αποθήκευσης	24
3.1	Η ανάγκη για Σύστημα Αποθήκευσης	24
3.2	Τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης	25
3.3	Οι μπαταρίες Li-Ion	27
3.4	Προδιαγραφές Συστήματος Αποθήκευσης	29
4	Το Μοντέλο της Ανεμογεννήτριας	32
4.1	Η Στοχαστική Φύση του Ανέμου	32
4.2	Μοντελοποίηση του συστήματος της Ανεμογεννήτριας	35
4.3	Η γεννήτρια παραγωγής ρεύματος της Ανεμογεννήτριας	40
4.3.1	Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής	40
4.3.2	Κατηγορίες γεννητριών	43
4.4	Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννήτριας με βάση την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων	47
4.4.1	Ανεμογεννήτρια Σταθερών Στροφών	47
4.4.2	Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών	48
4.5	Προδιαγραφές του συστήματος της Ανεμογεννήτριας	51
5	Γεννήτρια Παραγωγής Ρεύματος	52
5.1	Το Μαθηματικό Μοντέλο της Σύγχρονης Μηχανής	52
5.2	Το Μοντέλο της Μηχανής Ντίζελ	58
5.3	Προδιαγραφές Γεννήτριας Παραγωγής Ρεύματος	61
6	Απαραίτητα Ηλεκτρονικά Ισχύος	63
6.1	Ανορθωτές	63
6.2	Μετατροπείς συνεχούς τάσης και ρεύματος	65
6.3	Αντιστροφείς	66
7	Σενάρια λειτουργίας	70
7.1	Σενάριο A1	73
7.2	Σενάριο A2	80
7.3	Σενάριο A3	87
7.4	Σενάριο A4	93

7.5	Σενάριο A5	98
7.6	Σενάριο A6	104
7.7	Σενάριο A7	112
7.8	Σενάριο A8	118
7.9	Σενάριο B1	125
7.10	Σενάριο B2	132
7.11	Σενάριο B3	139
7.12	Σενάριο B4	146
7.13	Σενάριο B5	152
7.14	Σενάριο B6	160
7.15	Σενάριο B7	168
7.16	Σενάριο B8	173
8	Συμπεράσματα	179
9	Βιβλιογραφία	182

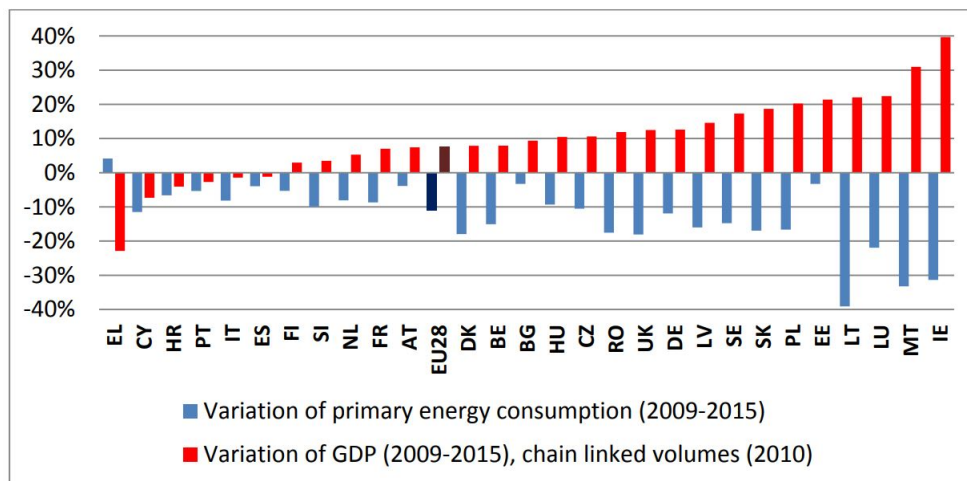
1 Εισαγωγή

Καθώς η τεχνολογία και η τεχνογνωσία των επιστημόνων εξελίσσεται είναι αναμενόμενο να υπάρχει βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων. Έτσι, όπως και σε άλλους τομείς της ζωής μας, το σύστημα της ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται, αλλάζει και προσαρμόζεται στις απαιτήσεις και τις ανάγκες της κοινωνίας.

Τον Νοέμβριο του 2016, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε αναθεώρηση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση στο πλαίσιο της δέσμης μέτρων για την καθαρή ενέργεια, που σκοπό είχε την προσαρμογή της ενεργειακής απόδοσης στον δεσμευτικό στόχο 30% έως το 2030. Ο προτεινόμενος στόχος του 30 % για το 2030 μεταφράζεται σε κατανάλωση τελικής ενέργειας 987 εκατομμυρίων TWh (τόνοι ισοδυνάμου πετρελαίου) και σε κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας 1321 εκατομμυρίων TWh στην ΕΕ.

Σε έκθεση της επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο το 2017, παρουσιάστηκαν στοιχεία τα οποία αφορούσαν τον χρονικό ορίζοντα 2009 έως και 2015 (Εικόνα 1.1) και έδειχναν την πορεία προς τον προηγούμενο στόχο του 20% έως το 2020. Η πλειονότητα των κρατών που κατάφεραν να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας επένδυσαν στις πράσινες μορφές ενέργειας, ενώ την ίδια στιγμή εφάρμοσαν ρυθμιστικές διατάξεις που βασίστηκαν σε πολιτική βούληση προκειμένου να βρίσκονται εντός του ορίου σε χρονικό ορίζοντα 5 ετών.

Όλα αυτά αποδεικνύουν ότι η κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο είναι ένα μείζον πρόβλημα, και ότι οι νέες τεχνολογίες και η πρόοδος τη επιστήμης μπορεί να συμβάλει στην ρύθμισή του.

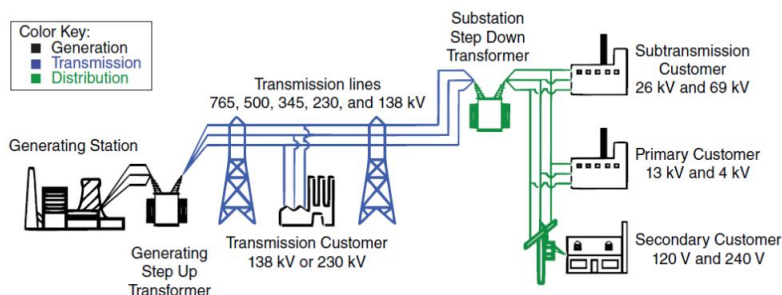


Εικόνα 1.1: ΑΕΠ και κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας 2009-2015

1.1 Συμβατικό σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο ηλεκτρισμός έφτασε στην Ελλάδα το 1889 και μέχρι το 1929 είχαν ήδη ηλεκτροδοτηθεί πάνω από διακόσιες πενήντα πόλεις. Η ίδρυση της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) έγινε μόλις το 1950 και ήταν η πρώτη φορά που ένας κρατικός φορέας είχε συγκεντρωμένες τις αρμοδιότητες για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την ελληνική επικράτεια.

Η ΔΕΗ βασίστηκε στην αξιοποίηση των εγχώριων πόρων, όπως ο λιγνίτης, που βρίσκονταν σε περίσσεια στην ελληνική επικράτεια και πιο συγκεκριμένα στην βόρεια Ελλάδα. Έτσι, δημιούργησε το ελληνικό σύστημα μεταφοράς το οποίο μέχρι και σήμερα έχει σαν αρχή το εργοστάσιο παραγωγής και σαν τέλος όλο το διασυνδεδεμένο δίκτυο.



Εικόνα 1.2: Παραγωγή, μεταφορά και διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας από τη ΔΕΗ

Καθώς όμως προσανατολιζόμαστε όλο και περισσότερο προς τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, η μονόδρομη ροή ενέργειας παύει σιγά-σιγά να υφίσταται. Με την απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και με την συμβολή ακόμα και πολύ μικρών παραγωγών, οδηγούμαστε με βεβαιότητα προς μια νέα εποχή αμφίδρομης ροής της ενέργειας που σκοπό έχει να καλύψει τις απαιτήσεις των καταναλωτών με τον πιο οικονομικό και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο.

1.2 Έξυπνα δίκτυα

Η μετάβαση από το συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα νέο που θα αξιοποιεί στο μέγιστο τις απαιτήσεις των παραγωγών και των καταναλωτών με τον βέλτιστο οικονομικό και οικολογικό τρόπο επιτυγχάνεται με την δημιουργία των έξυπνων δικτύων.

Η Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Τεχνολογίας ορίζει σαν έξυπνο δίκτυο το ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο μπορεί έξυπνα να ενοποιήσει τις δράσεις των διασυνδεδεμένων καταναλωτών και παραγωγών με σκοπό την ασφάλή, αποδοτική και οικονομική

διανομή ηλεκτρικών προμηθειών.

Πρόκειται ουσιαστικά για μια δομή που έχει σαν στόχο την μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας με πλήρη έλεγχο από άκρη σε άκρη. Το έξυπνο δίκτυο χαρακτηρίζεται από την αμφίδρομη ροή της ενέργειας και των πληροφοριών που υπάρχουν μέσα σε αυτό, προκειμένου να μεταφερθούν σε πραγματικό χρόνο δεδομένα με σκοπό την κάλυψη της συνολικής ζήτησης.

Τα οφέλη που δημιουργούνται από την μετάβαση ενός συμβατικού δικτύου σε έξυπνο είναι ενδεικτικά:

- Βελτίωση της αξιοπιστίας και αύξηση της ασφάλειας.
- Βελτίωση της χωρητικότητας του υπάρχοντος δικτύου.
- Μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, αφού μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.
- Αυξάνει τις επιλογές των καταναλωτών δίνοντάς τους δυνατότητα επιλογής νέων προϊόντων και υπηρεσιών.
- Αυξάνει την ανθεκτικότητα του συστήματος σε βλάβες και διακοπές.
- Με την συνεχόμενη παρακολούθηση της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και την αντίστοιχη παραγωγή, εξαλείφεται η ανάγκη για εφεδρεία μονάδων για την κάλυψη αιχμών του συστήματος.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε το 2003 την Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου 2003/54/EK υποχρεώνοντας τα κράτη – μέλη να απελευθερώσουν σταδιακά την αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας, που μέχρι πρότινος (τουλάχιστον για την χώρα μας) ήταν μονοπώλιο.

Με την πλήρη απελευθέρωση αποδείχθηκε ότι Διανεμημένες Μονάδες Παραγωγής μπορούν να καλύψουν την ζήτηση και ουσιαστικά να θέσουν τις βάσεις για μια νέα γενιά ακόμα πιο προηγμένων δικτύων, των μικροδικτύων.

1.3 Μικροδίκτυο

Όπως γίνεται κατανοητό, η περαιτέρω αύξηση της τεχνολογικής ισχύος, η ψηφιοποίηση όλων των διαδικασιών και η μετάβαση από ένα σύστημα κεντρικής παραγωγής σε ένα νέο Διανεμημένης Παραγωγής αποτελούν συγκεκριμένες τάσεις που θέτουν τον θεμέλιο λίθο για την δημιουργία νέων υπερσύγχρονων εγκαταστάσεων που τα αποκαλούμε Μικροδίκτυα.

Τα μικροδίκτυα μπορούν να είναι είτε συνδεδεμένα με το κυρίως δίκτυο, οπότε και έχουμε αμφίδρομη ροή προς αυτό ή από αυτό, είτε αποκομμένα λειτουργώντας ανεξάρτητα. Στην ανεξάρτητη λειτουργία τους (Island Mode) τα μικροδίκτυα είναι υπεύθυνα για την διαχείριση και την κάλυψη της ενέργειας με ασφαλή και οικονομικό τρόπο.

Η χρήση τους ενδείκνυται για την κάλυψη των αναγκών σε περιοχές όπου δεν

υπάρχει διασυνδεδεμένο δίκτυο ή είναι μη στιβαρό, ανίκανο να καλύψει τις νέες ανάγκες φορτίου. Βέβαια, από ότι γίνεται αντιληπτό μέσα από διάφορες μελέτες και πειραματισμούς, αποτελεί ίσως την καλύτερη εναλλακτική μορφή δικτύου του μέλλοντος καθώς ενσωματώνει όλα τα θετικά χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων με την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας ενός συμβατικού δικτύου.

Τα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν ποικίλες μορφές ενέργειας που μπορούν να είναι συμβατικές ή ακόμα και ανανεώσιμες. Στην πλειονότητά τους βασίζονται σε «πράσινες» μορφές ενέργειας, αλλά κάνουν χρήση και άλλων προκειμένου να διατηρήσουν το ισοζύγιο της ισχύος όποτε αυτό δεν μπορεί να καλυφθεί με άλλον τρόπο, όπως για παράδειγμα το βράδυ όπου τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν έχουν παραγωγή.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των συμβατικών δικτύων είναι ενδεικτικά τα εξής:

- Είναι αξιόπιστα και ευέλικτα. Μπορούν να λειτουργούν αδιάλειπτα εξασφαλίζοντας ανενόχλητη ροή ισχύος και ικανοποίηση της ζήτησης ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε συστήματος.
- Είναι πιο ασφαλή. Η παραγωγή στα μικροδίκτυα γίνεται σε τοπικό επίπεδο χωρίς να απαιτούνται μεγάλες μεταφορές ενέργειας από μια κεντρική μονάδα παραγωγής. Επιπλέον, η μικρή σε μέγεθος μονάδα παραγωγής είναι περισσότερο ασφαλής από φυσικής απόψεως αλλά και από (δεδομένου του εκτεταμένου φόρτου ηλεκτρονικών συσκευών) κυβερνοεπιθέσεων.
- Είναι ανθεκτικά. Επειδή τα μικροδίκτυα δεν εξαρτώνται από το παραδοσιακό δίκτυο, μένουν ανεπηρέαστα από φυσικές καταστροφές που μπορεί να συμβούν σε κάποια περιοχή πολύ μακριά από αυτά. Για αυτό τον λόγο, αποτελούν άλλωστε και ιδανική λύση για την κάλυψη ευαίσθητων φορτίων όπως είναι τα νοσοκομεία ή οι στρατιωτικές βάσεις.
- Μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα αξιοποιώντας στο μέγιστο τις νέες τεχνολογίες και χρησιμοποιώντας εξελιγμένα λογισμικά ειδικά σχεδιασμένα για αυτά.
- Αποθηκεύουν και διαχειρίζονται ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εξοικονομώντας χρήματα ενώ ταυτόχρονα μειώνοντας τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, βοηθώντας έτσι τις κυβερνητικές δεσμεύσεις για την μείωση των εκπομπών ρύπων.

1.4 Περιγραφή συστήματος

Το μικροδίκτυο που υλοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί έναν συνδυασμό διάφορων πηγών ενέργειας αλλά και μεταβλητών φορτίων. Οι παράμετροι του καθορίζονται σύμφωνα με την χρονική διάρκεια του εκάστοτε συμβάντος αλλά και με τις απαιτήσεις που υπάρχουν την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ανάλογα με την περίπτωση, γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή κάλυψη, εξετάζονται τα δεδομένα και μέσω συστημάτων αλλά και συναρτήσεων προσπαθεί να πετύχει την μέγιστη δυνατή κάλυψη της ζητούμενης ενέργειας με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

Οι βασικές δομές οι οποίες υπάρχουν και συνεισφέρουν στην κάλυψη των αναγκών είναι:

- Φωτοβολταϊκά πάνελ.
- Σύστημα αποθήκευσης περίσσειας ενέργειας βασισμένο σε μπαταρίες ιόντων λιθίου.
- Μικρής ισχύος ανεμογεννήτρια υλοποιημένη με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Machine-PMSG).
- Μικρής ισχύος Ντιζελογεννήτρια απευθείας συνδεδεμένης με το μικροδίκτυο.

Πέραν αυτών όμως, εκτεταμένη είναι η χρήση και των διάφορων ηλεκτρονικών ισχύος και κυρίως μετατροπέων (ανορθωτές-rectifiers, αντιστροφείς-inverters) καθώς και πληθώρα παθητικών φίλτρων που συμβάλλουν στην κατά το δυνατόν βελτίωση των παραγόμενων τάσεων και ρευμάτων.

2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

2.1 Βασικά χαρακτηριστικά και περιγραφή Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων τα κατατάσσουν στις μονάδες παραγωγής ενέργειας που μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και κατά συνέπεια στην βελτίωση της ποιότητας ζωής της μελλοντικής κοινωνίας.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα υπερσχύουν έναντι άλλων μορφών ενέργειας (τόσο συμβατικών όσο και εναλλασσόμενων) χάρη στην υψηλή αξιοπιστία και την μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Με το σημερινό κόστος τους να είναι αρκετά μειωμένο έναντι πριν κάποιων δεκαετιών και με δεδομένο ότι τα κόστη λειτουργίας τους είναι σχεδόν μηδενικά, αποτελούν μια καλή λύση τόσο περιβαλλοντικά, όσο και οικονομικά. Αυτό άλλωστε αποδεικνύεται και από την ευελιξία που διαθέτουν τέτοιες μονάδες, καθώς είναι σε θέση να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας ή ακόμα και να επεκταθούν χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις, προκειμένου να καλύψουν νέα φορτία και ανάγκες. Πέραν αυτών των χαρακτηριστικών όμως, διαθέτουν και την ευκολία της εγκατάστασης σε μεγάλα αστικά κέντρα (κυρίως για μικρότερα φωτοβολταϊκά συστήματα, πάνω σε οροφές) αφού η παραγωγή τους είναι αθόρυβη και ανεπαίσθητη. Ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ, μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- Μικρά συστήματα (της τάξης από 0.1 μέχρι 100 W) κυρίως σε απομονωμένες περιοχές όπως για παράδειγμα σε καταφύγια κυνηγών ή τροχόσπιτα, για την κάλυψη αναγκών φωτισμού, ζεστού νερού και άλλα.
- Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100W μέχρι 200 kW) για μεγαλύτερες ανάγκες όπως ο φωτισμός δρόμων και πάρκων ή για διάφορα συστήματα σηματοδότησης και τηλεπικοινωνιών .
- Συστήματα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο (200kW μέχρι μερικά MW) όπου η περίσσεια ενέργεια που δεν καταναλώνεται από μια κατοικία τροφοδοτεί το δίκτυο (αντίστροφη έγχυση ισχύος). Σε πολύ μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, η διασύνδεση γίνεται απευθείας στο δίκτυο (σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και στην μέση τάση) και αποκτούν χαρακτηριστικά ενός τυπικού σταθμού παραγωγής.

Ένα σύστημα Φωτοβολταϊκών Πάνελ λειτουργεί αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στις ιδιότητες που παρατηρούνται μεταξύ μιας ένωσης pn. Σαν ένωση pn ορίζουμε την ένωση ενός ημιαγωγού τύπου n (πλειονότητα αρνητικών φορέων ρεύματος) και ενός αγωγού τύπου p (πλειονότητα θετικών φορέων ρεύματος).

Το τυπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο (PV cell) αποτελείται από δύο στρώματα ημιαγωγού ενισχυμένου πυριτίου σφιχτά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το ένα στρώμα έχει κατάλληλες προσμίξεις ώστε να έχει περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων (n-στρώμα), ενώ το άλλο έχει περίσσεια οπών (p-στρώμα). Για αυτό τον λόγο πρόκειται επί της ουσίας για μια ένωση pn.

Τα προσπίπτοντα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφούνται σε κάποιο χημικό δεσμό μέσα στο φωτοβολταϊκό πάνελ, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Τα ζεύγη των φορέων που δημιουργούνται (τόσο οπές όσο και ελεύθερα ηλεκτρόνια) μπορούν, εάν βρεθούν κοντά στις επαφές της διόδου p-n, να δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου που είναι ενσωματωμένο. Η εκτροπή των οπών και των ηλεκτρονίων δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού. Εάν συνδέσουμε κάποιο καλώδιο στην παραγόμενη τάση (μέσω κάποιου ηλεκτροδίου), τότε θα έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται πάνω στο πάνελ και επί της ουσίας αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση μιας διόδου p-n ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

2.2 Μαθηματική ανάλυση του μοντέλου των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Το παραγόμενο φωτόρευμα I_Φ είναι το ρεύμα το οποίο παράγεται από αυτήν την διαδικασία και είναι ανάλογο των φωτονίων που απορροφά το φωτοβολταϊκό στοιχείο:

$$I_\Phi = e g (L_n + L_p) \quad (\text{εξ.2.1})$$

Όπου,

- e : Είναι το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου.
- g : Ο ρυθμός δημιουργίας των ζευγών των φορέων.
- L_n, L_p : Τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών.

Μπορούμε να ορίσουμε την φασματική απόκριση ως την σχέση που συνδέει το πλήθος των φορέων στα ηλεκτρόδια με την φωτονική ροή Φ , που είναι το πλήθος των φωτονίων που εμπεριέχονται στην προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Επομένως, η φασματική απόκριση $S(\lambda)$ ορίζεται ως εξής:

$$S(\lambda) = \frac{I_\Phi(\lambda)}{e \Phi(\lambda)} \quad (\text{εξ.2.2})$$

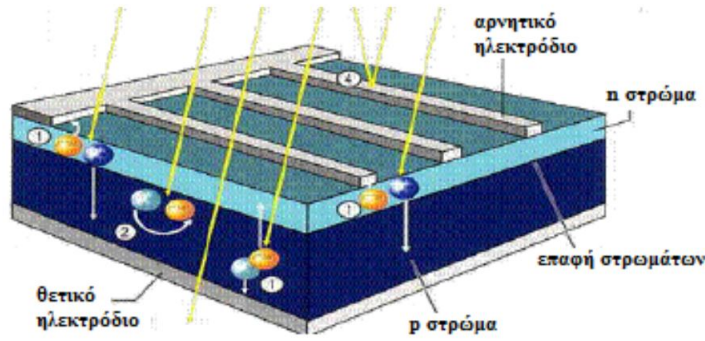
Όπου,

- λ : Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.
- Φ_λ : Το πλήθος των φωτονίων που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος ανάμεσα σε λ μέχρι $\lambda + d\lambda$.

Επομένως η εξίσωση 2.1 μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$I_\Phi(\lambda) = \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (\text{εξ.2.3})$$

Το φωτοβολταϊκό σύστημα μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καμία καταστροφική επίπτωση για το περιβάλλον. Το ισοδύναμό του κύκλωμα έχει μια πηγή ρεύματος (φωτόρευμα-photocurrent I_{SUN}), μια δίοδο που είναι παράλληλα σε αυτή την πηγή, μια αντίσταση σε σειρά και μια ακόμα αντίσταση παράλληλα.



Εικόνα 2.1: Το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καμία καταστροφική επίπτωση για το περιβάλλον. Το ισοδύναμό του κύκλωμα έχει μια πηγή ρεύματος (φωτόρευμα-photocurrent), μια δίοδο που είναι παράλληλα σε αυτή την πηγή, μια αντίσταση σε σειρά και μια ακόμα αντίσταση παράλληλα.

Η αντίσταση σειράς R_s περιγράφει την αντίσταση μεταξύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου και των ακροδεκτών του και την αντίσταση του ημιαγωγού. Από την άλλη, η παράλληλη αντίσταση R_p αντιπροσωπεύει το ρεύμα διαρροής I_P εντός του φωτοβολταϊκού στοιχείου, δηλαδή την απόκλιση του ρεύματος εξόδου που θα έπρεπε να παίρνουμε από ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

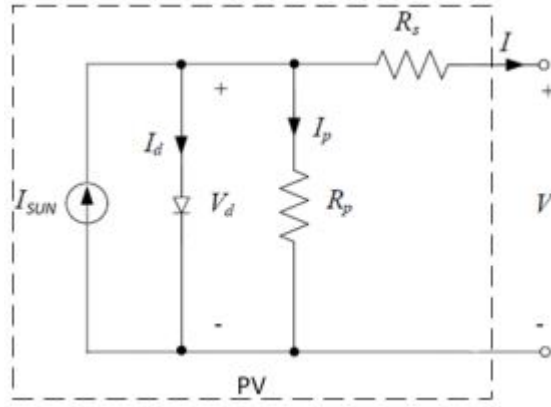
$$I = I_{SUN} - I_D - I_P \quad (\text{εξ.2.4})$$

Δεδομένου ότι:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_d q}{kT}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_P} \quad (\text{εξ.2.5})$$

Καθώς και για την εσωτερική τάση V_d του φωτοβολταϊκού στοιχείου και την τάση στα άκρα του ισχύει:

$$V = V_d - I R_S \quad (\text{εξ.2.6})$$



Εικόνα 2.2: Το φωτοβολταϊκό ισοδύναμο κύκλωμα.

Καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση:

$$I = I_{SUN} - I_S \left(e^{\frac{V+IR_S}{aV_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (\text{εξ.2.7})$$

Όπου ,

- I : Το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- I_S : Το ρεύμα της διόδου ανάστροφου κορεσμού.
- V : Τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- a : Ο παράγοντας ιδανικότητας.
- V_T : Θερμική τάση.
- I_d : Ρεύμα διάχυσης.

Η εξάρτηση του φωτορεύματος I_{SUN} με την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία , μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά ως εξής:

$$I_{SUN} = (I_{PV_{STC}} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (\text{εξ.2.8})$$

Όπου,

- K_I : Ο συντελεστής βραχυκύκλωσης ρεύματος θερμοκρασίας.
- G : Ηλιακή ακτινοβολία σε $\frac{W}{m^2}$.
- G_{STC} : Ονομαστική ηλιακή ακτινοβολία σε $\frac{W}{m^2}$.

- $I_{PV_{STC}}$: Το φωτόρευμα που δημιουργείται υπό συνθήκες STC-Standard Test Condition

Αντίστοιχα, μπορούμε να ορίσουμε και το ρεύμα ανάστροφου κορεσμού I_S ως συνάρτηση της θερμοκρασίας:

$$I_S = I_{S_{STC}} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^3 e^{\frac{q E_g (\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T})}{a K}} \quad (\text{εξ.2.9})$$

Όπου,

- $I_{S_{STC}}$: Το ονομαστικό ρεύμα κορεσμού.
- E_g : Το ενεργειακό κενό (band gap) του ημιαγωγού.
- T_{STC} : Η θερμοκρασία σε συνθήκες STC.
- q : Το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Όσον αφορά τις αντιστάσεις του ισοδύναμου, μπορούμε και για αυτές να εξάγουμε κάποιες εξισώσεις, προσεγγιστικά.

Για απώλειες μικρότερες του 1% αποδεικνύεται ότι μια καλή προσέγγιση για τις R_S και R_P είναι:

$$R_S < \frac{0.01 V_{OC}}{I_{SC}} \quad (\text{εξ.2.10})$$

$$R_P > \frac{100 V_{OC}}{I_{SC}} \quad (\text{εξ.2.11})$$

Όπου,

- V_{OC} : Η τάση ανοιχτοκύκλωσης (προκύπτει με επίλυση της εξ.2.7 για $I = 0$ και $V_d = V_{OC}$ στην εξ.2.6).
- I_{SC} : Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο μπορούμε προσεγγιστικά να το θεωρήσουμε $I_{SC} = I_{SUN}$.

Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η παράλληλη αντίσταση R_P δεν επηρεάζει αρκετά την απόδοση του φωτοβολταϊκού πανέλ, σε αντίθεση με την σε σειρά αντίσταση R_S . Επί της ουσίας, η R_P θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερο ρεύμα διαρροής, ενώ από την άλλη, η R_S θα πρέπει να είναι μικρή ώστε να έχουμε στην έξοδο μεγάλο ρεύμα I .

Υπάρχει μεγάλη βιβλιογραφία αναφορικά με άλλα ισοδύναμα μοντέλα φωτοβολταϊκών πάνελ τα οποία αντιστοιχούν σε πιο ακριβή και για διαφορετικούς σκοπούς. Σε μερικά από αυτά, γίνεται χρήση μιας δεύτερης διόδου προκειμένου να αναπαρασταθεί ο ανασυνδυασμός των φορέων. Υπάρχουν ακόμα και αναφορές που χρησιμοποιούν τρεις διόδους που περιλαμβάνουν επιδράσεις από άλλες δράσεις και δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στα προηγούμενα μοντέλα. Για λόγους απλότητας, στην

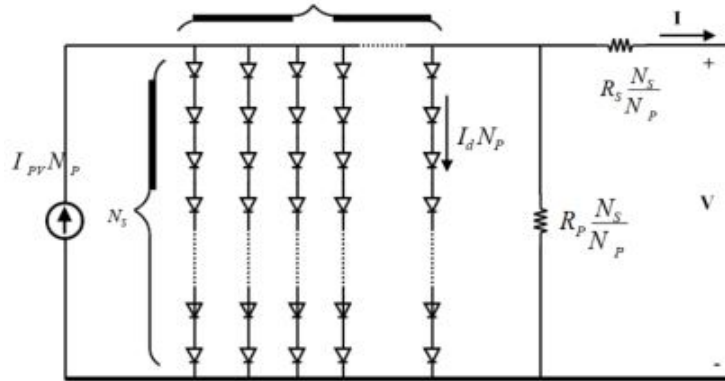
συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκε το μοντέλο της μιας διόδου, όπως και το περιγράψαμε στην αρχή.

Με δεδομένο ότι η συνολική ισχύς που παράγεται από ένα μόλις πάνελ είναι πολύ χαμηλή, χρησιμοποιούμε έναν συνδυασμό από αυτά προκειμένου να καλύψουμε τις ανάγκες μας για κάλυψη της ζήτησης. Ο συνδυασμός αυτών μαζί είναι και ευρέως γνωστός ως φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array). Η εξίσωση που περιγράφει το συνολικό πλέγμα των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι η εξής, και επί της ουσίας αποτελεί γενίκευση της εξ.2.7:

$$I = I_{SUN} N_P - I_S N_P \left(e^{\frac{V + I R_S \frac{N_S}{N_P}}{a V_T N_S}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S \frac{N_S}{N_P}}{R_P \frac{N_S}{N_P}} \quad (\text{εξ.2.12})$$

Όπου,

- N_S : Ο αριθμός των σε σειρά πάνελ.
- N_P : Ο αριθμός των παράλληλων πάνελ.

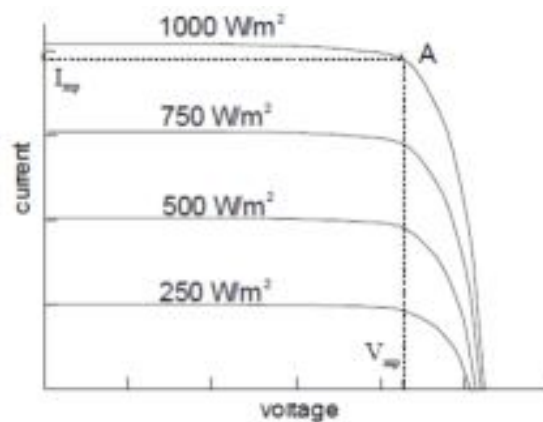


Εικόνα 2.3: Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη.

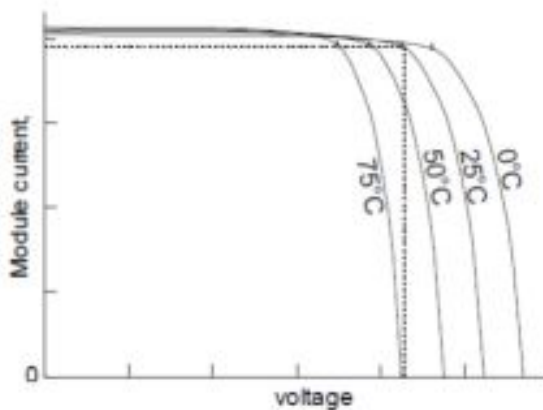
Από τις προηγούμενες σχέσεις διακρίνεται εύκολα ότι το ρεύμα και η τάση εξόδου του συλλέκτη συνδέονται τόσο με την ηλιακή ακτινοβολία, όσο και με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ακτινοβολία επιδρά περισσότερο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} (άρα και κατά συνέπεια στον καθορισμό του ρεύματος εξόδου I) και λιγότερο στην τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} (άρα και στον καθορισμό της τάσης εξόδου V).

Κατά αντιστοιχία, η θερμοκρασία επιδρά περισσότερο στην τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} και λιγότερο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} .



Εικόνα 2.4: Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας



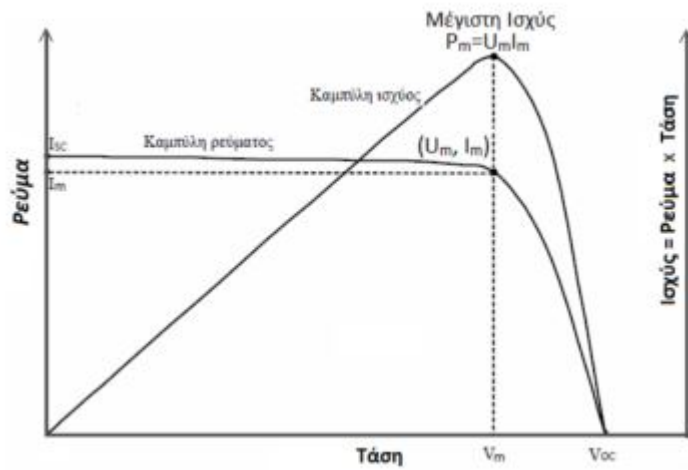
Εικόνα 2.5: Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Παρατηρούμε, ότι η άνοδος της ηλιακής ακτινοβολίας αντιστοιχεί σε άνοδο του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ενώ αντίθετα, η θερμοκρασία έχει αντίστροφη λογική καθώς η άνοδος της οδηγεί σε μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα (Εικόνα 2.4 - Εικόνα 2.5) προκύπτει και το διάγραμμα της τάσης. Από την στιγμή που η τάση και το ρεύμα που παράγονται είναι συνεχής μεγέθη - DC, η ισχύς θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = V I \text{ (εξ.2.13)}$$

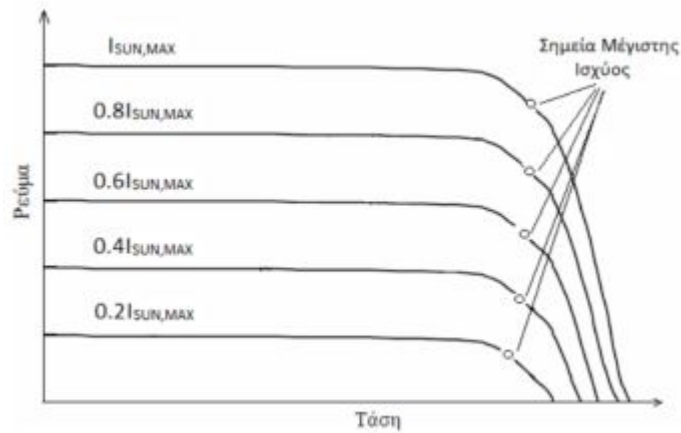
Το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος σε αντιπαράβολή με το διάγραμμα της παραγόμενης τάσης και ρεύματος θα είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 2.6: Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκού συλλέκτη

Από το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 2.6) είναι προφανές ότι η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού συλλέκτη αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σημείο πάνω στην καμπύλη, και ειδικότερα στα σημεία V_m , I_m , που αντιπροσωπεύουν τα σημεία στο γόνατο της καμπύλης.

Ανάλογα με τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας ή της θερμοκρασίας, το σημείο της μέγιστης παραγόμενης ισχύος μπορεί να αλλάζει και να μετατοπίζεται:



Εικόνα 2.7: Σημεία μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Ο συντελεστής πλήρωσης FF - fill factor ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού του μέγιστου (θεωρητικού) ορθογωνίου που μπορεί να χαράξει η καμπύλη I-V σε συνθήκες ακτινοβολίας προς το εμβαδόν που ορίζεται από την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (\text{εξ.2.14})$$

Πέραν αυτού όμως, ορίζεται και ο συντελεστής απόδοσης στοιχείων n συναρτήσει του συντελεστή πλήρωσης FF ως εξής:

$$n = \frac{P_m}{H A} = \frac{I_m V_m}{H A} = \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{H A} \quad (\text{εξ.2.15})$$

Όπου,

- H : Η ένταση της ακτινοβολίας.
- A : Η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού που δέχεται την παραπάνω ένταση.

Ο συντελεστής απόδοσης στοιχείων n μπορεί επίσης να μετασχηματιστεί και ως ακολούθως:

$$n = \frac{\Phi(E_g) V_m}{\Phi E_\mu} \quad (\text{εξ.2.16})$$

Με,

- $\Phi(E_g)$: Η ροή της μερίδας των φωτονίων που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το διάκενο που παρουσιάζει ο ημιαγωγός.
- Φ : Η συνολική φωτονική ροή της ακτινοβολίας που «πέφτει» πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- E_μ : Η μέση ενέργεια που διαθέτουν τα φωτόνια της ακτινοβολίας.

Ένα άλλο μέγεθος το οποίο έχει ενδιαφέρον σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η απόδοση που παρουσιάζει. Προκειμένου να είναι σε θέση να «μετρηθεί» το πόσο αποδοτικό είναι ώστε να καταλήξουμε σε άλλα συμπεράσματα, ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου n_π , ως τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο P_π (δηλαδή την πραγματική παραγόμενη ισχύ) προς το μέγεθος της συνολικής ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του πλαισίου και συμβολίζεται με S :

$$n_\pi = \frac{P_\pi}{H S} \left[\frac{W}{(W/m^2)m^2} \right] \quad (\text{εξ.2.17})$$

ή

$$n_\pi = \frac{E}{\Pi S} \left[\frac{kWh}{(kWh/m^2)m^2} \right] \quad (\text{εξ.2.18})$$

Όπου,

- Π : Είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του πλαισίου και
- H : Είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη σχέση.

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου n_π εξαρτάται επίσης από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου σ_k , που αποτελεί τον λόγο της συνολικής επιφάνειας όπου γίνεται η απορρόφηση της ακτινοβολίας προς την συνολική επιφάνεια όλου του πλαισίου. Θα ισχύει η σχέση:

$$n_\pi = n \sigma_k \text{ (εξ.2.19)}$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου n_π βοηθά επιπλέον στο να οριστούν και μεγέθη όπως είναι η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς και η μέση ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 kW/m^2 , η ισχύ αιχμής P_α ορίζεται ως εξής:

$$P_\alpha(\text{kWp}) = 1(\text{kW/m}^2) S(\text{m}^2) n_\pi \text{ (εξ.2.20)}$$

Εάν βέβαια η ισχύς αιχμής P_α είναι γνωστή, τότε μέσω της ακόλουθης σχέσης μπορεί να υπολογιστεί η μέση παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου:

$$E(\text{kWh/d}) = \Pi(\text{kWh/m}^2\text{d}) \frac{P_\alpha(\text{kWp})}{1(\text{kW/m}^2)} \sigma_\theta \sigma_\rho \text{ (εξ.2.21)}$$

Όπου,

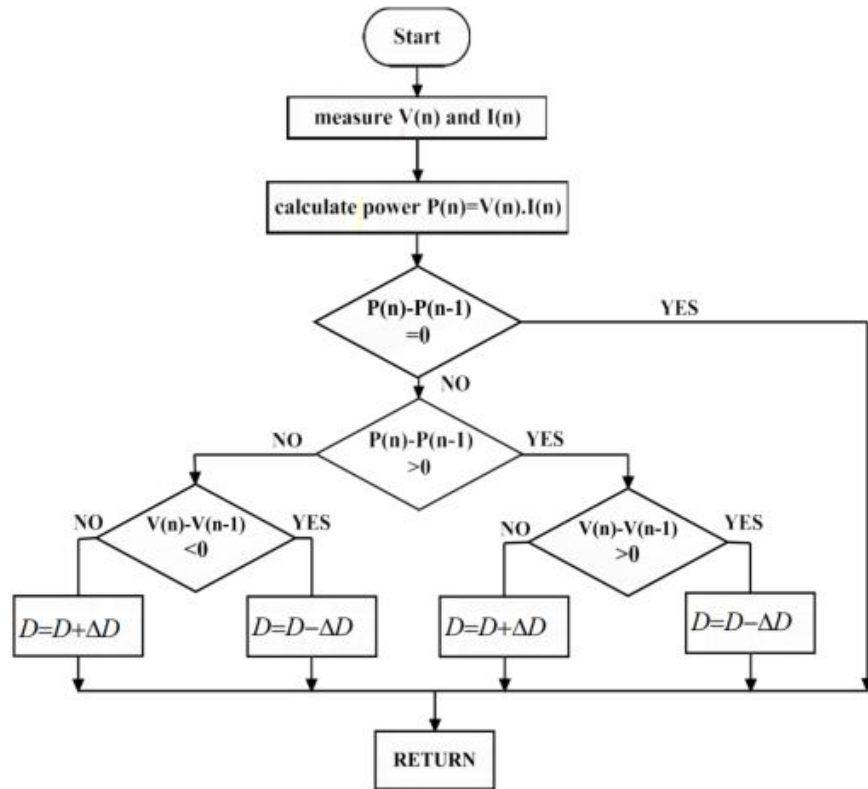
- Π : Είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του πλαισίου και
- σ_θ : Είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής.
- σ_ρ : Είναι ο αδιάστατος συντελεστής καθαρότητας και σχετίζεται με την ρύπανση που έχει δεχθεί το πλαίσιο.

Η απόδοσή των περισσότερων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι της τάξης του 20 %, ενώ ανάλογα με την τεχνολογία και το είδος του πυριτίου που χρησιμοποιείται, υπάρχουν φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου και ταινίας πυριτίου. Οι νέες τεχνολογίες βασίζονται ακόμα και σε τεχνολογία thin film άμορφου πυριτίου και πλαίσια CIGS κρυσταλλικού τύπου.

2.3 Ο αλγόριθμος MPPT

Σύμφωνα με το προηγούμενο διάγραμμα, η συνεχής παρακολούθηση και ο εντοπισμός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποδοτικότερη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη.

Επομένως, κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ενός έξυπνου αλγορίθμου, ο οποίος με πραγματικά δεδομένα κάθε στιγμή θα είναι σε θέση να φέρει το σύστημα σε αυτά τα σημεία.



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα Ροής του Perturb and Observe MPPT αλγορίθμου.

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker-MPPT). Κάθε τύπος αλγορίθμου έχει τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά του.

Ο αλγόριθμος που βασίζεται στην λογική Perturb and Observe είναι ευρέως διαδεδομένος εξαιτίας της απλότητας του και της εφαρμογής του σε πολλές εφαρμογές. Σε αυτήν την τεχνική στηρίχθηκε και ο MPPT αλγόριθμος της συγκεκριμένης εργασίας.

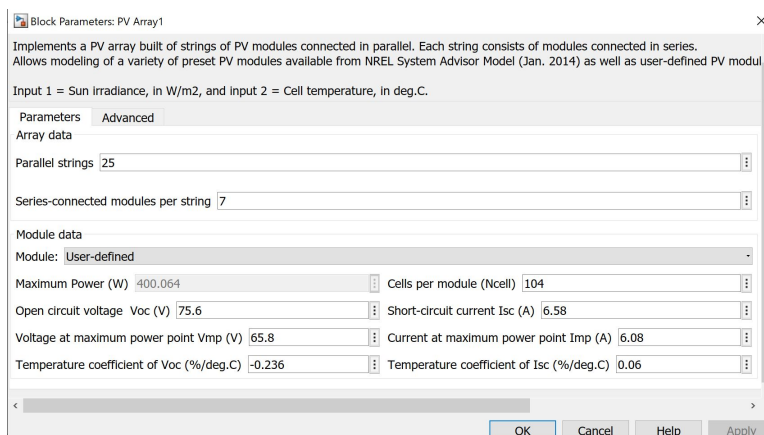
Κάθε στιγμή ο αλγόριθμος ελέγχει την τιμή της τάσης και του ρεύματος και υπολογίζει την ισχύ. Εάν η ισχύς αυτή αλλάζει (συγκριτικά με την παλαιότερη τιμή που είχε) τότε, επιδιώκει να ανακαλύψει εάν αυξήθηκε ή ελαττώθηκε. Εάν η ισχύς μειώθηκε όταν η τάση αυξήθηκε, τότε στο Duty προστίθεται το δ , ενώ σε αντίθετη περίπτωση αφαιρείται το δ . Η ακριβώς αντίθετη διαδικασία συμβαίνει στην

περίπτωση όπου η ισχύς αυξάνεται.

Αυτός ο αλγόριθμος επιδρά πάνω στον DC-DC μετατροπέα και ειδικότερα στον έλεγχο του Duty-Cycle του, με συνέπεια να καθορίζει κάθε στιγμή την παραγόμενη τάση εξόδου.

2.4 Προδιαγραφές Συστήματος Φωτοβολταϊκών Συλλεκτών

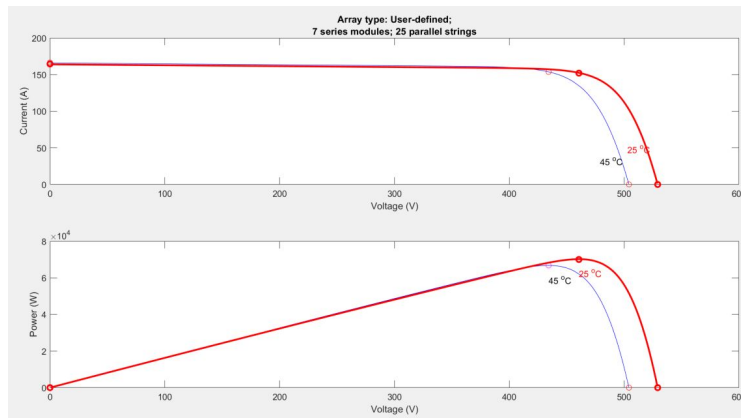
Τα φωτοβολταϊκά στα οποία βασίστηκε η συγκεκριμένη εργασία είναι της εταιρίας SUNPOWER και ειδικότερα τα MAXEON 3: SRP-MAX3-400. Η ονομαστική ισχύ του εκάστοτε πάνελου είναι στα 400W. Το σύστημα, διαθέτει φωτοβολταϊκούς συλλέκτες συνολικής ονομαστικής ισχύος τα 70kW. Για την κάλυψη των αναγκών, αλλά για την όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική απεικόνιση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν 25 παράλληλες σειρές με την εκάστοτε σειρά να έχει 7 σε σειρά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (Εικόνα 2.9.α).



Εικόνα 2.9.α: Το interface του PV array με βάση τις προδιαγραφές.

Με βάση τις παραμέτρους του μοντέλου MAXEON 3: SRP-MAX3-400, η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} προκύπτει στα 75.6 Volts ενώ η μέγιστη τάση V_{MP} παρουσιάστηκε στα 65.8 Volts.

Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της Simulink PV array καθώς και το datasheet της SUNPOWER για το MAXEON 3: SRP-MAX3-400.



Εικόνα 2.9.β: Χαρακτηριστικές της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών του συστήματός.

Όπως προαναφέρθηκε, ο αλγόριθμος MPPT που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην κατηγορία των Perturb and Observe αλγορίθμων με βήμα $\delta = 125e^{-6}$.

3 Μοντέλο Συστήματος Αποθήκευσης

3.1 Η ανάγκη για Σύστημα Αποθήκευσης

Η χρήση μιας δομής αποθήκευσης ενέργειας κρίνεται απαραίτητη λόγω της στοχαστικότητας που παρουσιάζουν οι μεταβολές του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα η ηλιακή ακτινοβολία ή η ταχύτητα του ανέμου. Οι μέσες τιμές που λαμβάνονται για τον υπολογισμό διάφορων παραμέτρων κατά την κατασκευή ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι ενδεικτικές και πολύ συχνό είναι το φαινόμενο της απόκλισης τους. Η χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνεισφέρει στην αύξηση της απόδοσης μιας τέτοιας επένδυσης προσφέροντας κάλυψη των απαιτούμενων αναγκών σε περίπτωση αδράνειας του συστήματος, αξιοποίηση μεγαλύτερου μέρους της παραγόμενης ενέργειας, αλλά και συμβολή στην ευστάθεια και στην ομαλότερη λειτουργία του.

Με την ολοένα αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και με την ανάγκη για διατήρηση του ισοζυγίου της ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο η αποθήκευση ενέργειας, είτε αφορά μικρή ποσότητα είτε μεγαλύτερη, ξανά έρχεται στο προσκήνιο. Όπως περιγράφηκε και νωρίτερα, ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας συμβάλλει στην ευστάθεια της συχνότητας της τάσης αλλά και της παραγόμενης ποιότητας ισχύος που προέρχεται από ένα σύστημα, μέσω της προσφοράς πρωτεύουσας αλλά και δευτερεύουσας εφεδρείας (5-15 sec και 15-90 sec αντίστοιχα).

Οι μονάδες αποθήκευσης συμβάλλουν επιπλέον στην άμεση απόκριση του συστήματος σε σφάλματα μέσω διασυνδεδεμένων διατάξεων αποθήκευσης άμεσης απόδοσης. Πέραν αυτών όμως, η τοποθέτηση ενός συστήματος αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας συμβάλλει ως αποτρεπτικός παράγοντας στην υπερδιαστασιολόγηση συμβατικών μονάδων, καθώς και στην αποφυγή παραβιάσεων των τεχνικών περιορισμών που ενδεχομένως θα έχουν. Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην περαιτέρω διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καταργώντας σταδιακά την ανάγκη για μεγάλες συμβατικές ρυπογόνες μονάδες.

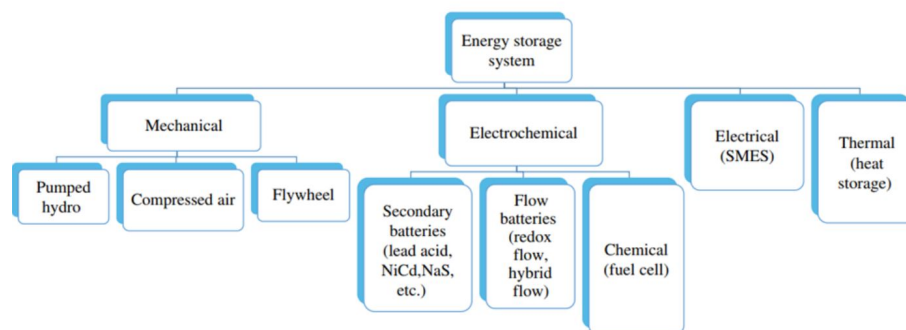
Τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν είναι τόσο άμεσα, όσο και έμμεσα. Σίγουρα, με την εγκατάσταση μια μονάδας αποθήκευσης επιτυγχάνεται βελτίωση της απόδοσης του συστήματος με προφανείς λόγους. Όμως, τα περισσότερα πλεονεκτήματα έρχονται με μη προφανή τρόπο. Η συστηματική τοποθέτηση μονάδων αποθήκευσης σε βάθος χρόνου οδηγεί στην εξάλειψη της ανάγκης για δημιουργία νέων μονάδων που σκοπό έχουν την κάλυψη διάφορων επικουρικών υπηρεσιών. Επίσης, με δεδομένο ότι δεν χρειάζονται τεράστιες μονάδες παραγωγής, είναι πιο εύκολη η μετάβαση σε μια νέα τεχνολογία ηλεκτρικών δικτύων όπως είναι το μικροδίκτυο, καταργώντας τις τεράστιες απώλειες που προκύπτουν από το σημερινό συγκεντρωτικό σύστημα.

Τα οικονομικά οφέλη μιας τέτοιας επένδυσης όπως είναι αναμενόμενο, έχουν άμεση ανταπόκριση και στην αγορά, δηλαδή τους καταναλωτές αλλά και τους προμηθευτές. Η ευελιξία που αποκτούν οι ανεξάρτητοι προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με αυτό. Έχοντας την δυνατότητα να αγοράσουν φθηνή ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους όπου η ζήτηση είναι μειωμένη και η παραγωγή αυξημένη,

μπορούν να διαθέσουν μεγαλύτερο μέρος ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλότερη τιμή (δηλαδή να γίνουν πιο ανταγωνιστικοί) , κατεβάζοντας την Οριακή Τιμή του Συστήματος (ΟΤΣ) και προσφέροντας περισσότερη οικονομία στους καταναλωτές-πελάτες τους. Από την στιγμή που τους δίνεται η δυνατότητα φθηνής και αξιόπιστης ενέργειας δεν χρειάζονται ούτε εγγυημένες τιμές αγοράς μέσω κρατικής επιδότησης αλλά ούτε και ρήτρες εγγυημένης απορρόφησης, προσδίδοντας ακόμα και στο κράτος οικονομικά οφέλη.

3.2 Τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης

Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, με τον χώρο που είναι διαθέσιμος, με τις ανάγκες αλλά και με τις απαιτήσεις που θα ζητηθούν από ένα εν δυνάμει σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ξεχωρίζονται διάφορες κατηγορίες αποθήκευσης που θα το βοηθούσαν να ανταπεξέλθει πιο αποδοτικά. Η Εικόνα 3.1 περιέχει τις βασικότερες από αυτές:



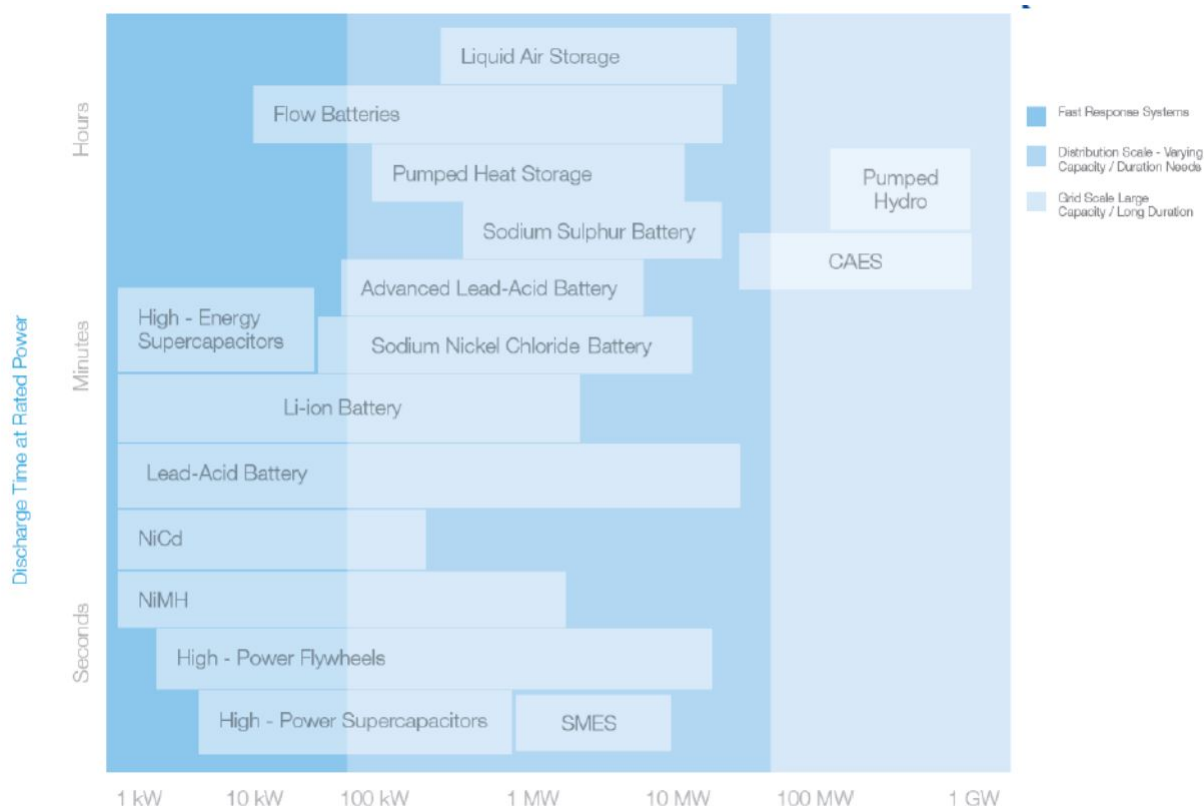
Εικόνα 3.1: Οι βασικότερες κατηγορίες των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Κάποιες από τις παραπάνω τεχνολογίες μπορούν να βρουν εφαρμογή μόνο σε τεράστιες εγκαταστάσεις που αφορούν μεγάλη ποσά ενέργειας, έχοντας ως συνέπεια το μεγάλο τους κόστος (Εικόνα 3.2). Άλλες πάλι, είναι πιο διαδεδομένες ακόμα και σε μικρότερα συστήματα , και αποτελούν μια μέση λύση ανάμεσα στην απόδοση και το κόστος τους. Για παράδειγμα, στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής είναι εφικτό και πιο οικονομικά βιώσιμο (ανάλογα όμως και με την μορφή του εδάφους και την ποικιλομορφία του) η δημιουργία ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης. Κατά αντιστοιχία, σε διατάξεις όπως το φωτοβολταϊκά συστήματα, η αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα με βάση την μπαταρία είναι αρκετά διαδεδομένη.

Η πιο συνήθης λύση αποθήκευσης είναι στην πράξη οι μπαταρίες. Οι μπαταρίες (ή συσσωρευτές) που χρησιμοποιούνται πλέον είναι (σε σχέση με είκοσι χρόνια πριν) πολύ πιο φθηνές, πιο αποδοτικές και πιο ασφαλές κατά την συνεχή και αδιάλειπτη λειτουργία τους. Για αυτούς τους λόγους προτιμούνται έναντι άλλων τεχνολογιών,

που σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται ακόμα και εξειδικευμένο προσωπικό για την λειτουργία τους. Λειτουργούν αξιοποιώντας την χημική ενέργεια και έχουν ανάλο- γα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν διαφορετική χωρητικότητα, απόδοση και διάρκεια ζωής σε κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Οι κυριότερες τεχνολογίες αυτών είναι οι εξής:

- Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος: Έχουν μικρό κόστος και μικρή διάρκεια ζωής (300 με 1500 κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης).
- Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd): Ανήκουν στην κατηγορία των αλκα- λικών μπαταριών μαζί με τις νικελίου-υβριδίου μετάλλου (Ni-MH) και τις νικελίου-ψευδαργύρου (Ni-Zn). Έχουν υψηλότερο κόστος αλλά και με- γαλύτερη διάρκεια ζωής συγκριτικά με τις μολύβδου-οξέος (1000 με 2000 κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης).
- Μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου (Li-Ion): Συνδυάζουν την υψηλή απόδοση με την μεγάλη χωρητικότητα και τους πολλούς κύκλους λειτουργίας, κάνοντας τις την καλύτερη επιλογή για μικρομεσαία συστήματα αποθήκευσης.

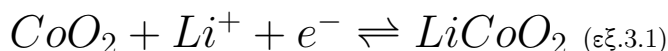


Εικόνα 3.2: Τεχνολογίες αποθήκευσης και ο βαθμός εφεδρείας που προσφέρουν.

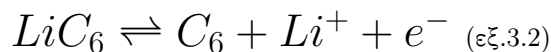
3.3 Οι μπαταρίες Li-Ion

Το σύστημα αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στην συγκεκριμένη εργασία βασίστηκε στην τεχνολογία των μπαταριών ιόντων λιθίου Li-Ion. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου Li-Ion χρησιμοποιούν μια ενδιάμεση ένωση που αποτελείται από λίθιο και λειτουργεί ως το υλικό του ενός ηλεκτροδίου. Τα δύο ηλεκτρόδια, που αποτελούν το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο αντίστοιχα, συνδέονται μεταξύ τους με ένα ηλεκτρολύτη, ο οποίος λειτουργεί ως το αγώγιμο μέσο προκειμένου να μετακινηθούν τα ιόντα λιθίου από το ένα ηλεκτρόδιο προς το άλλο. Η αποθήκευση της ενέργειας επιτυγχάνεται με την ροή ηλεκτρονίων από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της μπαταρίας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την περίπτωση της εκφόρτισης. Κατά την εκφόρτιση, επομένως, τα θετικά ιόντα λιθίου μετατοπίζονται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο οποίο βρίσκονται (αποτελείται συνήθως από γραφίτη C_6) προς το θετικό ηλεκτρόδιο, σχηματίζοντας έτσι μέσω του ηλεκτρολύτη μια εικονική ένωση. Κατά αντιστοιχία, στην περίπτωση της φόρτισης η μετακίνηση των ηλεκτρονίων και των ιόντων λιθίου γίνεται από το θετικό ηλεκτρόδιο προς το αρνητικό.

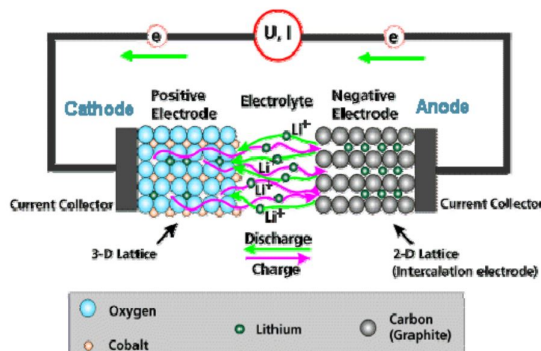
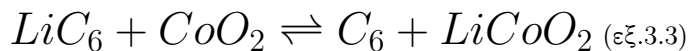
Η χημική εξίσωση η οποία περιγράφει την ημιαντίδραση του θετικού ηλεκτροδίου (κάθοδος) είναι η ακόλουθη:



Κατά αντιστοιχία, η χημική εξίσωση που περιγράφει την ημιαντίδραση του αρνητικού ηλεκτροδίου (άνοδος) για τον γραφίτη C_6 θα είναι η ακόλουθη:

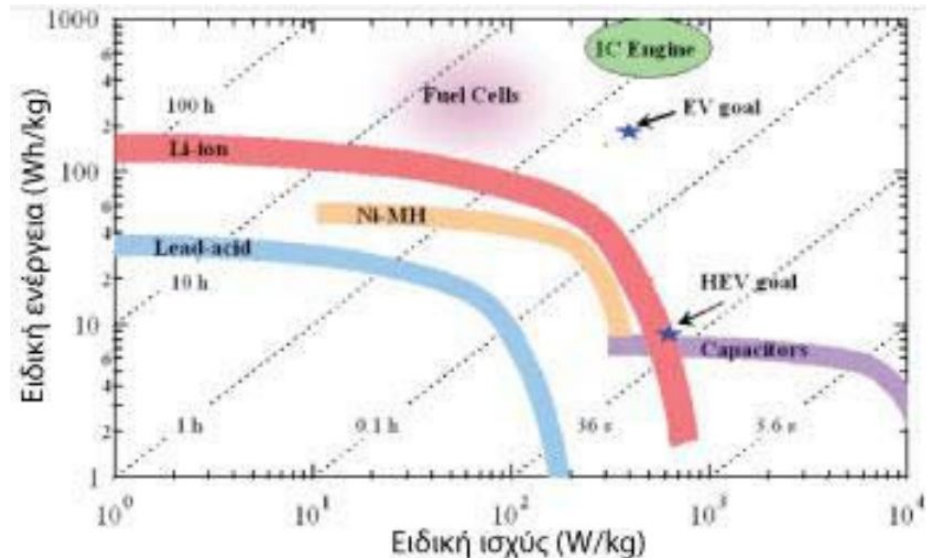


Ως αποτέλεσμα η πλήρης αντίδραση που προκύπτει για την συνολική μπαταρία θα είναι η ακόλουθη (με κατεύθυνση προς τα αριστερά για την φόρτιση και προς τα δεξιά για την εκφόρτιση):



Εικόνα 3.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο μιας μπαταρίας Li-Ion.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου γνώρισαν πολύ μεγάλη επιτυχία στον τομέα των μικροσυσκευών αρκετά νωρίτερα από την ενσωμάτωσή τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, χάρη στο μέγεθος τους και στην πολύ καλή απόδοσή τους. Στην εικόνα 3.4 παρατηρείται η σχέση μεταξύ της ειδικής ενέργειας εκφραζόμενη σε Wh/kg και της ενεργειακής πυκνότητας εκφραζόμενη σε Wh/L για διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης:



Εικόνα 3.4: Σύγκριση ανάμεσα σε διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης σχετικά με την ειδική ενέργεια και την ειδική ισχύ.

Από την παραπάνω εικόνα συμπεραίνεται ότι η τεχνολογία των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι αρκετά καλύτερη έναντι των παλαιότερου τύπου μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, η τεχνολογία στην οποία βασίζονται οι μπαταρίες ιόντων λιθίου τις επιτρέπει να μην παρουσιάζουν προβλήματα τα οποία είχαν άλλες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, στις μπαταρίες νικελίου - καδμίου εμφανίζεται το λεγόμενο φαινόμενο της μνήμης, κατά το οποίο η μπαταρία φαίνεται να «θυμάται» μια χαμηλότερη στάθμη από κάποια στιγμή που δεν ήταν πλήρως φορτισμένη.

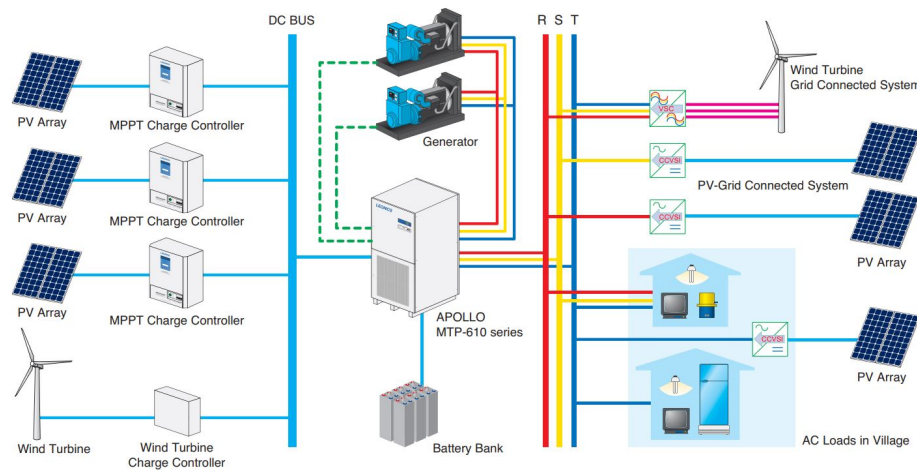
Την αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι μπαταρίες μολύβδου - οξέος, οι οποίες αποδίδουν λιγότερο όσο περισσότερο μένουν σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Η ύπαρξη των μπαταριών ιόντων λιθίου αφανίζει τέτοιου είδους προβλήματα προσφέροντας μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Το στοιχείο το οποίο παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε οποιασδήποτε τεχνολογίας σύστημα αποθήκευσης είναι το ποσοστό της εναπομείνουσας ενέργειας. Το λεγόμενο State Of Charge (SOC) δίνει πληροφορία σχετικά με το πότε η μπαταρία έχει ικανότητα εκφόρτισης και πότε απαιτεί φόρτιση αντίστοιχα. Το State Of Charge εκφράζεται ως ποσοστό κάποιας αναφοράς. Μπορεί να υπάρχει είτε

με βάση την ονομαστική χωρητικότητα, ή ακόμα πιο συχνά, με βάση την χωρητικότητα που είχε η μπαταρία στον τελευταίο κύκλο λειτουργίας της. Το πρόβλημα όμως που προκύπτει είναι ότι το συγκεκριμένο μέγεθος μπορεί να μην είναι πολύ αξιόπιστο, καθώς τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας με την πάροδο του χρόνου ή για άλλους λόγους (όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία και το βαθμός εκφόρτισης) αλλοιώνονται.

3.4 Προδιαγραφές Συστήματος Αποθήκευσης

Για την προσομοίωση του συστήματος αποθήκευσης για την συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκαν μπαταρίες τεχνολογίας Li-Ion ικανές να αποδώσουν ενέργεια 1900kWh. Για την όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσομοίωση του συνολικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το datasheet της LEONICS και ειδικότερα το APOLLO MTP-610 series που αποτελεί έναν bidirectional converter ιδανικό για χρήση ενός μικροδικτύου με τα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως του μικροδικτύου που εξετάζεται.



Εικόνα 3.5: Ενδεικτική συνδεσμολογία και ικανότητα επεξεργασίας του APOLLO MTP-610

Η παραπάνω εικόνα δείχνει προτεινόμενες συνδεσμολογίες που μπορεί να επεξεργαστεί ο συγκεκριμένος bidirectional converter . Για το υπο εξέταση σύστημα της συγκεκριμένης εργασίας περιορίστηκε η χρήση του μόνο πάνω στην συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων και του συστήματος αποθήκευσης.

Για την υλοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το module της Simulink Battery το οποίο και προσαρμόστηκε κατά τις απαιτήσεις του datasheet που ακολουθεί (Εικόνα 3.6):

LEONICS®

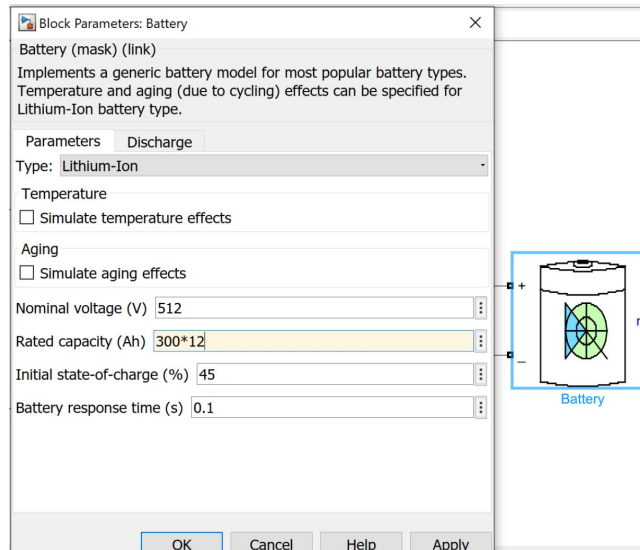
APOLLO MTP-610 series Three Phase Bidirectional Dual Mode Hybrid Inverter for Mini-Grid System



MODEL	MTF-611E	MTF-612E	MTF-613E	MTF-611F	MTF-612F	MTF-613F	MTF-614F	MTF-615F	MTF-616F	MTF-617F	MTF-618F	MTF-619F	MTF-6110F	MTF-6111H	MTF-6113H	MTF-6115H	MTF-6117H
RATED POWER	10 kW	15 kW	25 kW	10 kW	15 kW	25 kW	30 kW	45 kW	60 kW	75 kW	90 kW	100 kW	120 kW	150 kW	200 kW	250 kW	300 kW
BATTERY	120 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			480 Vdc			480 Vdc	
Nominal Voltage	120 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			480 Vdc			480 Vdc	
Max. charging current	56 A	84 A	130 A	28 A	42 A	72 A	84 A	125 A	168 A	200 A	250 A	280 A	335 A	200 A	280 A	350 A	418 A
Max. battery current	114 A	170 A	264 A	57 A	85 A	142 A	170 A	255 A	340 A	425 A	510 A	570 A	680 A	425 A	570 A	710 A	850 A
EXTERNAL DC CHARGER*	120 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			480 Vdc			480 Vdc	
Nominal voltage	120 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			240 Vdc			480 Vdc			480 Vdc	
Max. current	100 A	100 A	200 A	57 A	60 A	100 A	100 A	200 A	300 A	300 A	400 A	400 A	400 A	300 A	400 A	400 A	500 A
AC INPUT FROM GENERATOR	> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW	
Recommended generator power	> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW			> 20 kW	
Voltage	380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N) ± 10%			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N) ± 10%			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N) ± 10%			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N) ± 10%			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N) ± 10%			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N) ± 10%	
Phase	Three phase			Three phase			Three phase			Three phase			Three phase			Three phase	
Frequency	50 / 60 Hz ± 3 Hz			50 / 60 Hz ± 3 Hz			50 / 60 Hz ± 3 Hz			50 / 60 Hz ± 3 Hz			50 / 60 Hz ± 3 Hz			50 / 60 Hz ± 3 Hz	
Max. AC current	32 A	48 A	80 A	32 A	48 A	80 A	96 A	144 A	191 A	240 A	287 A	319 A	382 A	478 A	637 A	796 A	955 A
Automatic start / stop	Relay dry contact 10 A (2 sets of ACC contact for 2 generators)			Relay dry contact 10 A (2 sets of ACC contact for 2 generators)			Relay dry contact 10 A (2 sets of ACC contact for 2 generators)			Relay dry contact 10 A (2 sets of ACC contact for 2 generators)			Relay dry contact 10 A (2 sets of ACC contact for 2 generators)			Relay dry contact 10 A (2 sets of ACC contact for 2 generators)	
AC OUTPUT	380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)	
Voltage	380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)			380 / 400 / 415 Vac (L-L) / 220 / 230 / 240 Vac (L-N)	
Voltage regulation	± 0% (steady load), < 7% at 100% step load within 0.1 sec.			± 0% (steady load), < 7% at 100% step load within 0.1 sec.			± 0% (steady load), < 7% at 100% step load within 0.1 sec.			± 0% (steady load), < 7% at 100% step load within 0.1 sec.			± 0% (steady load), < 7% at 100% step load within 0.1 sec.			± 0% (steady load), < 7% at 100% step load within 0.1 sec.	
Phase	Three phase			Three phase			Three phase			Three phase			Three phase			Three phase	
Frequency	50 / 60 Hz ± 0.1% (auto sensing)			50 / 60 Hz ± 0.1% (auto sensing)			50 / 60 Hz ± 0.1% (auto sensing)			50 / 60 Hz ± 0.1% (auto sensing)			50 / 60 Hz ± 0.1% (auto sensing)			50 / 60 Hz ± 0.1% (auto sensing)	
Wave form	Pure sine wave			Pure sine wave			Pure sine wave			Pure sine wave			Pure sine wave			Pure sine wave	
THD	total < 3%			total < 3%			total < 3%			total < 3%			total < 3%			total < 3%	
Max. surge current	200%			200%			200%			200%			200%			200%	
Max. AC current	15.2 A	22.7 A	37.8 A	15.2 A	22.7 A	37.8 A	45.4 A	68.2 A	90.9 A	113.6 A	136.3 A	151.5 A	181.8 A	227.3 A	303 A	378.8 A	454.5 A
ISOLATION	Galvanic isolation			Galvanic isolation			Galvanic isolation			Galvanic isolation			Galvanic isolation			Galvanic isolation	
EFFICIENCY	Inverter peak efficiency			Inverter peak efficiency			Inverter peak efficiency			Inverter peak efficiency			Inverter peak efficiency			Inverter peak efficiency	
PROTECTION	Over current, Over load, Short circuit, Over temperature, Over voltage, Under voltage			Over current, Over load, Short circuit, Over temperature, Over voltage, Under voltage			Over current, Over load, Short circuit, Over temperature, Over voltage, Under voltage			Over current, Over load, Short circuit, Over temperature, Over voltage, Under voltage			Over current, Over load, Short circuit, Over temperature, Over voltage, Under voltage			Over current, Over load, Short circuit, Over temperature, Over voltage, Under voltage	
INDICATOR	LED			LED			LED			LED			LED			LED	
LCD display	LCD display			LCD display			LCD display			LCD display			LCD display			LCD display	
AUDIBLE ALARM	Low battery, Inverter fault, High temperature			Low battery, Inverter fault, High temperature			Low battery, Inverter fault, High temperature			Low battery, Inverter fault, High temperature			Low battery, Inverter fault, High temperature			Low battery, Inverter fault, High temperature	
COOLING	Automatic cooling fan			Automatic cooling fan			Automatic cooling fan			Automatic cooling fan			Automatic cooling fan			Automatic cooling fan	
ENVIRONMENT	Temperature			Temperature			Temperature			Temperature			Temperature			Temperature	
	0 - 45 °C			0 - 45 °C			0 - 45 °C			0 - 45 °C			0 - 45 °C			0 - 45 °C	

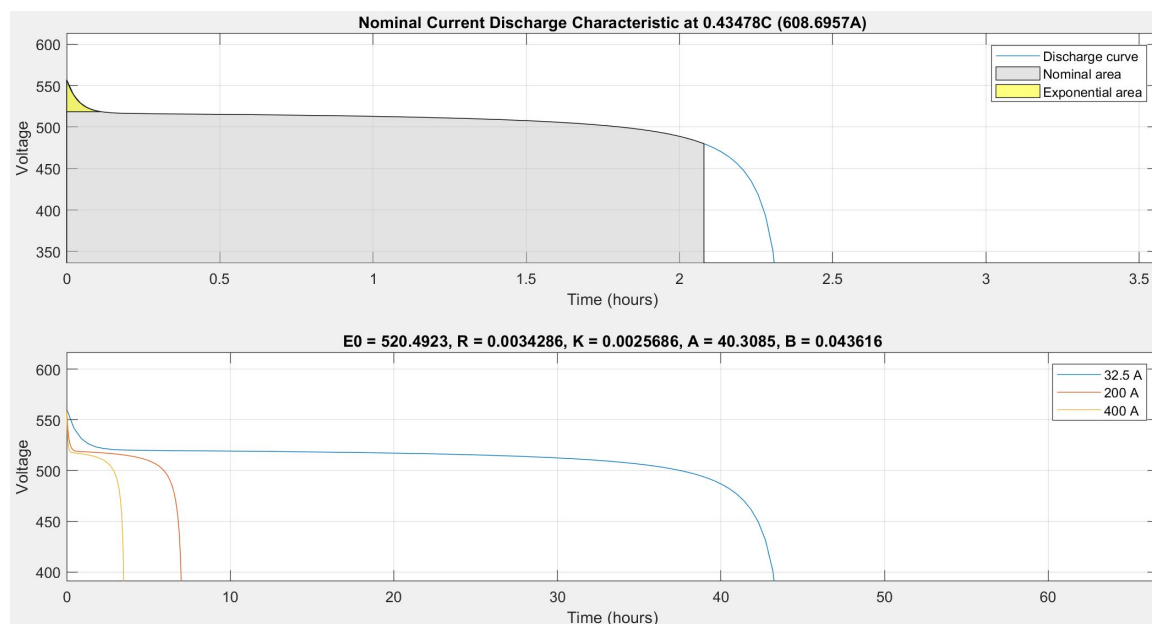
Εικόνα 3.6: Datasheet του bidirectional converter που χρησιμοποιήσαμε.

Παρακάτω (Εικόνα 3.7) είναι το interface του μοντέλου καθώς και ο ορισμός των παραμέτρων του:



Εικόνα 3.7: Το interface του μοντέλου της μπαταρίας στην Simulink.

Τα διαγράμματα της χαρακτηριστικής του ρεύματος εκφόρτισης του αποθηκευτικού στοιχείου ,που δίνει πληροφορίες σχετικά με την περιοχή λειτουργίας ανάλογα με τον χρόνο και την τάση που παρατηρείται στα άκρα του , αλλά και της δυνατότητας εκφόρτισης του σε συνάρτηση με τον χρόνο και το ρεύμα εκφόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.8:



Εικόνα 3.8: Τα διαγράμματα του ρεύματος εκφόρτισης και του χρόνου εκφόρτισης.

Οι σταθερές που αναγράφονται στο πάνω μέρος του δεύτερου διαγράμματος προκύπτουν από το ίδιο το σύστημα, και είναι αποτέλεσμα της Simulink για τα εκάστοτε δεδομένα που της εισάγονται.

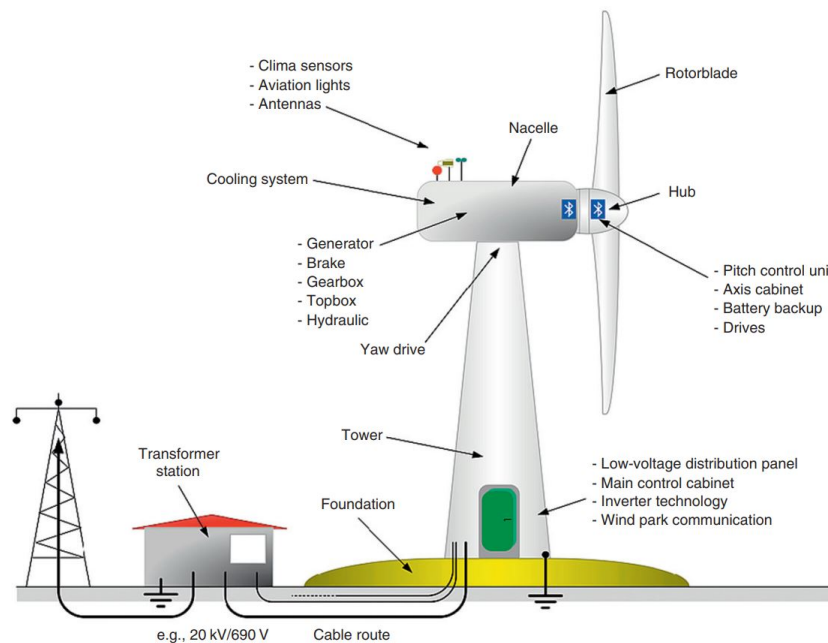
Είναι επίσης εμφανές, ότι η ονομαστική τάση του συστήματος είναι στα 512 Volt. Επί της ουσίας, έχουμε αφήσει να εννοηθεί ότι χρησιμοποιήσαμε (από το datasheet στην εικόνα 3.6) τον bidirectional converter με τον ακριβή κωδικό MTP-6111H με ονομαστική ισχύ στα 150 kW, για να φέρουμε το σύστημα στις δικές μας ανάγκες που προέκυψαν από τις τάσεις και τα ρεύματα εξόδου του φωτοβολταϊκού. Η τάση δεν είναι στα 480 Volt όπως και θα έπρεπε να είναι σύμφωνα με τον κατασκευαστή, επειδή οι συγκεκριμένες τιμές είναι για μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Για την ενσωμάτωση μπαταριών τεχνολογίας ιόντων λιθίου, η τάση θα πρέπει να είναι κατάλληλα προσαρμοσμένη. Η ονομαστική τάση που έχουν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι στα 12.8 Volt. Επομένως, για μια συστοιχία 40 μπαταριών συνδεδεμένες σε σειρά προκύπτουν τα 512 Volt. Επιπλέον, για την απόδοση 1900kWh υπό τάση 512 Volt και με χωρητικότητα 300 Ah απαιτούνται 12 παράλληλες σειρές μπαταριών ή συνολικά 480 μπαταρίες.

4 Το Μοντέλο της Ανεμογεννήτριας

4.1 Η Στοχαστική Φύση του Ανέμου

Ο άνεμος, όπως και η ηλιοφάνεια, αποτελεί ένα μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που όμως δεν μπορεί εύκολα να τον τεθεί υπό τις εκάστοτε απαιτήσεις. Η πρώτη προσπάθεια προκειμένου να γίνει χρήση ενός μέρους της δύναμής του έγινε μέσω των ανεμόμυλων πολλά χρόνια πριν, και αυτό για χρήσεις διαφορετικές της παραγωγής ενέργειας. Η σημερινή αξιοποίηση του κατά αυτόν τον τρόπο είναι προϊόν τεχνολογικής ανάπτυξης μόλις λίγων δεκαετιών, και μέχρι σήμερα επιδέχεται βελτιώσεων.

Η ανεμογεννήτρια σαν μια μονάδα παραγωγής αποτελεί μια πολύ περίπλοκη κατασκευή, αφού καταφέρνει και ενσωματώνει στον τρόπο λειτουργίας της γνωστικά επίπεδα από πολλούς κλάδους της επιστήμης όπως για παράδειγμα η αεροδυναμική, η μηχανολογική μηχανική, η ηλεκτρονική μηχανική και η ηλεκτρική μηχανική, καθώς επίσης απαιτεί αρκετές γνώσεις πάνω σε τεχνολογίες υλικών, μετεωρολογικές προβλέψεις, αυτοματισμούς και συστήματα ελέγχου, και πολλά άλλα.



Εικόνα 4.1: Τυπική δομή μιας Ανεμογεννήτριας.

Όπως διακρίνεται από την εικόνα 4.1, πρόκειται (συνήθως) για τεράστιες κατασκευές, καλά παγιωμένες στο έδαφος, που αποτελούνται από μια πληθώρα συστημάτων και τεχνολογιών προκειμένου να λειτουργήσουν αποδοτικά και με ασφάλεια, ακόμα και μέσω απομακρυσμένης λειτουργίας.

Παρόλο που ο άνεμος παρουσιάζει έντονη στοχαστικότητα, έχει αποδειχτεί ότι σε βάθος χρόνου η συμπεριφορά του και ειδικότερα η πιθανότητα εμφάνισης μιας ταχύτητας του ανέμου, μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την κατανομή πιθανότητας Weibull.

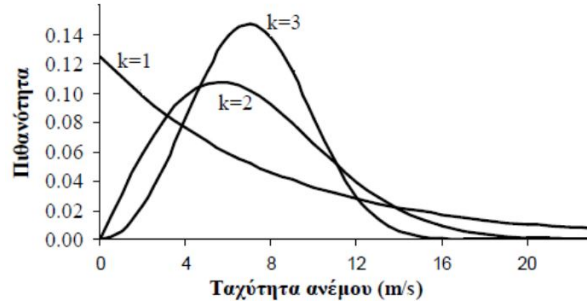
Ο μαθηματικός τύπος της κατανομής αυτής είναι ο εξής:

$$f(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k} \quad (\text{εξ.4.1})$$

Όπου,

- U : Η ταχύτητα του ανέμου.
- k : Η παράμετρος σχήματος της κατανομής.
- c : Η παράμετρος κλίμακας της ταχύτητας του ανέμου.

Το k επηρεάζει την μορφή της καμπύλης της κατανομής πιθανότητας για μια συγκεκριμένη ταχύτητα U με τρόπο τέτοιο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2:



Εικόνα 4.2: Η επίδραση του συντελεστή k στην καμπύλη της κατανομής πιθανότητας.

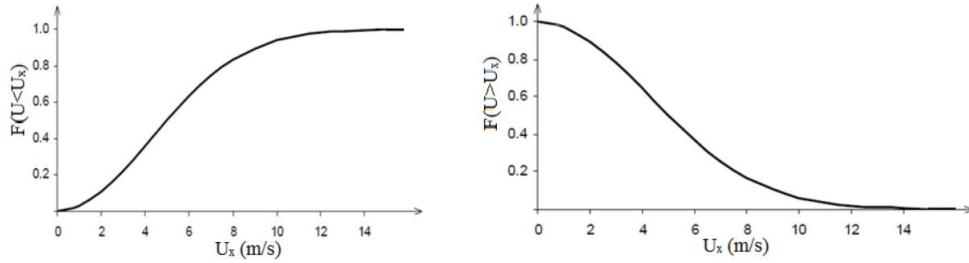
Έχοντας διαθέσιμη την εξίσωση 4.1 μπορεί να εξαχθεί η αθροιστική (ή αλλιώς σωρευτική) κατανομή πιθανότητας του ανέμου (Εικόνα 4.3 αριστερά). Η αθροιστική κατανομή πιθανότητας βοηθά στην αντίληψη του ποσού της ποσότητας που αντιστοιχεί σε μέγεθος μικρότερο ή ίσο με μια συγκεκριμένη τιμή. Είναι δηλαδή, η πιθανότητα η ταχύτητα U να είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη ταχύτητα αέρα U_x .

Επομένως, θα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$F(U \leq U_x) = \int_0^{U_x} f(U) dU = 1 - e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \quad (\text{εξ.4.2})$$

Συνεπώς για την $F(U \geq U_x)$ θα ισχύει:

$$F(U \geq U_x) = e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \quad (\text{εξ.4.3})$$



Εικόνα 4.3: Η μορφή της αθροιστικής κατανομής (αριστερά) και της συμπληρωματικής της καμπύλης διάρκειας (δεξιά).

Η κατανομή Rayleigh προκύπτει από την κατανομή Weibull για $k = 2$, και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού καταφέρνει να απλοποιήσει αρκετά την εξίσωση 4.1 όπως φαίνεται και παρακάτω. Επιπλέον, δεν είναι λάθος να θεωρηθεί ότι ο άνεμος συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο όπως για $k = 2$ προκειμένου να περιγραφεί σε πιο τυποποιημένες σχέσεις.

Η κατανομή Rayleigh θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F(U) = \frac{2U}{c^2} e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^2} \quad (\text{εξ.4.4})$$

Πέραν αυτών, αποδεικνύεται εύκολα ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου μπορεί να εκφραστεί από την εξής σχέση:

$$\bar{U} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad (\text{εξ.4.5})$$

Και κατά συνέπεια, η εξίσωση 4.4 μπορεί σύμφωνα με την εξίσωση 4.5 να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$F(U) = \frac{\pi U}{2(\bar{U})^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2} \quad (\text{εξ.4.6})$$

Κατά αντιστοιχία, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η μέση κυβική ταχύτητα του ανέμου θα δίνεται ως συνάρτηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου:

$$\overline{U^3} = \frac{3c^3\sqrt{\pi}}{4} = \frac{6(\bar{U})^3}{\pi} \quad (\text{εξ.4.7})$$

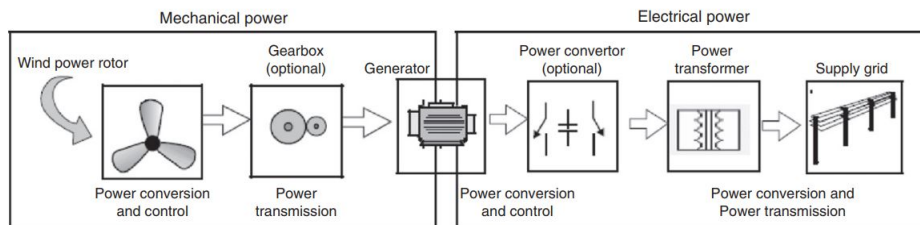
4.2 Μοντελοποίηση του συστήματος της Ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια όπως προαναφέρθηκε είναι ένας πολύ περίπλοκος μηχανισμός που απαιτεί την συνύπαρξη και αξιοποίηση πολλών ειδικοτήτων και τεχνολογιών. Στα βασικά της μέρη, μπορούμε να διαχωριστεί στο μηχανικό της μέρος, στο ηλεκτρικό της μέρος και τέλος στην διασύνδεσή της με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μηχανικό της μέρος αποτελείται από τον δρομέα που είναι διασυνδεδεμένος με τα πτερύγια τα οποία τον κινούν με την βοήθεια του ανέμου. Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μια αεροδυναμική ροπή που κινεί τον άξονα περιστροφής, και κατά συνέπεια μετατρέπει την ενέργεια σε κινητική ενέργεια του δρομέα.

Μέσα στο μηχανικό κομμάτι της μηχανής θα μπορούσε να ενταχθεί και το κιβώτιο ταχυτήτων. Προκειμένου ο άξονας περιστροφής να μπορέσει να παράξει ρεύμα μέσω μιας γεννήτριας, θα πρέπει να περιστρέφεται και με κάποια συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό δεν είναι εφικτό και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται ένα μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox), προκειμένου να μετατρέψει την σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του άξονα λόγω του αέρα στην υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας. Φυσικά, είναι λογικό οτι ανάλογα με την τεχνολογία της γεννήτριας αλλά και το μέγεθός της παραγωγής της (σε Watt), μπορεί αυτό το κιβώτιο να μην υπάρχει.

Σε ό,τι αφορά το ηλεκτρικό κομμάτι της ανεμογεννήτριας, αυτό περιλαμβάνει την γεννήτρια παραγωγής ρεύματος, τα διάφορα συστήματα μετατροπής της τάσης και του ρεύματος, αλλά και συστήματα ελέγχου και ασφάλειάς της. Στις γεννήτριες υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες (θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω) ανάλογα με τον κατασκευαστή, που σκοπό έχουν την κάλυψη οποιασδήποτε ανάγκης είτε αυτό αφορά παραγωγή ισχύος, είτε αφορά στήριξη της τάσης μέσω της άεργου ισχύος. Οι διάφοροι ηλεκτρονικοί μετατροπείς βασίζονται στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος (επίσης θα αναλυθούν εκτενέστερα αργότερα), και σκοπό έχουν την εξομάλυνση της λειτουργίας απέναντι στις διαταραχές του ανέμου.



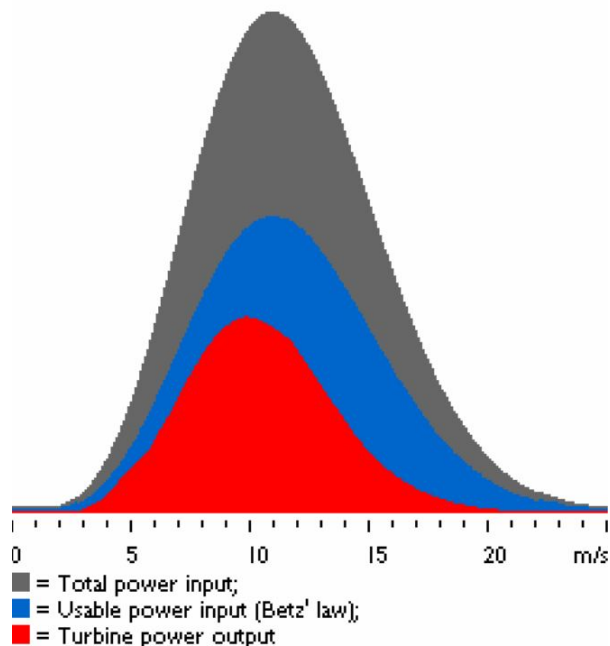
Εικόνα 4.4: Τα κυρίως μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας.

Τέλος, σε ό,τι αφορά την διασύνδεση με το κυρίως δίκτυο, εκεί έχουμε την ύπαρξη μετασχηματιστή καθώς και διάφορων ρυθμιστικών διατάξεων που παίζουν τον ρόλο των φίλτρων, προκειμένου στο σημείο της διασύνδεσης η παροχή της ενέργειας να είναι όσο το δυνατόν ομαλότερη.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας είναι περιορισμένη και επί της ουσίας έχει ένα άνω όριο. Γενικά, μια αιολική μηχανή δεν μπορεί να αξιοποιήσει στο 100% την παραγόμενη από τον άνεμο κινητική ενέργεια. Εάν γίνει η υπόθεση ότι κάτι τέτοιο είναι εφικτό, τότε όλη η μάζα του αέρα που διαπερνά την πτερωτή της μηχανής επί της ουσίας θα ήταν μηδενική, δίνοντας συνεχώς μηδενική παραγωγή ενέργειας, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με το αρχικό ποσοστό αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας.

Το μέγιστο ποσοστό ενέργειας το οποίο μπορεί μια ανεμογεννήτρια να αξιοποιήσει αποτελεσματικά καθορίστηκε από τον Betz το 1919 και ορίστηκε, σύμφωνα με μελέτες που έκανε σε δίσκο που ενεργεί πάνω σε ρευστό, στο 16/27 ή 59%. Πραγματικά, οι σημερινές αιολικές μηχανές πετυχαίνουν μια απόδοση κοντά στο 75-80% του ορίου αυτού.

Power of the Wind



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα που απεικονίζει το ποσό της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με το όριο Betz.

Με βάση την θεωρία του δίσκου ενέργειας του Betz, μπορούν να περιγραφούν η προσπίπτουσα ισχύ του ανέμου, η μηχανική ισχύ των πτερυγίων και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο της γεννήτριας από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_a = \frac{1}{2}\rho AU^3 \quad (\text{εξ.4.8})$$

$$P_m = \frac{1}{2}\rho C_p\left(\frac{\omega R}{v}, \beta\right) AU^3 \quad (\text{εξ.4.9})$$

και

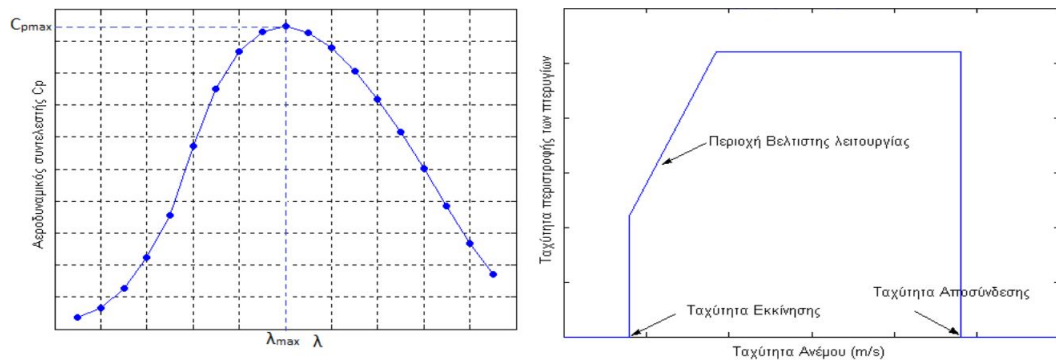
$$P_e = n_t P_m \quad (\text{εξ.4.10})$$

Όπου,

- $A = \pi R^2$: Η επιφάνεια που καλύπτει ο δίσκος ακτίνας R σε μια περιστροφή (σε m^2).
- n_t : Ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτρομηχανολογικού μέρους της γεννήτριας.
- $\rho = 1.225 \frac{288.15}{T} \frac{P}{1013.3}$: Η πυκνότητα του αέρα συναρτήσει της ατμοσφαιρικής πίεσης P (σε mb) και της θερμοκρασίας T του αέρα (σε $^{\circ}K$). Πολύ συχνά θεωρείται σταθερή και ίση με 1.25 kg/m^3 .
- $C_p\left(\frac{\omega R}{v}, \beta\right) = \frac{P_m}{P_a}$: Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος των πτερυγίων, με το πηλίκο $\frac{\omega R}{v} = \lambda$ να εκφράζει τον λόγο της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου.
- β : Η γωνία κλίσης των πτερυγίων (ή αλλιώς και pitch). Ουσιαστικά είναι η γωνία που εκφράζει την κλίση των πτερυγίων ως προς τον κάθετο στο πτερύγιο άξονα και ρυθμίζει την γωνία πρόσπτωσης του ανέμου.
- ω : Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων εκφραζόμενη σε rad/sec.

Αποδεικνύεται ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p των πτερυγίων θα εξαρτάται μόνο από τον λόγο της ταχύτητας του ακροπτερυγίου λ , υπό την υπόθεση ότι η γωνία pitch των πτερυγίων είναι σταθερή:

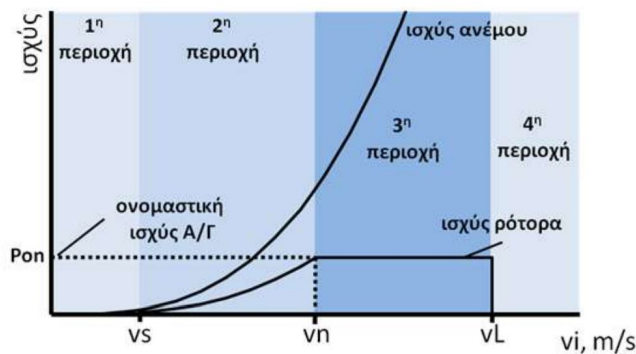
$$\begin{aligned} C_p(\lambda) = C_{p,max} &\Rightarrow \frac{d}{d\lambda} C_p(\lambda) = 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_{max} \\ \Rightarrow \frac{\omega_{opt} R}{U} = \lambda_{max} &\Rightarrow \omega_{opt} = \frac{\lambda_{max} U}{R} \Rightarrow \omega_{opt} \sim U \quad (\text{εξ.4.11}) \end{aligned}$$



Εικόνα 4.6: Αριστερά: Η εξάρτηση του αεροδυναμικού συντελεστή C_p των πτερυγίων από τον λόγο ταχύτητας του ακροπτερυγίου λ .

Δεξιά: Η εξάρτηση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων ω από την ταχύτητα του ανέμου U .

Στο διάγραμμα παραγόμενης ισχύος - ταχύτητας ανέμου της ανεμογεννήτριας, διακρίνονται τέσσερις περιοχές λειτουργίας. Για πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η ανεμογεννήτρια δεν παράγει καθόλου ισχύ. Μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια τιμή, την λεγόμενη ταχύτητα εκκίνησης, το σύστημα αρχίζει και παράγει ισχύ. Για τιμές λίγο μεγαλύτερες της ταχύτητας εκκίνησης, η ανεμογεννήτρια δεν παράγει ισχύ που ανταποκρίνεται στις ονομαστικές της τιμές. Παρόλα αυτά, όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του αέρα, τόσο πλησιάζει στις ονομαστικές τιμές της ισχύος. Όταν, ξεπεράσει την λεγόμενη ονομαστική ταχύτητα, τότε το σύστημα πλέον αποδίδει ισχύ ίση με την ονομαστική της τιμή και διατηρείται σταθερή ακόμα και όταν η ταχύτητα την ξεπεράσει. Αυτό βέβαια, ισχύει μέχρι ένα σημείο, καθώς για πολύ μεγάλες ταχύτητες του ανέμου, με τιμή μεγαλύτερες από την λεγόμενη ταχύτητα αποσύνδεσης, η παραγόμενη ισχύς μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει, προκειμένου το σύστημα να προστατευθεί από τις έντονες μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται από τις τεράστιες αυτές ταχύτητες.



Εικόνα 4.7: Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος

Η μέση αεροδυναμική ισχύς που προσπίπτει στα πτερύγια μιας αιολικής μηχανής, μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως το ολοκλήρωμα της προσπίπτουσας αεροδυναμικής ισχύος επί την πιθανότητα εμφάνισης μιας συγκεκριμένης ταχύτητας του ανέμου:

$$\begin{aligned}\overline{P_a} &= \int_0^\infty P_a(U) f(U) dU = \int_0^\infty \frac{1}{2} \rho A U^3 f(U) dU \\ \Rightarrow \overline{P_a} &= \frac{1}{2} \rho A \int_0^\infty U^3 f(U) dU \\ \Rightarrow \overline{P_a} &= \frac{1}{2} \rho A \overline{U^3} \quad (\text{εξ.4.12})\end{aligned}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση 4.7 για την μέση κυβική ταχύτητα του ανέμου μιας κατανομής Rayleigh, η εξίσωση 4.12 μπορεί να γραφθεί και ως εξής:

$$\begin{aligned}\overline{P_a} &= \frac{1}{2} \rho A \overline{U^3} = \frac{1}{2} \rho A \frac{3c^3 \sqrt{\pi}}{4} \\ \Rightarrow \overline{P_a} &= \frac{3}{8} \sqrt{\pi} \rho A c^3 \quad (\text{εξ.4.13})\end{aligned}$$

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια που παίρνουμε από μια ανεμογεννήτρια της οποίας η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί μια πιθανότητα κατανομής $f(U)$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E = 8760 \overline{P_e} = \int_0^\infty P_e(U) f(U) dU \quad (\text{εξ.4.14})$$

Η παραπάνω εξίσωση (εξ.4.14) της ενέργειας μπορεί να αναπαρασταθεί συναρτήσει του συντελεστή χρησιμοποίησης, ο οποίος είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που λαμβάνει τιμές στο διάστημα 0 έως 1, ως εξής:

$$E = 8760 P_n U F \quad (\text{εξ.4.15})$$

Όπου P_n είναι η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας και UF είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης. Εάν πάλι γίνει η υπόθεση ότι η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί κατανομή πιθανότητας Rayleigh με μια μέση ταχύτητα ανέμου $\overline{U}(m/s)$, τότε μπορεί προσεγγιστικά να υπολογιστεί ο συντελεστής χρησιμοποίησης με την ακόλουθη εξίσωση:

$$UF = 0.087 \overline{U} - \frac{P_n}{D^2} \quad (\text{εξ.4.16})$$

Με το D να περιγράφει την διάμετρο του δρομέα σε μέτρα, και το P_n την ονομαστική ισχύ σε kW .

Ένα άλλο μέγεθος το οποίο έχει ενδιαφέρον προκειμένου να προσημειωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η ταχύτητα του ανέμου, άρα και κατά συνέπεια η παραγόμενη ισχύ μέσω των σχέσεων που μόλις περιγράφηκαν, είναι η τραχύτητα.

Επί της ουσίας, η τραχύτητα α είναι ένας αδιάστατος δείκτης ο οποίος δίνει πληροφορίες σχετικά με την περιοχή όπου είναι τοποθετημένη η ανεμογεννήτρια, με τις ελάχιστες τιμές της (δηλαδή για $\alpha=0$) να τις παίρνει σε εξομαλυμένο έδαφος (όπως λόγου χάρη στον πάγο ή στην θάλασσα) ενώ αντίθετα, τις μεγαλύτερες τιμές τις να τις παίρνει σε πολύ τραχύ έδαφος (όπως για παράδειγμα σε αστικές περιοχές που έχουν ψηλά κτήρια).

Η εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με ύψος από το έδαφος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{V_z}{V_{Z_1}} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^a \quad (\text{εξ.4.17})$$

Όπου,

- V_z : Η ταχύτητα στο συγκεκριμένο ύψος z .
- V_{Z_1} : Η ταχύτητα στο ύψος αναφοράς z_1 .
- α : Η τραχύτητα του εδάφους.

Η βιβλιογραφία αναφέρει συνήθως τιμές για την τραχύτητα. Ένας απλός τύπος υπολογισμού της δίνεται από την παρακάτω εξίσωση των Justus και Mikhail:

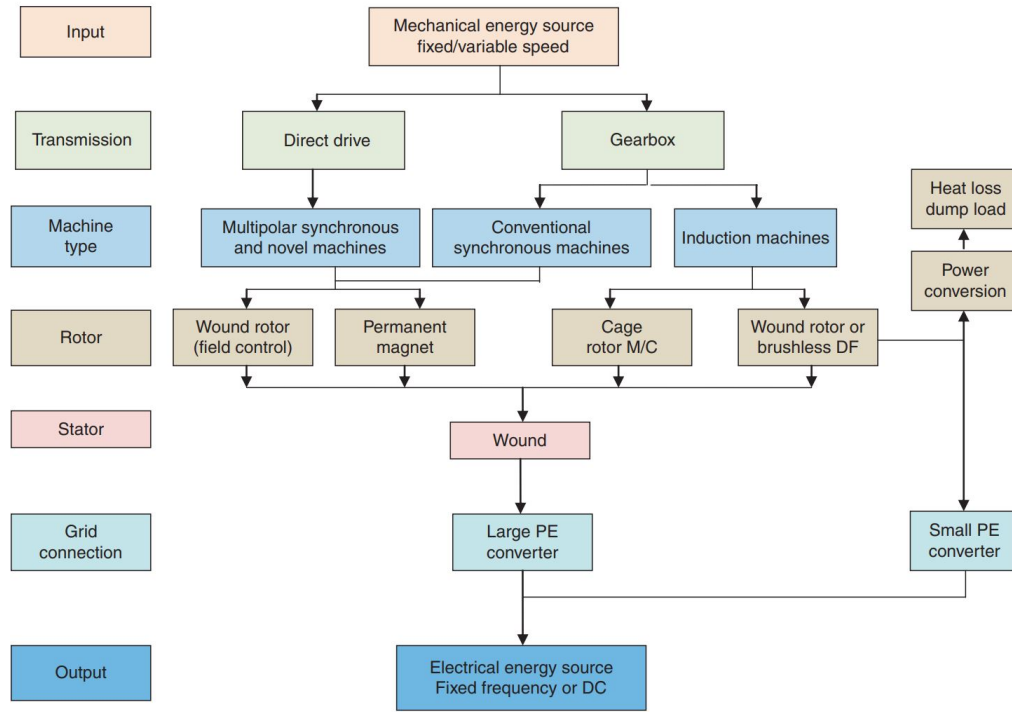
$$a = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V_{Z_1})}{1 - 0.088 \ln(z_1/10)} \quad (\text{εξ.4.18})$$

4.3 Η γεννήτρια παραγωγής ρεύματος της Ανεμογεννήτριας

4.3.1 Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

Στην παραγωγή της ενέργειας η γεννήτρια παίζει τον κυρίαρχο ρόλο, καθώς αυτή είναι ο μηχανισμός ο οποίος μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αέρα μέσω του μηχανικού συστήματος στην επιθυμητή ηλεκτρική ενέργεια. Έχοντας σαν δεδομένο όμως ότι θα κληθεί να αντιμετωπίσει μεγάλες διακυμάνσεις στην ροπή του μηχανικού άξονα που έχουν να κάνουν με την ταχύτητα του αέρα, εμφανίζει σημαντικές διαφορές από τις συνηθισμένες γεννήτριες στο κυρίως δίκτυο.

Ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί αλλά και τον τύπο του δρομέα, μπορούν να διαχωριστούν οι ανεμογεννήτριες στις παρακάτω κατηγορίες (εικόνα 4.8):



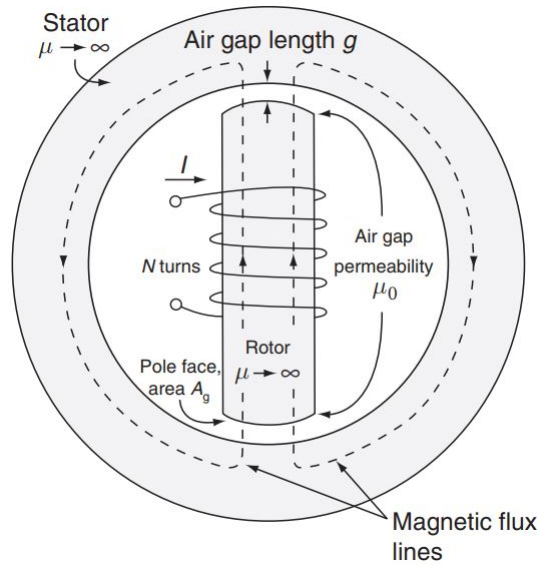
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα που απεικονίζει τα διαφορετικά είδη των χρησιμοποιούμενων ανεμογεννητριών.

Αν και φαινομενικά οι κατηγορίες αυτές δεν έχουν πολλές ομοιότητες, στην πραγματικότητα όλες βασίζονται στην ίδια λειτουργική αρχή την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή που ανακαλύφθηκε το 1831 από τον Michael Faraday. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, όταν ένας κινούμενος ηλεκτρικός αγωγός βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε ηλεκτρικό ρεύμα θα παραχθεί δια της επαγωγής στον αγωγό αυτό. Κατά αυτόν τον τρόπο, η μηχανική ενέργεια της κίνησης του αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό. Για μια θηλιά καλωδίων (όπως για παράδειγμα ένα πηνίο) η μαγνητική ροή Φ_B ορίζεται για οποιαδήποτε επιφάνεια Σ που το όριό της είναι η θηλιά αυτή. Με δεδομένο ότι η θηλιά θα κινείται, την επιφάνεια Σ την εκφράζουμε μαθηματικά με $\Sigma(t)$. Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει την μαγνητική ροή δίνεται ως εξής:

$$\Phi_B = \iint_{\Sigma(t)} B(t) dA \quad (\text{εξ.4.19})$$

Όπου,

- dA : Είναι ένα στοιχείο της κινούμενης επιφάνειας $\Sigma(t)$.
- B : Είναι το μαγνητικό πεδίο .



Εικόνα 4.9: Η μαγνητική ροή σε μια μηχανή.

Με άλλα λόγια, απλοϊκά θα λέγαμε ότι η μαγνητική ροή μέσω μιας θηλιάς καλωδίου είναι ανάλογο του αριθμού των μαγνητικών γραμμών που διαπερνούν αυτή τη θηλιά. Όταν η μαγνητική ροή B αλλάζει (είτε λόγω της κίνησης της θηλιάς καλωδίου είτε λόγω αλλαγής στην έντασή του), ο νόμος του Faraday υποδηλώνει την ύπαρξη μιας τάσης (την λεγόμενη EMF- electromotive force) η οποία προκύπτει ως η ενέργεια που είναι διαθέσιμη μέσω μιας μονάδας που είναι φορτισμένης και έχει ταξιδέψει μέσα στην θηλιά των καλωδίων. Εναλλακτικά, αυτή η τάση θα ήταν το αντίστοιχο, με το να διχοτομηθεί σε κάποιο σημείο το καλώδιο ώστε να δημιουργηθεί ανοιχτοκύκλωμα και να μετρηθεί εκεί η τάση του. Η EMF περιγράφεται από την ακόλουθη μαθηματική εξίσωση:

$$\mathcal{E} = N \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dn(t)}{dt} \quad (\text{εξ.4.20})$$

Και ουσιαστικά αποτελεί το διαφορικό της μαγνητικής ροής πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των σπειρών N που έχει η θηλιά του καλώδιου (δηλαδή ο αριθμός των σπειρών ενός πηνίου).

Η εξίσωση 4.20 χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογιστεί η επαγόμενη τάση σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια προκύπτει όταν αλλάζει η διασυνδετική ροή flux-linkage n .

Η παραγωγή της ζητούμενης τάσης μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους στις γεννήτριες:

- Μέσω κίνησης των πηνίων στο σταθερό μαγνητικό πεδίο.
- Μέσω περιστροφής του μαγνητικού πεδίου προς τα σταθερά πηνία.

4.3.2 Κατηγορίες γεννητριών

Ως βασικές κατηγορίες γεννητριών ορίζουμε τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες γεννήτριες (όπως φαίνονται και στην εικόνα 4.8). Στην πραγματικότητα, θα μπορούσε να γίνει η υπόθεση και μια τρίτη κατηγορία, αυτή του συνεχούς ρεύματος. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση το παραγόμενο ρεύμα το οποίο μπορεί να είναι είτε εναλλασσόμενο (AC) είτε συνεχές (DC). Η τάση όμως όπως και να έχει είναι εναλλασσόμενο μέγεθος και μέσω ενός μετατροπέα μπορεί να γίνει συνεχής. Για αυτόν τον λόγο, η ανάλυσή θα επικεντρωθεί στις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και τάσης.

Ο διαχωρισμός σύγχρονων και ασύγχρονων εναλλασσόμενων γεννητριών έγκειται στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Σύγχρονες Γεννήτριες :

Στις σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές, το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ως προς το πηνίο. Ο δρομέας, ο οποίος περιστρέφεται, παράγει ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στον δρομέα, τέμνει τα πηνία του στάτη και παράγει εναλλασσόμενη ΗΕΔ σε κάθε τύλιγμα, όπως περιγράφηκε και από το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Το ένα άκρο των πηνίων είναι σε συνδεσμολογία αστέρα, οπότε το ρεύμα έχει φορά προς το άλλο άκρο.

Ο δρομέας τίθεται σε περιστροφή από εξωτερικό κινητήριο σύστημα (Prime Mover) και διαρρέεται από συνεχές ρεύμα το οποίο είτε τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή, είτε από μια μικρή γεννήτρια συνδεδεμένη στον άξονά του (αυτοδιεγειρόμενος δρομέας).

Η παραγόμενη συχνότητα της γεννήτριας αποτελεί συνάρτηση του πλήθους των πόλων του δρομέα καθώς και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, και δίνεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \text{ (εξ.4.21)}$$

Με P τον πλήθος των πόλων του δρομέα και N την γωνιακή του ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό (Revolutions Per Minute- RPM).

Επειδή η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από τον αριθμό των πόλων, για δεδομένη συχνότητα, μπορεί να αυξηθεί ο αριθμός των πόλων μιας γεννήτριας προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια συχνότητα με μικρότερη ταχύτητα περιστροφής. Οδηγούμαστε έτσι σε δύο κατηγορίες δρομέων:

- Δρομέας έκτυπων πόλων.
- Δρομέας με κατανεμημένα τυλίγματα.

Ο δρομέας έκτυπων πόλων της σύγχρονης μηχανής έχει εξέχοντες πόλους, γύρω από τους οποίους τυλίγεται το τύλιγμα διέγερσης. Είναι κατασκευασμένος από

ελάσματα προκειμένου να αποφευχθούν δινορεύματα. Συνήθως αποτελείται από πολλά ζεύγη πόλων και είναι κατάλληλοι όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι αρκετά μικρή.

Από την άλλη, ο δρομέας με κατανεμημένα τυλίγματα είναι συμπαγής, φέρει αυλακώσεις όπου και τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης και για την προστασία ενάντια στις φυγόκεντρες δυνάμεις χρησιμοποιούνται σφήνες. Συνήθως αποτελείται από 4 έως 6 πόλους για λόγους οικονομίας και όγκου.

Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών :

Μια ειδική κατηγορία είναι οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών (PMSG). Ο μαγνητισμός του μαγνητικού πεδίου του δρομέα μπορεί να επιτευχθεί είτε με ηλεκτρομαγνήτη, είτε με ένα μόνιμο μαγνήτη. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούν προφανώς την δεύτερη τεχνική. Η μαγνητική τους ροή παραμένει σταθερή, και ο μηχανισμός που χρειάζεται προκειμένου να τροφοδοτηθεί το μαγνητικό πεδίο καθώς και οι ψύκτρες δεν απαιτούνται. Σαν τεχνολογίες διακρίνονται για την λειτουργία σε υψηλό συντελεστή ισχύος και έχουν γενικά πολύ καλή απόδοση. Κατά τα άλλα, δεν διαφέρουν ιδιαίτερα από τις υπόλοιπες σύγχρονες γεννήτριες.

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια, η ΗΕΔ που παράγεται δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

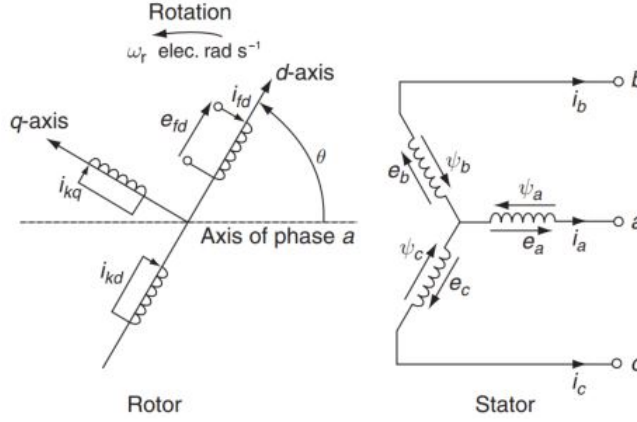
$$\varepsilon = 4.44 * f * \phi * t \text{ (εξ.4.22)}$$

Όπου,

- f : Η συχνότητα .
- ϕ : Η μαγνητική ροή.
- t : Ο αριθμός των στροφών.

Προκειμένου να προσομοιωθεί ένα δυναμικό μοντέλο για μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, θα θεωρηθεί μια τριφασική συμμετρική γεννήτρια, της οποίας ο στάτορας έχει ημιτονοειδής μαγνητική ροή. Με αυτή την υπόθεση, επί της ουσίας (και σύμφωνα με την εξίσωση 4.19 που το αποδεικνύει), υπονοείται ότι η παραγόμενη ΗΕΔ θα είναι επίσης ένα ημιτονοειδές σήμα.

Επειδή το μαγνητικό πεδίο είναι σύγχρονο με την περιστροφική κίνηση του δρομέα (από την αρχή λειτουργίας των σύγχρονων μηχανών), δηλαδή $\omega_e = \omega$, το συνολικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί μέσω του μετασχηματισμού Park σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο, με γωνιακή ταχύτητα ίδια με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, άρα και του μαγνητικού πεδίου. Μέσω αυτού του μετασχηματισμού, στο πλαίσιο d αναπαριστούμε την μαγνητική ροή ϕ . Επομένως, τα ισοδύναμα κυκλώματα που προκύπτουν από αυτή την ανάλυση είναι ως ακολούθως:



Εικόνα 4.10: Τα ισοδύναμα κυκλώματα του δρομέα (ανοιγμένο στο dq0 πλαίσιο) και του στάτορα.

Ο direct axis (d - axis) του μετασχηματισμού Park είναι κεντραρισμένος μαγνητικά στον βόρειο πόλο του μαγνήτη, ενώ από την άλλη, ο quadrature axis (q - axis) προηγείται του direct axis κατά 90 μοίρες.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τον τρόπο λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών ανοιγμένες στο dq0 πλαίσιο αναφοράς είναι οι ακόλουθες:

$$\dot{\psi}_{ds}(t) = -v_d(t) - R_s i_{ds}(t) - \omega_e(t) \psi_{qs}(t)$$

$$\dot{\psi}_{qs}(t) = -v_q(t) - R_s i_{qs}(t) - \omega_e(t) \psi_{ds}(t) \quad (\text{εξ.4.23})$$

καθώς και

$$\psi_{ds}(t) = L_{ds} i_{ds}(t) + \psi_m$$

$$\psi_{qs}(t) = L_{qs} i_{qs}(t) \quad (\text{εξ.4.24})$$

Όπου,

- $V_G = [v_d \quad v_q]^T$: Είναι το διάνυσμα της τερματικής τάσης της γεννήτριας.
- $\psi_G = [\psi_{ds} \quad \psi_{qs}]^T$: Το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη.
- $i_G = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$: Το διάνυσμα του ρεύματος της γεννήτριας.
- ψ_m : Το μέγεθος που προσομοιώνει την μόνιμη μαγνητική ροή που οφείλεται στον μόνιμο μαγνήτη.

Επιπλέον, μπορεί να οριστεί η ηλεκτρική ροπή μιας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών από την ακόλουθη σχέση:

$$T_e(t) = p(\psi_{ds}(t)i_{qs}(t) - \psi_{qs}(t)i_{ds}(t)) \Rightarrow$$

$$T_e(t) = p(\psi_m(t)i_{qs}(t) + (L_{ds} - L_{qs})i_{qs}(t)i_{ds}(t))$$

(εξ.4.25)

Όπου p ο αριθμός των πόλων του δρομέα.

Μπορεί να οριστεί κατά αντιστοιχία η ενεργός $P_s(t)$ και η άεργος ισχύς $Q_s(t)$ που λαμβάνει ο στάτορας ως ακολούθως:

$$P_s(t) = v_d(t)i_{ds}(t) + v_q(t)i_{qs}(t)$$

$$Q_s(t) = v_d(t)i_{qs}(t) - v_q(t)i_{ds}(t) \quad (\text{εξ.4.26})$$

Με τα $v_d(t), v_q(t), i_{qs}(t), i_{ds}(t)$ να έχουν περιγραφεί προηγουμένως.

Ασύγχρονες Γεννήτριες :

Ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες είναι γεννήτριες που έχουν εναλλασσόμενο ρεύμα τόσο στον στάτη, όσο και στον δρομέα. Ο στάτης είναι συνδεδεμένος με τριφασικό σύστημα παροχής ενέργειας. Η μεγαλύτερη διαφορά τους παρατηρείται στο κομμάτι του δρομέα. Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των σύγχρονων και των ασύγχρονων γεννητριών, είναι ότι στις ασύγχρονες γεννήτριες τα ρεύματα επάγονται στον δρομέα μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής από τον στάτη.

Όταν ο στάτης τροφοδοτείται με ρεύμα με συχνότητα f_s , τα πηνία του παράγουν ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο περιστρέφεται με μια σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_s = 120 \frac{f_s}{p} \quad (rpm) \quad (\text{εξ.4.27})$$

Όπου p είναι ο αριθμός των πόλων του δρομέα.

Σε μία επαγωγική μηχανή υπάρχει σχετική διαφορά στις ταχύτητες περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (δηλαδή του στάτη) και του δρομέα, οπότε παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα εξ επαγωγής στα τυλίγματα του δρομέα. Το ρεύμα που δημιουργείται στον δρομέα, είναι αποτέλεσμα του νόμου του Φάραντεϊ και οφείλεται στην παραγόμενη ΗΕΔ. Από την στιγμή που υπάρχει ρεύμα μέσα σε έναν αγωγό που βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, σύμφωνα με τον νόμο του Lorentz δημιουργείται μια δύναμη η οποία περιστρέφει τον αγωγό. Αυτή η δύναμη περιστρέφει τον αγωγό, που στην περίπτωση αυτή αντιπροσωπεύει τα τυλίγματα του δρομέα.

Ο δρομέας περιστρέφεται με μια ταχύτητα περιστροφής διαφορετική από αυτή του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Εάν γίνει γ υπόθεση ότι και οι δύο ταχύτητες ήταν ίδιες, τότε ο δρομέας θα μείωνε την ταχύτητα περιστροφής του, καθώς οι μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν θα διαπερνούσαν τα τυλίγματα, άρα δεν θα τάση ΗΕΔ και συνεπώς και δύναμης περιστροφής Lorentz. Αφού μειώνεται όμως ταχύτητα, πλέον η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα ήταν διαφορετική από

αυτήν του μαγνητικού πεδίου, οπότε πάλι το σύστημα του δρομέα θα ξεκινούσε να περιστρέφεται.

Η διαφορά ανάμεσα στην ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και του δρομέα ονομάζεται ολίσθηση s (ή Slip). Η ολίσθηση σε μια επαγωγική μηχανή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (\text{εξ.4.28})$$

Όπου n_r είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (rotor) και n_s είναι η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (stator).

Για να έχουμε λειτουργία γεννήτριας σε μια ασύγχρονη μηχανή, θα πρέπει η ταχύτητα του δρομέα n_r να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου n_s . Η ολίσθηση κατά αυτόν τον τρόπο είναι αρνητικό μέγεθος και η παραγόμενη ροπή είναι αντίθετη από την φορά της περιστροφής.

4.4 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννήτριας με βάση την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων

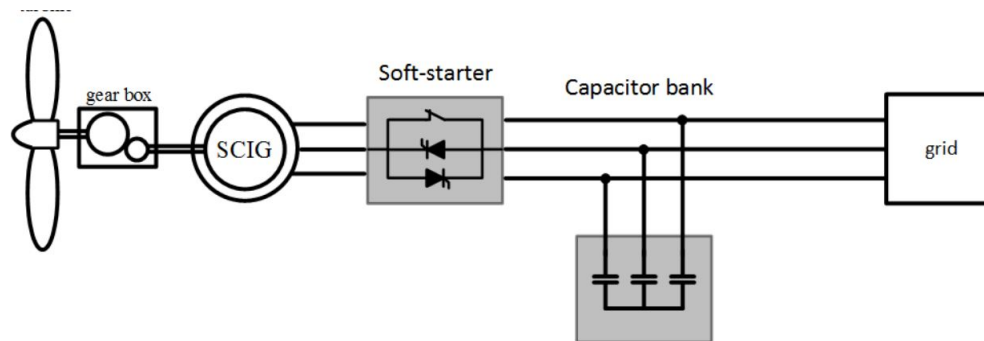
Με βάση την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων διακρίνονται δύο κατηγορίες ανεμογεννητριών, τις σταθερών στροφών και τις μεταβλητών στροφών.

4.4.1 Ανεμογεννήτρια Σταθερών Στροφών

Οι γεννήτριες σταθερών στροφών αποτελούν παλαιότερη τεχνολογία με την ταχύτητα περιστροφής να είναι ανεξάρτητη του ανέμου. Η ταχύτητα του ανεμοκινήτηρα καθορίζεται από την συχνότητα στο δίκτυο, τον λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων της και τον αριθμό των πόλων που υπήρχε σαν κατασκευαστικό δεδομένο. Πέραν αυτών όμως, είχε τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υπάρχει απευθείας διασύνδεση με το δίκτυο (προκειμένου να διατηρείται η ταχύτητα περιστροφής σταθερή).
- Οι μηχανικές καταπονήσεις που υφίσταται το σύστημα είναι τεράστιες.
- Η τάση και το ρεύμα ήταν σχετικά κακής ποιότητας και μειωμένης παραγωγής.
- Υπήρχε δυσκολία στον γενικό δραστικό έλεγχο του συστήματος.
- Αδυναμία παροχής επικουρικών υπηρεσιών προς το δίκτυο.
- Σχετικά απλή στην υλοποίηση, με συνέπεια με μειωμένο της κόστος.

Συνήθως, για αυτού του τύπου τις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιείται μια ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού μαζί με συνδυασμό κάποιου ομαλού εκκινητή (soft starter), ενώ υπήρχε και μια συστοιχία πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.



Εικόνα 4.11: Μοντέλο ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών.

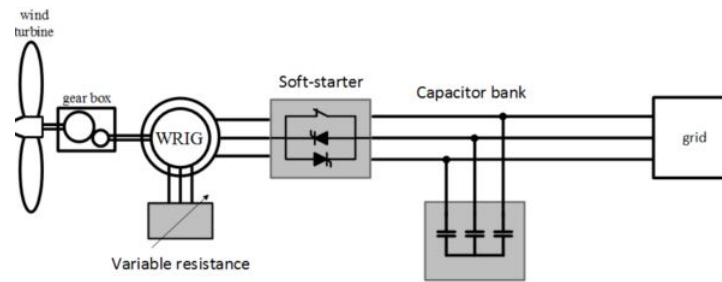
4.4.2 Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών

Όπως είναι αναμενόμενο, η προηγούμενη κατασκευαστική λογική δεν είναι αποδοτική και άρα κρίνεται ως μη βιώσιμη. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών από την άλλη, προσαρμόζουν την ταχύτητα περιστροφής του μηχανικού άξονα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Κατά αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουν καλύτερη αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου και άρα μεγαλύτερη απόδοση. Μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τον εύρος ρύθμισης των στροφών τους σε περιορισμένου εύρους στροφών και σε πλήρους εύρους στροφών. Η εκάστοτε ρύθμιση των στροφών επιτυγχάνεται με διάφορες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που επιπλέον μπορούν να καθορίζουν και τον ρυθμό απορρόφησης άεργου ισχύος από το δίκτυο. Πέραν αυτών όμως στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους συγκαταλέγονται και τα ακόλουθα:

- Επειδή για την ισχύ που παράγεται απαιτείται μικρότερος μετατροπέας ισχύος, το κόστος αυτού του μετατροπέα είναι σαφώς μικρότερο.
- Ο στάτης είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο που σημαίνει ότι οποιαδήποτε διαταραχή του κεντρικού δικτύου τον επηρεάζει..
- Υπάρχει η δυνατότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών όπως στήριξης της τάσης και διαχείρισης της άεργου ισχύος.
- Διακρίνονται για την αδιάλειπτη λειτουργία τους κατά την διάρκεια σφαλμάτων, αυξάνοντας έτσι της αξιοπιστία τους .

Περιορισμένου εύρους μεταβλητών στροφών :

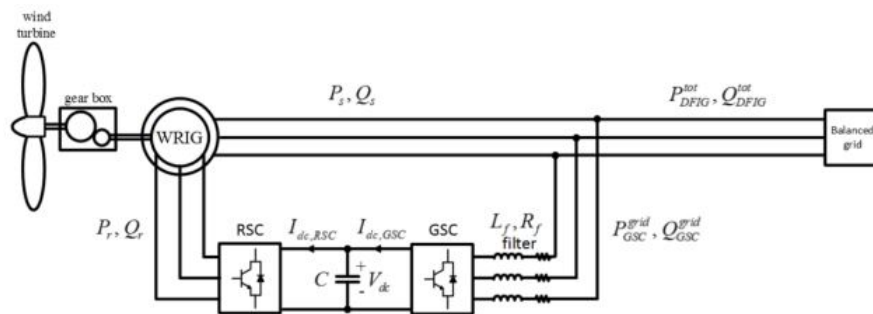
Η τεχνολογία αυτή γνωστή και ως OptiSlip κάνει χρήση μιας ασύγχρονης μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα της οποίας ο στάτης είναι διασυνδεδεμένος με το δίκτυο. Η ολίσθηση της μηχανής ελέγχεται μέσω του ελέγχου της συνολικής αντίστασης του δρομέα, και επιτυγχάνεται με εξωτερικό κύκλωμα συνδεδεμένο στα τυλίγματα του δρομέα. Η μεταβλητή αντίσταση του δρομέα καθορίζει το εύρος ρύθμισης των στροφών του ανεμοκινητήρα και συνήθως παίρνει τιμές ανάμεσα σε ένα διάστημα από 0 μέχρι 10% πάνω από την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 4.12: Ανεμογεννήτρια τεχνολογίας OptiSlip.

Σε αυτήν την κατηγορία ανεμογεννητριών γίνεται επιπλέον χρήση μιας συστοιχίας πυκνωτών για τον έλεγχο της άεργου ισχύος καθώς και ενός soft starter για την ομαλότερη διασύνδεση με το δίκτυο.

Μια τεχνολογία η οποία συναντάται πιο συχνά στις ανεμογεννήτριες και είναι ουσιαστικά η εξέλιξη της προηγούμενης λογικής, είναι η ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (ή συχνά συναντώμενη και ως DFIG). Και σε αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια της οποίας ο στάτης είναι συνδεδεμένος απευθείας στο δίκτυο, ενώ ο δρομέας σε αυτήν την περίπτωση συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας.



Εικόνα 4.13: Ανεμογεννήτρια τεχνολογίας διπλής τροφοδοσίας (DFIG).

Ο μετατροπέας της συχνότητας μπορεί με ευκολία να διαχειριστεί την αντιστάθμιση άεργου ισχύος ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνει ομαλή διασύνδεση με το δίκτυο. Επιπλέον, η ρύθμιση των στροφών του ανεμοκινητήρα επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας στον δρομέα.

Συγκριτικά με την τεχνολογία OptiSlip έχει ένα αρκετά μεγαλύτερο εύρος στροφών του δρομέα, με τις τυπικές του τιμές να κυμαίνονται στο διάστημα μεταξύ -30% και 30% της σύγχρονης ταχύτητας του μαγνητικού πεδίου.

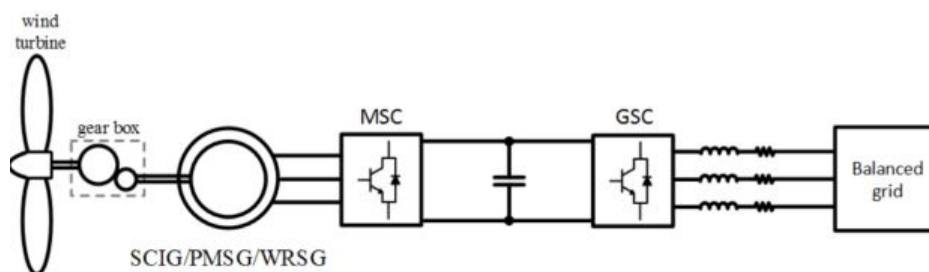
Επιπλέον ο μετατροπέας συχνότητας έχει ονομαστική ισχύ περίπου της τάξης του 30% της ονομαστικής ισχύς της ανεμογεννήτριας, κάτι που σαν τεχνολογία την κάνει αρκετά ανταγωνιστική και στο οικονομικό κομμάτι.

Το κύριο μειονέκτημά της είναι οι χρησιμοποιούμενοι δακτύλιοι ολίσθησης (slip rings) οι οποίοι απαιτούν αρκετά συχνά εργασίες συντήρησης. Πέραν αυτού όμως, έχουν και σχετικά μειωμένη ανοχή στα σφάλματα του δικτύου έναντι άλλων τεχνολογιών.

Πλήρους εύρους μεταβλητών στροφών :

Σε αυτήν την κατηγορία ανεμογεννητριών υπάρχει και πάλι η ύπαρξη βαθμίδας μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος όμως πλέον διαχειρίζεται όλο το σύνολο της παραγόμενης ισχύος. Ουσιαστικά, ο μετατροπέας είναι υπεύθυνος για την μαγνήτιση της γεννήτριας και την διαχείριση της άεργου ισχύος, ενώ ταυτόχρονα μέσω αυτών διαμορφώνει και την ομαλή συνδεσμολογία με το δίκτυο.

Σε αυτήν την λογική, συναντάμε διάφορες κατηγορίες γεννητριών είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μπορεί να είναι τεχνολογίας ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού ή σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών ή ακόμα και σύγχρονης γεννήτριας με ηλεκτρική διέγερση.



Εικόνα 4.14: Ανεμογεννήτρια τεχνολογίας πλήρους εύρους μεταβλητών στροφών.

Η πιο διαδεδομένη από αυτές τις τεχνολογίες είναι η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών στην οποία και συχνά δεν χρησιμοποιείται η χρήση κιβωτίου (direct drive) σε αντίθεση με την ασύγχρονη γεννήτρια η οποία το απαιτεί.

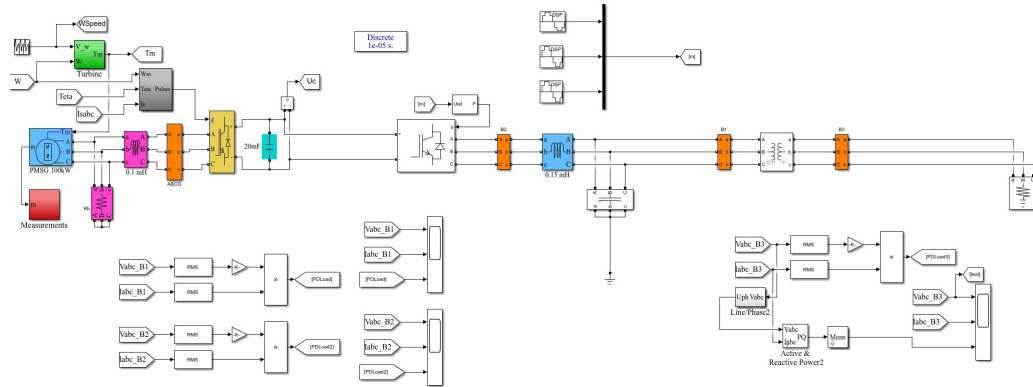
Η διαδικασία ολοκληρώνεται με διάφορα φίλτρα συνήθως μετά τα ηλεκτρονικά ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη ποιότητα ισχύος.

4.5 Προδιαγραφές του συστήματος της Ανεμογεννήτριας

Το σύστημα της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία είναι ονομαστικής ισχύος 100kW και περιέχει μια γεννήτρια τεχνολογίας PMSG (σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη) ονομαστικής ικανότητας 111 kVA. Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν διάφορα components της Simulink. Τα βασικότερα είναι:

- Το module Wind Turbine το οποίο προσομοιώνει τα μηχανικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας όπως είναι η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της, η ονομαστικής της ισχύ, η ονομαστική ισχύ της γεννήτριας που ακολουθεί και διάφορα άλλα.
- Το module Permanent Magnet Synchronous Machine στο οποίο ορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών όπως για παράδειγμα η αντίσταση του στάτορα, η επαγωγή των πηνίων, η αδράνεια του άξονα, οι πόλοι του δρομέα και πολλά άλλα.

Η συγκεκριμένη υλοποίηση βασίζεται σε ένα παραδείγματος από το βιβλίο Renewable Energy Systems του Viktor Perelmuter. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο και προσαρμόστηκε αναλόγως, ώστε το σύστημα να είναι συμβατό με τις ανάγκες του μικροδικτύου.



Εικόνα 4.15: Δομή του συστήματος ανεμογεννήτριας της εργασίας.

Το σύστημα επί της ουσίας προσομοιώνει το μηχανικό μέρος της τουρμπίνας μέσω του module Turbine, ενώ η αναπαράσταση της γεννήτριας γίνεται μέσω του module Permanent Magnet Synchronous Machine. Για την ομαλή λειτουργία και σύμφωνα με το βιβλίο Renewable Energy Systems του Viktor Perelmuter, αμέσως μετά την έξοδο της γεννήτριας έχουμε μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση, και στην συνέχεια μέσω inverter μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενη. Την διαδικασία ολοκληρώνει ένας μετασχηματιστής, ο οποίος μετασχηματίζει την τάση στην ζητούμενη τάση τροφοδοσίας του μικροδικτύου.

5 Γεννήτρια Παραγωγής Ρεύματος

5.1 Το Μαθηματικό Μοντέλο της Σύγχρονης Μηχανής

Η σύγχρονη μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος οδηγούμενη από κάποιο μηχανικό κινητό μέρος με σκοπό την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Από την άλλη, ως κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.

Τα δύο κύρια μέρη μιας μηχανής είναι ο στάτης και ο δρομέας. Ο στάτης (ή τύμπανο) έχει διαμήκη αύλακες όπου εκεί υπάρχουν τα πηνία του τυμπάνου. Ο δρομέας έχει και αυτός τύλιγμα το οποίο καλείται τύλιγμα διέγερσης και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Το συγκεκριμένο ρεύμα σε συνδυασμό με τα ρεύματα που παράγονται στα πηνία του τυμπάνου παράγει μια πολύ υψηλή ΜΕΔ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η προκύπτουσα ροή κατά μήκος του διάκενου μεταξύ του στάτη αλλά και του δρομέα δημιουργεί τάσεις στα πηνία των τυλιγμάτων του τυμπάνου και κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε την δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής ροπής ανάμεσα στον στάτη και τον δρομέα.

Το συνεχές ρεύμα που τροφοδοτείται στο τύλιγμα του δρομέα προέρχεται από έναν διεγέρτη. Ο συγκεκριμένος διεγέρτης μπορεί να είναι μια γεννήτρια τοποθετημένη στον άξονα της μηχανής ή ακόμα και μια ξεχωριστή πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος που συνδέεται με το τύλιγμα διέγερσης μέσω ψυκτρών. Σε αυτές τις περιπτώσεις μέσω ηλεκτρονικών ανορθωτών επιτυγχάνεται η δημιουργία του συνεχούς ρεύματος.

Στην περίπτωση της γεννήτριας, ο άξονας οδηγείται από μια κινητήρια δύναμη (prime mover). Όταν η γεννήτρια παράγει ισχύ η ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία η γεννήτριας αντιτίθεται στην ροπή της κινητήριας δύναμης. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ροπών είναι αποτέλεσμα των απωλειών του σιδηροπυρήνα και της τριβής. Σε έναν κινητήρα, η ηλεκτρομηχανική ροπή που αναπτύσσεται μετατρέπεται σε ροπή στον άξονα και κατ' επέκταση οδηγεί το μηχανικό μέρος.

Στην εικόνα 5.1 παρατηρείται μια στοιχειώδη τριφασική γεννήτρια. Ως f-coil συμβολίζουμε το τύλιγμα της διέγερσης. Ο άξονας των πόλων διέγερσης καλείται ευθύς άξονας ή d-axis ενώ ο κάθετος σε αυτόν άξονας ονομάζεται εγκάρσιος άξονας ή q-axis. Η θετική κατεύθυνση του d άξονα προηγείται της αντίστοιχης θετικής κατεύθυνσης του q άξονα κατά 90 μοίρες.

Επί της ουσίας υπάρχουν δύο βασικοί τύποι δρομέα. Ο κυλινδρικός, που ουσιαστικά είναι ένας δρομέας των δύο μόλις πόλων, και ο δρομέας έκτυπων πόλων, που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες με μικρότερη ταχύτητα περιστροφής.

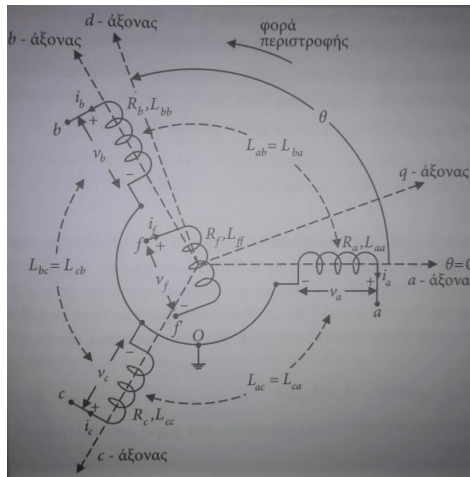
Ο στάτης και ο δρομέας σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγεται μια ημιτονοειδής τάση σε κάθε τύλιγμα του στάτη για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Επειδή η διαφορά φάσης μεταξύ αυτών των τυλιγμάτων είναι 120 μοίρες και με δεδομένο ότι και οι τρεις τάσεις έχουν το ίδιο μέτρο και την ίδια συχνότητα, μπορεί να δημιουργηθεί συνδέοντάς τα μια τριφασική πηγή.

Επειδή ο αριθμός των περιόδων της παραγόμενης τάσης ανά περιστροφή του δρομέα συνδέεται με τον αριθμό των ζευγών πόλων, η συχνότητα της παραγόμενης τάσης θα δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{P}{2} \frac{N}{60} = \frac{P}{2} f_m \text{ (εξ.5.1)}$$

Όπου,

- P : Ο αριθμός των πόλων.
- N : Η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό.
- $f_m = \frac{N}{60}$: Η μηχανική συχνότητα σε στροφές ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 5.1: Παράσταση σύγχρονης μηχανής με συγκεντρωμένα πηνία.

Επειδή ένας κύκλος τάσης (δηλαδή 360 μοίρες) παράγεται κάθε φορά που ένα ζεύγος πόλων περάσει από ένα τύλιγμα του στάτη, είναι αναγκαίο να υπάρξει διαχωρισμός μεταξύ της ηλεκτρικής γωνίας ,που εκφράζει τις παραγόμενες τάσεις και τα ρεύματα, και της μηχανικής γωνίας που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη θέση του δρομέα στο σύστημα. Σε μια διπολική μηχανή (δηλαδή για $P=2$) οι γωνίες αυτές είναι ίσες. Σε αντίθετη περίπτωση, συνδέονται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \text{ (εξ.5.2)}$$

Όπου,

- θ_e : Είναι η γωνία θ (όπως αυτή είναι σχεδιασμένη στην εικόνα 5.1) εκφραζόμενη σε ηλεκτρικές μοίρες.
- θ_m : Η αντίστοιχη μηχανική γωνία που όμως είναι εκφραζόμενη σε μηχανικές μοίρες.

Στην εικόνα 5.1 τα πηνία που αναπαρίστανται είναι τα αντίστοιχα ισοδύναμα συγκεντρωμένα τυλίγματα τόσο του δρομέα όσο και του στάτη, προκειμένου να είναι πιο εύκολα στην κατανόηση έναντι των κατανεμημένων τυλιγμάτων. Στην περίπτωση του στάτη το καθένα βρίσκεται πάνω στον δικό του άξονα (με διαφορά 120 μοίρες), ενώ έχουν τις κατάλληλες ίδιες και αμοιβαίες επαγωγές. Κατά αναλογία, το τυλίγμα του δρομέα περιγράφεται από το f-coil όπως και προαναφέρθηκε.

Για κάθε ένα από αυτά τα τέσσερα τυλίγματα της μηχανής μπορεί να χαρακτηριστεί με μια αντίσταση, μια αυτεπαγωγή και με αμοιβαίες επαγωγές που προκύπτουν από τις ανά μεταξύ τους συσχετίσεις. Τα σύμβολα R_i, L_{ii} & L_{ij} εκφράζουν αυτές τις παραμέτρους.

Να σημειωθεί πάντως, ότι δεχόμαστε πως η μηχανή είναι μαγνητικά γραμμική, δηλαδή υπάρχει αναλογική σχέση μεταξύ ροών και ρευμάτων. Αυτό προκύπτει από την ύπαρξη των επαγωγών.

Ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Οι αντιστάσεις που έχουν θεωρηθεί στα τυλίγματα του στάτη είναι μεταξύ τους ίσες και έχουν πολύ μικρή τιμή. Σε γενικές γραμμές τις θεωρούμε :

$$R_a = R_b = R_c = R_s.$$

2. Όταν υπάρχει δρομέας με έκτυπους πόλους τότε όλες οι επαγωγές πέραν της επαγωγής του δρομέα L_{ff} εξαρτώνται από την γωνιακή θέση του δρομέα, και κατά συνέπεια αποτελούν συνάρτηση της μεταβαλλόμενης με τον χρόνο γωνίας θ .

3. Από την άλλη, σε περίπτωση που ο δρομέας δεν είναι έκτυπων πόλων τότε όλες οι επαγωγές είναι σταθερές, με εξαίρεση να αποτελούν οι αμοιβαίες επαγωγές που αναπτύσσονται μεταξύ των πηνίων του στάτη και του δρομέα (δηλαδή L_{af}, L_{bf}, L_{cf}).

4. Σύμφωνα με την εικόνα 5.1, η αυτεπαγωγή L_{aa} του τυλίγματος α μεταβάλλεται περιοδικά με την γωνία θ . Αυτό μπορεί να εξαχθεί επειδή η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται όταν ο άξονας του δρομέα συμπίπτει με τον άξονα του συγκεκριμένου τυλίγματος, οπότε και θα ισχύει τότε πως $\theta=0$ και $\theta=\pi$. Εάν γίνει η θεώρηση ότι η μεταβολή της συγκεκριμένης επαγωγής είναι αρμονική, προκύπτει ότι:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos(2\theta) \quad (\text{εξ.5.3})$$

με $L_s > L_m \geq 0$.

Κατά αντιστοιχία προκύπτουν και για τα άλλα δύο τυλίγματα:

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos(2(\theta - \frac{2\pi}{3})) \quad (\text{εξ.5.4})$$

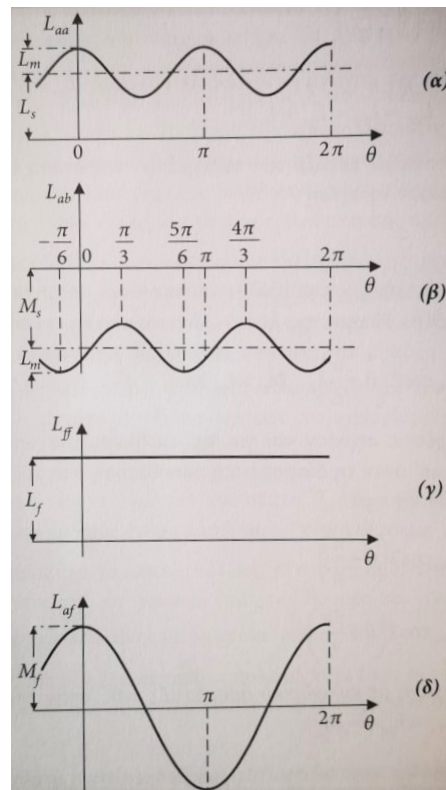
και

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos(2(\theta + \frac{2\pi}{3})) \quad (\text{εξ.5.5})$$

Για μηχανή με κυλινδρικό δρομέα θα ισχύει ότι $L_m = 0$, οπότε σε αυτήν την περίπτωση θα ισχύει η παρακάτω ισότητα: $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s$.

5. Οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη είναι όλες αρνητικές και επιπλέον ισχύει η ισότητα: $L_{ij} = L_{ji}$.

6. Η αμοιβαία επαγωγή που προκύπτει από τις φάσεις a και b αποτελεί περιοδική συνάρτηση της γωνίας θ (όπως διακρίνεται και από την εικόνα 5.2 β που ακολουθεί).



Εικόνα 5.2: Μεταβολές των επαγωγικών παραμέτρων σε συνάρτηση με την γωνιακή θέση του δρομέα.

Επομένως θα ισχύει (και κατά αντιστοιχία για τις υπόλοιπες αμοιβαίες επαγωγές):

$$L_{ab} = -M_s - L_m * \cos\left(2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)\right) \quad (\text{εξ.5.6})$$

$$L_{bc} = -M_s - L_m * \cos\left(2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (\text{εξ.5.7})$$

$$L_{ac} = -M_s - L_m * \cos\left(2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right)\right) \quad (\text{εξ.5.8})$$

με $M_s > L_m \geq 0$.

Στην περίπτωση του κυλινδρικού δρομέα, όπως προαναφέρθηκε, ισχύει $L_m = 0$ και κατά συνέπεια θα ισχύει: $L_{ab} = L_{bc} = L_{ac} = -M_s$.

7. Η αυτεπαγωγή του δρομέα συμβολίζεται με το L_{ff} ή για χάρη συντομίας L_f και είναι σταθερή.

8. Όπως διακρίνεται και από την εικόνα 5.2 δ, οι αμοιβαίες επαγωγές που προκύπτουν από το εκάστοτε τυλίγμα και τον δρομέα μεταβάλλονται μεταξύ αρνητικών και θετικών μεγίστων. Εάν υποθέσουμε ότι η μεταβολή είναι αρμονική, τότε μπορούμε να τις εκφράσουμε ως εξής:

$$L_{af} = M_f \cos(\theta) \quad (\text{εξ.5.9})$$

$$L_{bf} = M_f \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{εξ.5.10})$$

$$L_{cf} = M_f \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) = M_f \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{εξ.5.11})$$

9. Σε όλες τις προηγούμενες εξισώσεις έχει γίνει η υπόθεση ότι η γωνία θ παριστάνει την ηλεκτρική γωνία θ_e και η σχέση της με την μηχανική γωνία έχει περιγραφεί από την εξίσωση 5.2.

Οι πεπλεγμένες ροές του κάθε τυλίγματος του στάτη αλλά και του δρομέα, οφείλονται στο ρεύμα του εκάστοτε τυλίγματος αλλά και στα ρεύματα των υπολοίπων τυλιγμάτων και έχουν άμεση σχέση με τις επαγωγές. Δεδομένου ότι η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, τα ρεύματα ορίζονται θετικά προς την κατεύθυνση των θετικών δυναμικών, δηλαδή με κατεύθυνση να εξέρχονται από το κέντρο προς τα έξω. Από την άλλη, το ρεύμα που διαρρέει τον δρομέα (δηλαδή το ρεύμα πεδίου) ορίζεται θετικό κατά την αντίθετη φορά. Συνεπώς, οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών για κάθε ένα από τα τυλίγματα περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \quad (\text{εξ.5.12})$$

$$\lambda_b = L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \quad (\text{εξ.5.13})$$

$$\lambda_c = L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \quad (\text{εξ.5.14})$$

$$\lambda_f = L_{fa}i_a + L_{fb}i_b + L_{fc}i_c + L_{ff}i_f \quad (\text{εξ.5.15})$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις οι τερματικές τάσεις του κάθε τυλίγματος της μηχανής θα προκύπτουν ως εξής, με τα πρόσημα να έχουν καθοριστεί από την παραπάνω θεώρηση για τις φορές των ρευμάτων:

$$v_a = -R_s i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (\text{εξ.5.16})$$

$$v_b = -R_s i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (\text{εξ.5.17})$$

$$v_c = -R_s i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (\text{εξ.5.18})$$

$$v_f = R_s i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (\text{εξ.5.19})$$

Επειδή η μορφή των εξισώσεων είναι τέτοια, για πιο εύκολη ανάλυση ορίζονται οι παρακάτω μήτρες:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s \\ -v_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_s \\ i_f \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_f \end{bmatrix} \quad (\text{εξ.5.20})$$

$$\mathbf{R} = \left[\begin{array}{ccc|c} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R_s & 0 \\ \hline 0 & R_f \end{array} \right] \quad (\text{εξ.5.21})$$

$$\mathbf{L}(\theta) = \left[\begin{array}{ccc|c} L_{aa} & L_{ab} & L_{ca} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ \hline L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} L_{ss} & L_{sf} \\ \hline L_{sf}^T & L_{ff} \end{array} \right] \quad (\text{εξ.5.22})$$

Οπότε υπό τους προηγούμενους πίνακες οι εξισώσεις 5.12-19 γράφονται ως εξής:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{L}(\theta) \mathbf{i} \quad (\text{εξ.5.23})$$

$$\mathbf{v} = -\mathbf{R}\mathbf{i} - \frac{d\boldsymbol{\lambda}}{dt} = -\mathbf{R}\mathbf{i} - \frac{d}{dt}(\mathbf{L}(\theta)\mathbf{i}) \quad (\text{εξ.5.24})$$

Και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{R}\mathbf{i} - \mathbf{L}(\theta) \frac{d\mathbf{i}}{dt} - \frac{d\mathbf{L}(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \mathbf{i} \quad (\text{εξ.5.25})$$

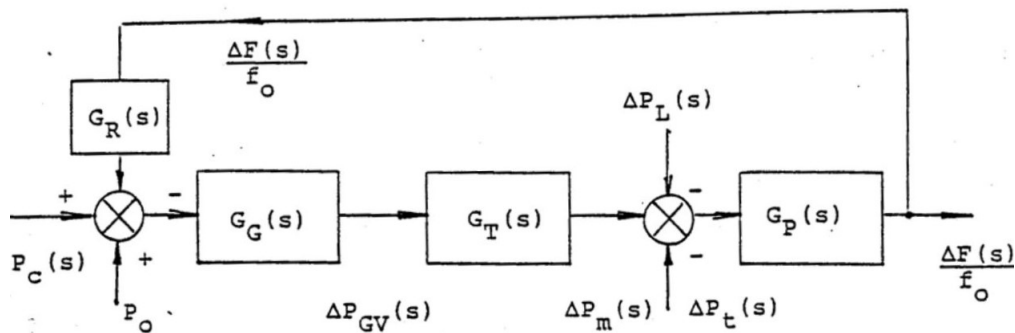
Από την τελευταία εξίσωση γίνεται κατανοητό, ότι εάν η περιστροφή του δρομέα είναι ομοιόμορφη (οπότε και θα ισχύει $\theta = \omega t + \theta_o$) και επομένως η γωνιακή ταχύτητα είναι σταθερή, οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν είναι γραμμικές με χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές, οπότε και έστω με κάποια δυσκολία μπορούν να επιλυθούν. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η ταχύτητα του δρομέα δεν είναι σταθερή, οι διαφορικές εξισώσεις δεν είναι γραμμικές, με συνέπεια να μην δέχονται επίλυση παρά μόνο με τη χρήση του υπολογιστή (δηλαδή με αριθμητική επίλυση).

Για την περαιτέρω απλούστευση των παραπάνω εξισώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο λεγόμενος Μετασχηματισμός Park, προκειμένου να καταστούν γραμμικές με σταθερούς συντελεστές. Σύμφωνα με αυτόν τον μετασχηματισμό, οι ποσότητες

a,b,c του στάτη μετασχηματίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνουν τις λεγόμενες συνιστώσες, μεταφέροντας τις ουσιαστικά πάνω στο στρεφόμενο με την ίδια γωνιακή ταχύτητα του δρομέα πλαίσιο αναφοράς $dq0$. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επαγωγή τάσης στον στάτη, άρα και ρεύμα, με γωνιακή ταχύτητα την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

5.2 Το Μοντέλο της Μηχανής Ντίζελ

Μια μηχανή Ντίζελ μπορεί πολύ χονδρικά να αναπαρασταθεί όπως παρακάτω (εικόνα 5.3):



Εικόνα 5.3: Απλοποιημένο σύστημα μηχανής ντίζελ.

Όπου,

- P_O : Η ισχύς αναφοράς ή η αρχική ισχύς.
- P_C : Η ισχύς στον ρυθμιστή στροφών.
- $\Delta P_C = P_C - P_O$: Η μεταβολή που προκύπτει στον ρυθμιστή στροφών.
- $G_R(s) = \frac{1/R}{1+sT_{SR}}$: Η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή των στροφών, με:
 - R : Η ρύθμιση ή η λεγόμενη «στατική».
 - T_{SR} : Η χρονική σταθερά του ρυθμιστή ταχύτητας. Πολλές φορές μπορούμε να την παραλείψουμε λόγω της μικρής της τιμής (τάξης 0.1 sec).
- $G_G(s) = \frac{1}{1+sT_{SM}}$: Η συνάρτηση μεταφοράς των βαθμίδων του ρυθμιστή ταχύτητας. Να σημειωθεί παρ' όλα αυτά ότι η συγκεκριμένη αναπαράσταση είναι σε απλοποιημένη μορφή, χωρίς να έχουμε λάβει υπ' όψιν τα όριο ισχύος.

- $G_T(s) = \frac{K_T(1+sK_rT_r)}{(1+sT_T)(1+sT_r)}$: Η συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει την βαθμίδα του στροβίλου με:
 - K_T : Αποτελεί μια σταθερά ενίσχυσης.
 - T_T : Μια χρονική σταθερά του στροβίλου με τιμές ανάμεσα στα 0.2 και 2 sec.
 - T_r : Μια χρονική σταθερά.
 - K_r : Μια σταθερά ενίσχυσης, εφόσον υπάρχει και κάποια δεύτερη βαθμίδα αναθέρμανσης. Σε διαφορετική περίπτωση, ορίζουμε το $T_r = 0$.
- $\Delta P_L(s) = P_L(s) - P_O$: Η μεταβολή που παρατηρείται στο φορτίο, με το $P_L(s)$ να αντιπροσωπεύει την ισχύ του φορτίου.
- $\Delta P_t(s)$: Οι ενδεχόμενες ανταλλαγές ισχύος με κάποιο άλλο σύστημα ή με κάποια άλλη μονάδα.
- $G_P(s)$: Η συνάρτηση μεταφοράς των βαθμίδων που εκφράζει την μεταβολή της κινητικής ενέργειας της μηχανής αλλά και της μεταβολής του προς τροφοδοσία φορτίου ζήτησης που σχετίζεται με την μεταβολή στην συχνότητα. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να περιγραφούν από τις παρακάτω εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου:

$$\frac{2H}{f_0} \frac{d(\Delta f)}{dt} + D(\Delta f) \quad (\text{εξ.5.26})$$

όπου,

- H : Η σταθερά της αδράνειας.
- D : Η σταθερά της απόσβεσης. Ισχύει ότι $D = \frac{\partial P_L}{\partial f}$.

Μεταφέροντας αυτές τις εξισώσεις από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, προκύπτουν :

$$\left(\frac{2H}{f_0}s + D\right)F(s) = \frac{1}{D}(1 + T_P s)F(s) \quad (\text{εξ.5.27})$$

Οπότε και καταλήγουμε στην συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_P(s) = \frac{1/D}{1+sT_P} \quad (\text{εξ.5.28})$$

Με $T_P = \frac{2H}{f_0 D}$ να είναι μια χρονική σταθερά. Να σημειωθεί ότι για καθαρά ωμικά φορτία το $D = 0$, που σημαίνει ότι υπάρχει μεταβολή μόνο στην κινητική ενέργεια και επομένως η συνάρτηση μεταφοράς $G_P(s)$ μετασχηματίζεται ως εξής:

$$G_P(s) = \frac{f_0}{2Hs} \text{ (εξ.5.29)}$$

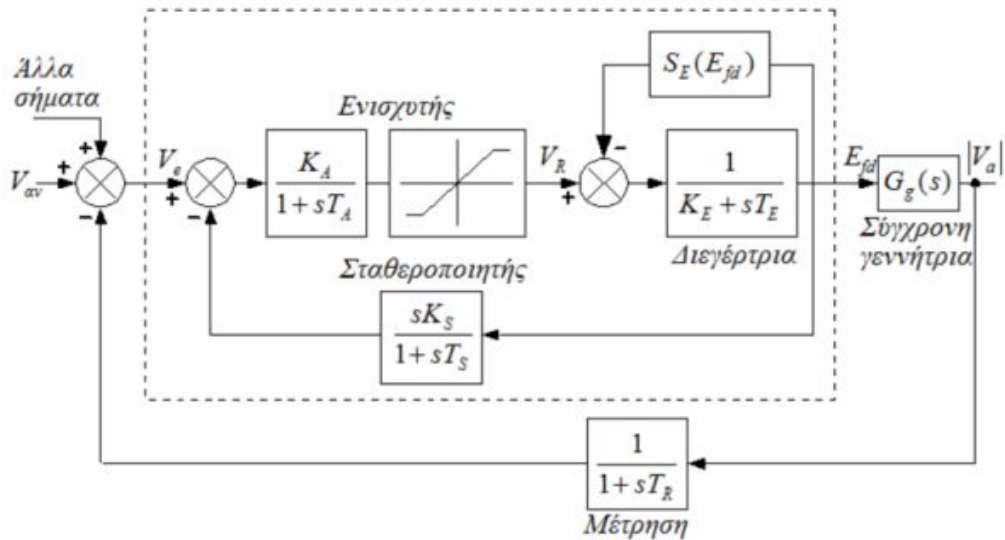
Το μοντέλο που περιγράφηκε είναι αρκετά εύχρηστο και έχει την ικανότητα να χρησιμοποιηθεί από διάφορους τύπους ρυθμιστών στροφών. Όπως είναι αναμενόμενο, μπορεί να απλοποιηθεί κατάλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις αλλά και τα διαθέσιμα κατασκευαστικά δεδομένα που έχουμε στην διάθεσή μας.

Ένα ακόμα πιο αναλυτικό μοντέλο της μηχανής θα μπορούσε να συμπεριλάβει επιπλέον βαθμίδες που θα περιγράφουν κατάλληλα τον ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου (μηχανικής) αλλά και της γωνιακής της ταχύτητας περιστροφής.

Γενικά, μετά από πειραματικές μεθόδους έχει αποδειχθεί ότι μια αρκετά καλή προσέγγιση για την περιγραφή μιας απλής μηχανής ντίζελ (σε ότι αφορά τον στρόβιλο) μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης, αμελώντας βέβαια οποιαδήποτε χρονική καθυστέρηση που θα μπορούσε να εισαχθεί από τον ρυθμιστή στροφών:

$$G_T(s) = \frac{1}{1+sT_T} \text{ (εξ.5.30)}$$

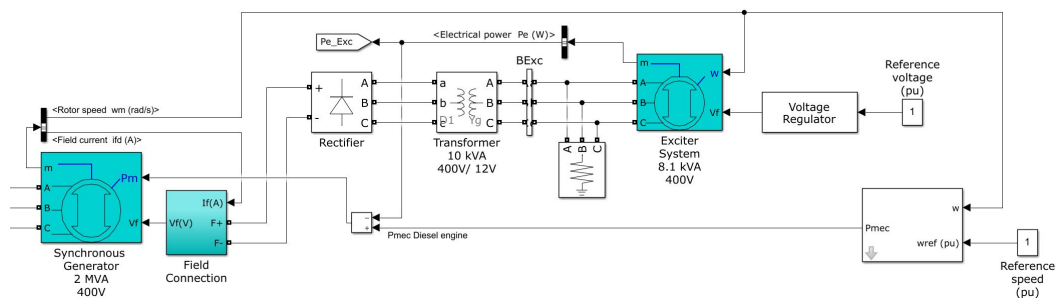
Ως συνέπεια αυτού, για την περιγραφή ενός συστήματος το οποίο θα συμπεριλάμβανε ακόμα και δεδομένα για τον ρυθμό της κατανάλωσης του καυσίμου, θα έπρεπε να διαχειριστούμε το μοντέλο πρώτης τάξης που περιγράφηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να συνδεθεί με την κατάλληλη εξίσωση της κατανάλωσης καυσίμου και της μηχανικής ισχύς της μηχανής.



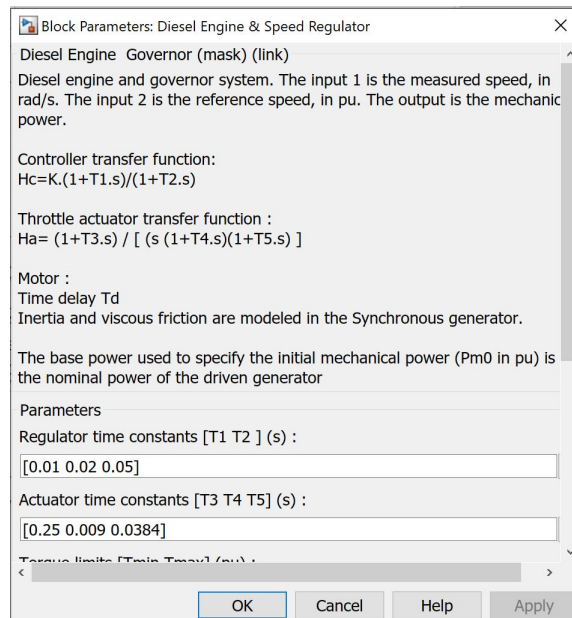
Εικόνα 5.4: Μαθηματικό μοντέλο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης.

Γίνεται κατανοητό, ότι το σύστημα του αυτόματου ρυθμιστή τάσης περιέχει έναν ενισχυτή προκειμένου τα διάφορα σήματα εισόδου να μπορέσουν να επεξεργαστούν κατάλληλα από την διεγέρτρια γεννήτρια. Μέσω ενός βρόγχου ανατροφοδότησης αλλά και διάφορων άλλων διατάξεων (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση ένας σταθεροποιητής), η τάση της πηγής V_f (όπως προκύπτει από το μονοφασικό ισodύναμο της γεννήτριας) ρυθμίζεται κατάλληλα και επομένως μπορούμε να ορίσουμε την επιθυμητή τάση εξόδου.

Στην συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκε ότι η μηχανή θα ήταν ονομαστικής ισχύος 50kW. Η υλοποίηση της έγινε με βάση ένα έτοιμο μοντέλο της Simulink στο οποίο συμπεριλαμβανόταν η κάθε αυτού γεννήτρια παραγωγής ρεύματος, μια μικρότερη γεννήτρια που λειτουργούσε ως διεγέρτρια (exciter) και μέσω γέφυρας μη ελεγχόμενων διόδων ανύψωνε την τάση, καθώς και διάφορα συστήματα ελέγχου. Το μοντέλο προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις της εργασίας και είναι το ακόλουθο:



Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον το παρουσιάζει όμως το module που περιγράφει τις εξισώσεις της μηχανής και του ρυθμιστή της. Το interface αυτού :



Εικόνα 5.6: Το interface που υλοποιεί τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εργασίας.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς των υποσυστημάτων ορίζονται ως έχουν, ενώ οι παράμετροι χρόνου που τα αφορούν συμπληρώνονται κατά τις απαιτήσεις της εργασίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν χρειάστηκαν κάποια αλλαγή, καθώς οι διαφορές που υπήρχαν μεταξύ του αρχικού συστήματος και του προς μελέτη συστήματος εντοπίστηκαν στο μέγεθος της παραγόμενης ισχύος εξόδου.

Ουσιαστικά, το συγκεκριμένο module ενσωματώνει τον ρυθμιστή ταχύτητας (speed governor ή απλά governor) καθώς και το μοντέλο του στροβίλου και δίνει ως έξοδο την μηχανική ισχύ P_{mec} που θα δεχόταν μια πραγματική γεννήτρια ρεύματος, προσομοιώνοντας έτσι κατά το δυνατόν το σύστημα που περιγράφηκε στην εικόνα 5.3.

Να σημειωθεί, ότι ο ρυθμιστής ταχύτητας ανακαλύπτει τις μεταβολές που υφίσταται η γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου και τις χρησιμοποιεί ώστε να ρυθμίσει κατάλληλα την τροφοδοσία ατμού στον ατμοστροβίλο (υποσύστημα $G_G(s)$ και $G_T(s)$ εικόνας 5.3).

Η συγκεκριμένη υλοποίηση στηρίχθηκε πάνω σε ένα παράδειγμα μέσα από το εγχειρίδιο χρήστη της Simscape Electrical, που αποτελεί ένα manual της Simulink. Οι διάφοροι παράμετροι του χρόνου ορίζονται από τον κατασκευαστή και είναι οι ακόλουθοι:

Πίνακας 1:

T1	T2	T3	T4	T5
0.01	0.02	0.25	0.09	0.0384

6 Απαραίτητα Ηλεκτρονικά Ισχύος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν ηλεκτρονικές διατάξεις που επιτρέπουν να αλλάξει η μορφή και το πλάτος της τάσης και του ρεύματος, όπως επίσης και να ελέγχονται αποτελεσματικά οι τιμές τους. Τα ηλεκτρονικά ισχύος παρουσιάζουν τεράστια βελτίωση τα τελευταία χρόνια, και είναι ο βασικός λόγος ο οποίος είναι εφικτή η δημιουργία ενός συστήματος μικροδικτύου. Οι διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν βελτιώνουν σε ένα μεγάλο βαθμό τις τυχόν αστάθειες που θα παρουσιαστούν, ενώ την ίδια στιγμή συμβάλλουν στην αυτοματοποιημένη λειτουργία του συστήματος.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν διάφορες κατηγορίες ηλεκτρονικών ισχύος, ανάλογα με τις απαιτήσεις που προέκυπταν προκειμένου η ροή της ισχύος να είναι όσο το δυνατόν πιο στρωτή.

Οι κυριότερες κατηγορίες των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Ανορθωτές: Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα σε συνεχή.
- DC-DC μετατροπείς: Υποβιβάζουν ή ανεβάζουν συνεχή τάση.
- Αντιστροφείς: Μετατρέπουν την συνεχή τάση και ρεύμα σε εναλλασσόμενη.

6.1 Ανορθωτές

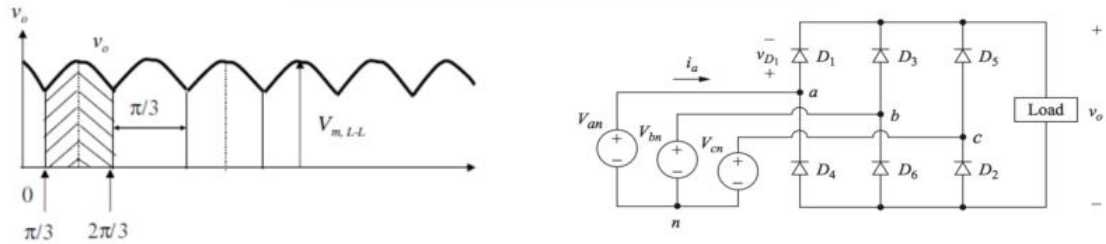
Οι ανορθωτές μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα σε συνεχή μέγεθος. Διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το είδος της ανόρθωσης που επιβάλλουν. Έτσι, υπάρχουν οι ανορθωτές ημίσεως κύματος (αποκλειστικά μονοφασικοί) που πετυχαίνουν ανόρθωση κατά το ήμισυ του χρόνου της περιόδου, και οι ανορθωτές πλήρους κύματος (μονοφασικοί και τριφασικοί) όπου γίνεται πλήρης ανόρθωση καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου.

Σε κάθε περίπτωση, μπορούν να είναι είτε μη ελεγχόμενοι, οπότε και αποτελούνται από διόδους, είτε ελεγχόμενοι, που σε αυτήν την περίπτωση αποτελούνται από θυρίστορ. Να σημειωθεί, ότι τα ημιαγωγικά στοιχεία (διόδοι, θυρίστορ κ.α.) θεωρούνται ιδανικά. Πολύ συχνά, μια γέφυρα διόδων είναι ικανή να δημιουργήσει τον ανορθωτή πλήρους κύματος, αφού κάθε στιγμή μόνο ένα ζευγάρι από αυτές θα είναι πολωμένες ορθά, επιτυγχάνοντας ανύψωση της τάσης στην έξοδο του φορτίου.

Εάν αντικατασταθούν οι διόδοι με θυρίστορ, θα υπάρξει σε κάθε περίπτωση ελεγχόμενη ανόρθωση. Αντίθετα με τις διόδους, τα θυρίστορ είναι ελεγχόμενοι διακόπτες. Για να μεταβεί ένα θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής, πρέπει να του δοθεί παλμός έναυσης. Χωρίς παλμό έναυσης, δεν υπάρχει ροή ρεύματος και το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Όταν βρεθεί σε κατάσταση αγωγής, το θυρίστορ θα συνεχίσει να άγει ακόμα και αν αφαιρεθεί ο παλμός έναυσης.

Με παρόμοια λογική όπως στους μονοφασικούς ανορθωτές λειτουργούν οι τριφασικοί. Και σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να υπάρχει είτε ελεγχόμενη ανόρθωση βασισμένη σε θυρίστορ, είτε μη ελεγχόμενη βασισμένη σε διόδους.

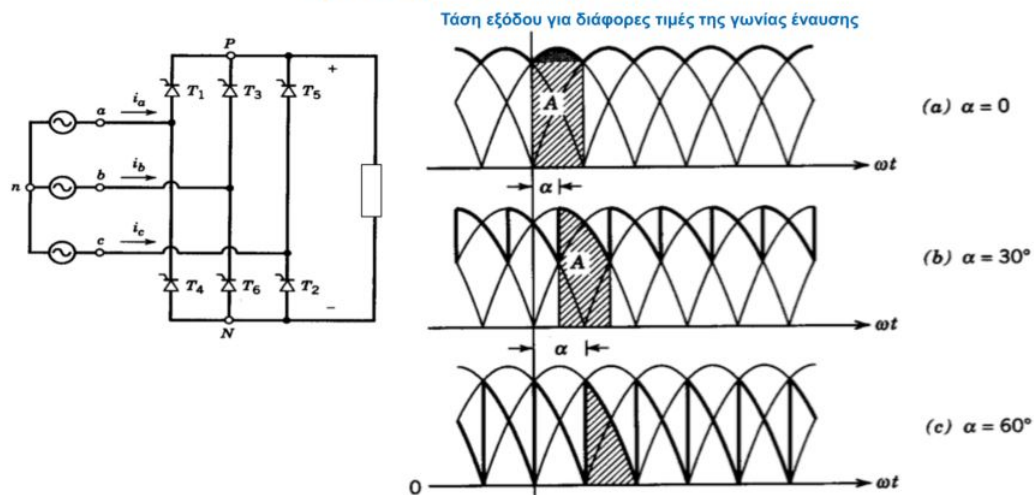
Τριφασική μη Ελεγχόμενη Ανόρθωση



Εικόνα 6.1: Ανορθωτής διόδων .

Για τους μη ελεγχόμενους αντιστροφείς παρατηρείται ότι παρουσιάζουν 6 μικρές κυματίσεις, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι κάθε $\pi/3$ παίρνουμε τη πολική τάση σε κάθε περίπτωση, δηλαδή την διαφορά των φασικών τάσεων. Για τους ελεγχόμενους τριφασικούς αντιστροφείς ισχύει ότι η μετάβαση της τάσης εξόδου στην μέγιστη στιγμιαία πολική τάση μπορεί να καθυστερήσει κατά την γωνία έναυσης α , όπου γωνία έναυσης α είναι η γωνία κατά της οποίας ξεκινούν να άγουν τα ζεύγη των thyristor.

Τριφασική Ελεγχόμενη Ανόρθωση



Εικόνα 6.2: Ανορθωτής thyristor.

Η γωνία α έχει τιμές από 0 μέχρι 90 μοίρες, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από τις 90 μοίρες το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία αντιστροφέα (λειτουργεί δηλαδή όπως θα λειτουργούσε και ένας αντιστροφέας).

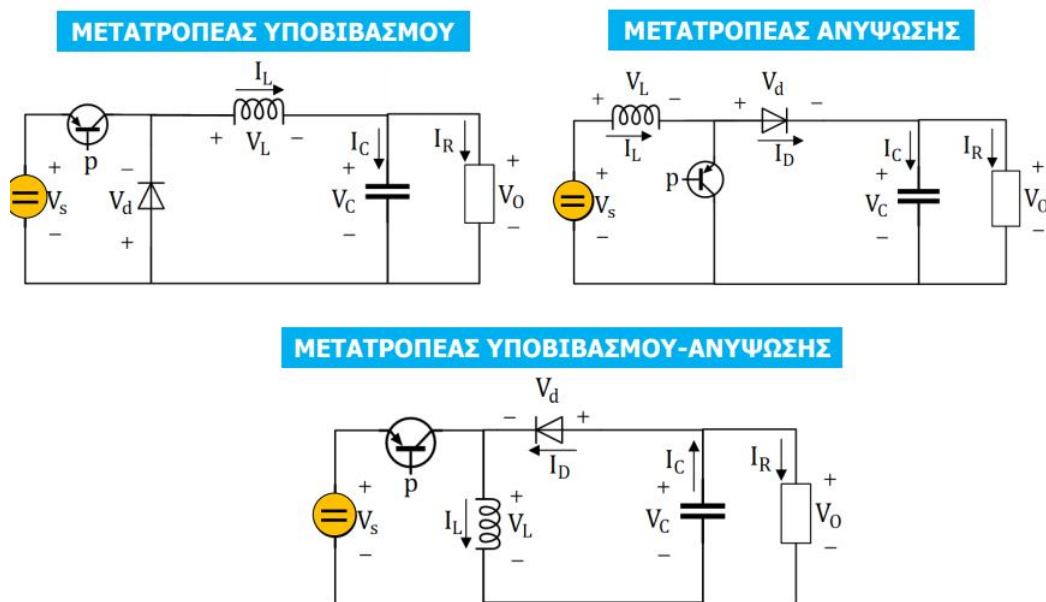
6.2 Μετατροπείς συνεχούς τάσης και ρεύματος

Οι Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχούς τάσης ανυψώνουν, υποβιβάζουν ή και τα δύο ανάλογα με την χρήση τους. Χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μετατροπέας Υποβιβασμού.
- Μετατροπέας Ανύψωσης.
- Μετατροπέας Υποβιβασμού- Ανύψωσης.

Όλοι τους επιδέχονται συνεχή ρεύμα και τάση και παράγουν στην έξοδό τους συνεχές ρεύμα και τάση με αλλαγμένο πλάτος. Για να γίνει αυτό στηρίζονται στην σχέση που περιγράφει την τάση εξόδου και την τάση εισόδου.

Γενικά, διαθέτουν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Οι σχέσεις που περιγράφουν την τάση εξόδου και την τάση εισόδου έχουν σαν παράμετρο τον χρόνο όπου ο διακόπτης τους είναι ανοιχτός και ονομάζεται D . Το D είναι το γινόμενο του χρόνου όπου ο διακόπτης τους είναι ανοιχτός επί την διακοπτική συχνότητα του διακόπτη. Αυτό σημαίνει, ότι το D παίρνει τιμές μεταξύ του μηδέν και του ένα.



Εικόνα 6.3: Κυκλωματικά ισοδύναμα μετατροπέων συνεχούς τάσης και ρεύματος.

Ο διακόπτης (και πιο ειδικά το D) είναι αυτός που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τάση εξόδου. Έτσι για κάθε περίπτωση θα είναι :

1) Για τον Μετατροπέα Υποβιβασμού:

$$V_0 = V_S D \quad (\text{εξ.6.1})$$

2) Για τον Μετατροπέα Ανύψωσης:

$$V_0 = \frac{V_S}{1-D} \quad (\text{εξ.6.2})$$

3) Για τον Μετατροπέα Ανύψωσης-Υποβιβασμού:

$$V_0 = -V_S \frac{D}{1-D} \quad (\text{εξ.6.3})$$

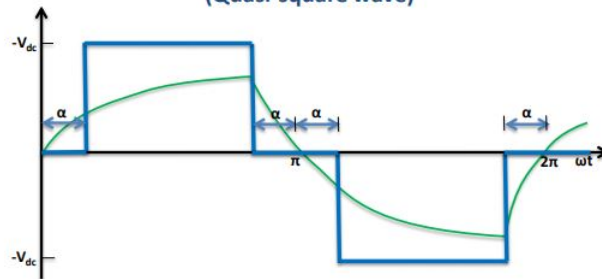
Με τον τελευταίο να λειτουργεί σαν μετατροπέας ανύψωσης για $D > 0.5$, και σαν υποβιβασμού για $D < 0.5$, συνδυάζοντας τις λειτουργίες των δυο προηγούμενων.

6.3 Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς εκτελούν την αντίθετη δουλειά από τους ανορθωτές. Σαν είσοδό τους δέχονται ένα συνεχές ρεύμα και τάση, και παράγουν στην έξοδο μια εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα. Μπορούν να είναι και αυτοί είτε μονοφασικοί, είτε τριφασικοί. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, έχουμε τους αντιστροφείς τετραγωνικού παλμού και τους αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους παλμών PWM.

Όπως και οι ανορθωτές, έτσι και στους μονοφασικούς αντιστροφείς υπάρχει έλεγχος της τάσης εξόδου μέσω μιας γωνίας καθυστέρησης α . Αυτού του είδους οι αντιστροφείς ονομάζονται αντιστροφείς με έλεγχο του πλάτους τάσης εξόδου και αρμονικού περιεχομένου, όπου το πλάτος περιγράφεται από το V_{DC} και το αρμονικό περιεχόμενο από το π , και ουσιαστικά μηδενίζουν κατά μια γωνία α συγκεκριμένα σημεία της εξόδου όπως φαίνεται και παρακάτω:

Αντιστροφείς με έλεγχο του πλάτους τάσης εξόδου και αρμονικού περιεχομένου (Quasi-square wave)



Εικόνα 6.4: Λειτουργία αντιστροφέα σε συνάρτηση με την γωνία καθυστέρησης α .

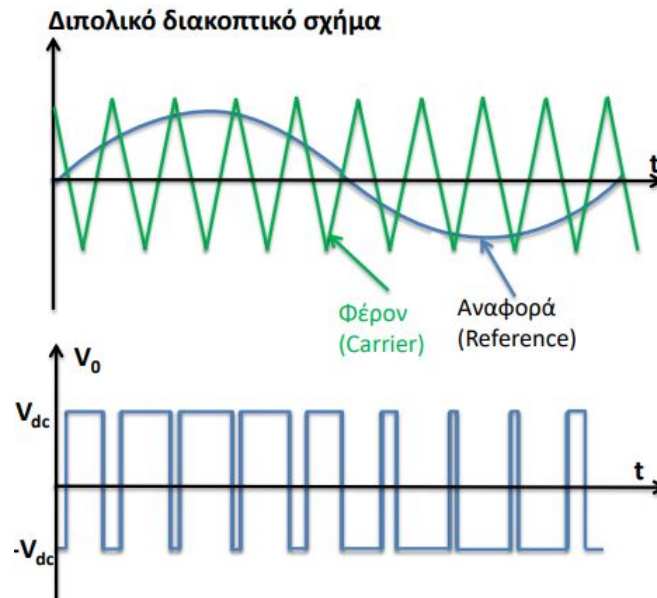
Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να ελεγχθεί το πλάτος της αρμονικής συνιστώσας (με βάση την γωνία καθυστέρησης α), καθώς επίσης επιτυγχάνεται ο εκμηδενισμός συγκεκριμένων αρμονικών. Το πλάτος της τάσης V_{DC} και το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα, και οφείλονται στην παρακάτω σχέση:

$$V_n = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \cos(n\alpha) \quad (\text{εξ.6.4})$$

Με n να συμβολίζει την κάθε μια ξεχωριστή αρμονική της τάσης.

Από την άλλη, η τεχνική διαμόρφωσης του εύρους πλάτους των παλμών (PWM) αποτελεί μια ακόμα πιο αποδοτική επιλογή. Έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει τις ανεπιθύμητες αρμονικές σε υψηλότερες συχνότητες διευκολύνοντας έτσι το φιλτράρισμα τους, το πλάτος και η συχνότητα της τάσης εξόδου μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα και πολύ αποτελεσματικά και παρουσιάζουν καλύτερη ποιότητα στο ρεύμα εξόδου.

Η τεχνική PWM έχει δύο σχήματα, το διπολικό και το μονοπολικό. Στο διπολικό ένα σήμα που λειτουργεί ως φέρων συγκρίνεται με το ιδανικό σήμα αναφοράς σε κάθε χρονική στιγμή, και ανάλογα με το εάν είναι μεγαλύτερο ή μικρότερα δημιουργούνται παλμοί στην έξοδο όπου το μήκος τους είναι διευρυμένο. Σε αντίθετη περίπτωση, η τάση εξόδου παίρνει την αρνητική τιμή της τάσης εισόδου.

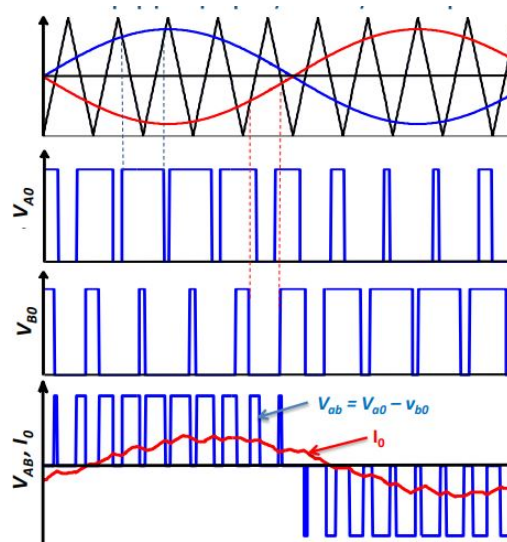


Εικόνα 6.5: Διπολικό διακοπτικό σχήμα.

Το Μονοπολικό διακοπτικό σχήμα από την άλλη, στηρίζεται και πάλι σε ένα φέρων, αλλά αυτή τη φορά συγκρίνεται τόσο με το σήμα αναφοράς, όσο και με το αντίθετο αυτού. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση των αρμονικών προς ακόμα μεγαλύτερες συχνότητες.

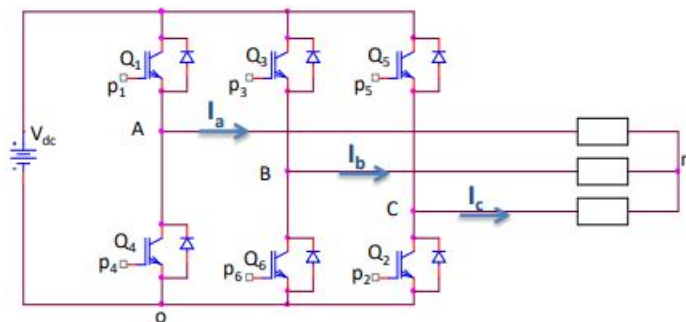
Γενικά, οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούν τεχνική PWM είναι πιο περίπλοκοι και παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες στα διακοπτικά στοιχεία όμως είναι πολύ πιο

αποδοτικοί σε ό,τι αφορά την ποιότητα της παραγόμενης τάσης και ρεύματος, αφού μπορούμε σχετικά εύκολα να περικόψουμε τις ανεπιθύμητες αρμονικές μέσω της εφαρμογής ενός απλού και φθηνού φίλτρου.



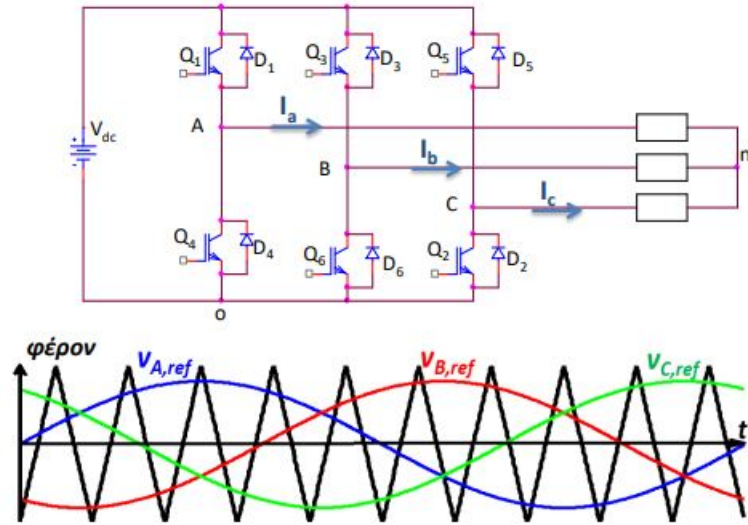
Εικόνα 6.6: Μονοπολικό διακοπτικό σχήμα.

Οι τριφασικοί αντιστροφείς χωρίζονται και αυτοί σε αντιστροφείς παλμών (εξαπαλμικοί) και σε αντιστροφείς με την τεχνική PWM. Η αρχή λειτουργίας τους είναι σε κάθε περίπτωση ίδια με την αντίστοιχη των μονοφασικών, με τη διαφορά ότι πλέον αναφερόμαστε σε τρεις φάσεις, που σημαίνει ότι στην έξοδο των αντιστροφέων παλμών θα υπάρχουν έξι παλμούς, και σε ότι αφορά τα σήματα αναφοράς της τεχνικής PWM θα υπάρχουν τρία από αυτά.



Εικόνα 6.7: Τριφασικός αντιστροφέας παλμών.

Τριφασικοί Αντιστροφείς (PWM)



Εικόνα 6.8: Τριφασικός αντιστροφέας με διαμόρφωση του εύρους πλάτους των παλμών.

7 Σενάρια λειτουργίας

Για την καλύτερη κατανόηση λειτουργίας του συστήματος, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια τα οποία ανταποκρίνονται σε διάφορες μεταβολές με τρόπο παρόμοιο όπως και σε ένα πραγματικό μικροδίκτυο. Τα σενάρια αυτά εξετάζουν τόσο μεταβολές στο φορτίο που θα προκύψουν κατά την διάρκεια της λειτουργίας του μικροδικτύου, όσο και παράγοντες που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του και σχετίζονται είτε με την λειτουργία των εν γένη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσο και με διάφορες βλάβες που θα μπορούσαν να προκύψουν.

Σε δεύτερη φάση, επιδιώχθηκε η επέκταση των δυνατοτήτων του μικροδικτύου προσθέτοντας μια επιπλέον ανεμογεννήτρια, ώστε να είναι σε θέση να καλύψει εκ νέου νέο φορτίο αισθητά μεγαλύτερο από το προηγούμενο. Και σε αυτήν την περίπτωση, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια που αφορούν την κάλυψη της ζήτησης αλλά και την ανταπόκριση του συστήματος σε διάφορες μεταβολές των εν γένη στοιχείων του.

Να σημειωθεί ότι σε όλα τα αποτελέσματα διακρίθηκαν διάφορα μεταβατικά φαινόμενα που έχουν να κάνουν κυρίως με την λειτουργία του συστήματος από την μετάβαση OFF σε ON. Πέραν αυτού, ο χρονικός ορίζοντας ορίζεται σε δευτερόλεπτα και ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να μπορέσουμε να δείξουμε τις κυρίως μεταβολές μέσα σε ένα λογικό χρονικό πλαίσιο. Ενδεικτικό είναι, ότι η εκτέλεση του συστήματος από την Simulink απαιτεί πολύ χρόνο και τεράστια υπολογιστική ισχύ.

Είναι λογικό, ότι πολλές μεταβολές που προσομοιώθηκαν μέσω του προγράμματος στην πραγματικότητα μπορεί να έπαιρναν πολύ περισσότερο ή πολύ λιγότερο χρόνο. Αυτό συμβαίνει επειδή η Simulink λαμβάνει υπόψη της μόνο τις διαφορικές εξισώσεις των εκάστοτε component και άρα πιθανές διαφορές με την πραγματικότητα δεν μπορούν να εκφραστούν από την ίδια, παρά μόνο με την δική μας μέριμνα και προσομοίωση. Για την αποφυγή επιπλέον πολυπλοκότητας έχουν οριστεί εν μέρει κάποιες από αυτές τις συνθήκες πραγματικότητας σε κάποια σημεία του συστήματος, όπου ήταν απολύτως αναγκαίο.

Να σημειωθεί επιπρόσθετα, ότι παρόλο που τα διάφορα μοντέλα έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στις ονομαστικές του τιμές, κάτι τέτοιο δεν επιδιώχθηκε. Αυτό συνέβη γιατί θεωρήθηκε ότι οι συνθήκες κάτω υπό τις οποίες θα γινόταν αυτό θα ήταν πολύ ιδανικές και δεν θα αντιστοιχούσαν στην πραγματικότητα.

Πολλές φορές θα διακρίνεται από τα διαγράμματα ότι η αποδιδόμενη ισχύς ενός component ξεπερνά τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Simulink δεν λαμβάνει υπόψη της τους περιορισμούς που θέτονται στα αποτελέσματά της όπως αυτά προκύψουν από την επίλυση των εξισώσεων τους. Κάτι τέτοιο όμως δεν θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και εντελώς λάθος, αφού και στην πραγματικότητα υπάρχει παραβίαση των ορίων λειτουργίας (υπό προϋποθέσεις) που υφίστανται λόγω αχρίβως των διάφορων μεταβατικών καταστάσεων.

Τα εξεταζόμενα σενάρια χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- Σενάρια Κατηγορίας Α: Σε αυτά τα σενάρια εξετάζεται η απόκριση του συστήματος όταν σε αυτό συμπεριλαμβάνονται: φωτοβολταϊκό σύστημα ονομαστικής ισχύος 70kW, ανεμογεννήτρια με γεννήτρια τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών (PMSG) ονομαστικής ισχύος 100kW, ντιζελογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 50 kW, μπαταρίες χωρητικότητας 1900kWh και αντιστροφέας ονομαστικής ισχύος 150 kW.
- Σενάρια Κατηγορίας Β: Σε αυτά τα σενάρια εξετάζεται η απόκριση του συστήματος όταν σε αυτό συμπεριλαμβάνονται: φωτοβολταϊκό σύστημα ονομαστικής ισχύος 70kW, δυο ανεμογεννήτριες με γεννήτρια τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών (PMSG) ονομαστικής ισχύος 100kW έκαστη, ντιζελογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 50 kW, μπαταρίες χωρητικότητας 2200kWh και αντιστροφέας ονομαστικής ισχύος 170 kW.

Αναλυτικά:

- Σενάριο Α1: Αύξηση φορτίου από 140 kW στα 180 kW.
- Σενάριο Α2: Μείωση φορτίου από 140 kW στα 100 kW.
- Σενάριο Α3: Αύξηση φορτίου από 100 kW στα 140 kW με ντιζελογεννήτρια εκτός λειτουργίας.
- Σενάριο Α4: Μείωση φορτίου από 100 kW στα 60 kW με ντιζελογεννήτρια εκτός λειτουργίας.
- Σενάριο Α5: Σταθερό φορτίο 100 kW με ντιζελογεννήτρια αρχικά αποσυνδεδεμένη, και ενεργοποίηση στην συνέχεια.
- Σενάριο Α6: Σταθερό φορτίο 100 kW με ντιζελογεννήτρια αρχικά ενεργοποιημένη, και απενεργοποίηση στην συνέχεια.
- Σενάριο Α7: Σταθερό φορτίο 140 kW με ηλιακή ακτινοβολία αρχικά 300 W/m² και 800 W/m² στην συνέχεια.
- Σενάριο Α8: Σταθερό φορτίο 140 kW με ηλιακή ακτινοβολία αρχικά 800 W/m² και 300 W/m² στην συνέχεια.

Αντίστοιχα:

- Σενάριο Β1: Αύξηση φορτίου από 210 kW στα 270 kW.
- Σενάριο Β2: Μείωση φορτίου από 210 kW στα 150 kW.
- Σενάριο Β3: Αύξηση φορτίου από 150 kW στα 210 kW με ντιζελογεννήτρια εκτός λειτουργίας.
- Σενάριο Β4: Μείωση φορτίου από 150 kW στα 90 kW με ντιζελογεννήτρια εκτός λειτουργίας.

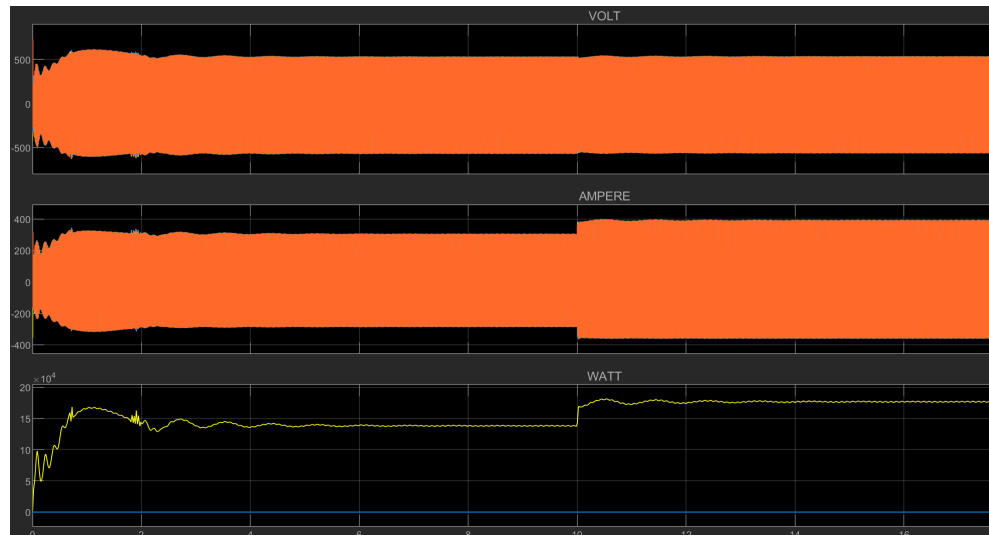
- Σενάριο B5: Σταθερό φορτίο 150 kW με ντιζελογεννήτρια αρχικά αποσυνδεδεμένη, και ενεργοποίηση στην συνέχεια.
- Σενάριο B6: Σταθερό φορτίο 150 kW με ντιζελογεννήτρια αρχικά ενεργοποιημένη, και απενεργοποίηση στην συνέχεια.
- Σενάριο B7: Σταθερό φορτίο 150 kW με ηλιακή ακτινοβολία αρχικά 300 W/m² και 800 W/m² στην συνέχεια.
- Σενάριο B8: Σταθερό φορτίο 150 kW με ηλιακή ακτινοβολία αρχικά 800 W/m² και 300 W/m² στην συνέχεια.

7.1 Σενάριο A1

Στο πρώτο σενάριο που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι όλες οι συνθήκες είναι ιδανικές. Αυτό σημαίνει ότι υπήρχε επάρκεια ανέμου και ηλίου, καθώς και ότι η μηχανή Ντίζελ βρισκόταν σε συνεχή λειτουργία. Το ζητούμενο φορτίο προς κάλυψη ορίστηκε αρχικά στα 140 kW ενώ στην συνέχεια ελέγχθηκε η απόκριση του μικροδικτύου σε απότομη αύξηση του φορτίου στα 180 kW.

Είναι κατανοητό ότι μια τέτοια αύξηση ενός τόσο μεγάλου φορτίου δεν είναι εφικτό να γίνει τόσο απότομα (παρά μόνο ίσως σε κάποια περίπτωση βλάβης), αλλά αυτό που επιχειρήθηκε επί της ουσίας ήταν να ελεγχθεί η όσο το δυνατόν πιο βίαιη μεταβολή που θα μπορούσε να υποστεί το σύστημα.

Το σύστημα υπό αυτές τις συνθήκες κατάφερε να ανταποκριθεί πολύ ικανοποιητικά, αποδίδοντας την απαραίτητη ισχύ. Παρακάτω φαίνεται και η παραγόμενη ισχύ του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή σύμφωνα με τις προϋποθέσεις και περιορισμούς που θέσαμε προηγουμένως.

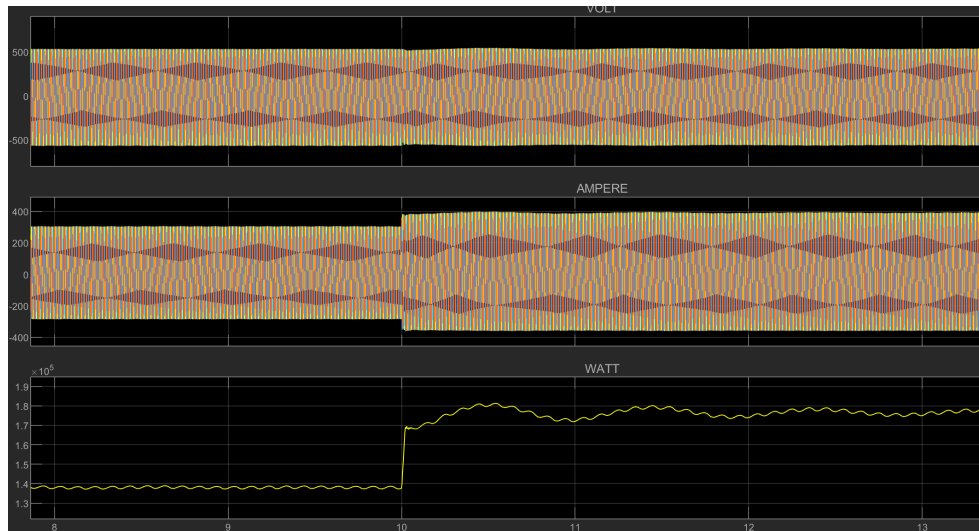


Εικόνα 7.1: Αποδιδόμενη ισχύς του συστήματος.

Παρατηρείται ότι η τάση και το ρεύμα έχουν αυτή την μορφή, που ουσιαστικά αντικατοπτρίζει τα σήματα των τριών φάσεων του ρεύματος και της τάσης αντίστοιχα. Η αποδιδόμενη ισχύς του φορτίου μετά από ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο είναι η ζητούμενη στα 140 kW και μένει σχεδόν σταθερή. Την χρονική στιγμή 10 sec γίνεται η απότομη μεταβολή από τα 140 στα 180 kW επομένως, το σύστημα καταφέρνει μετά από σύντομο χρονικό διάστημα να αποδώσει την νέα ζητούμενη ισχύ.

Με τη χρήση του zoom παρατηρείται ότι η τάση μένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της αλλαγής, και το ρεύμα αυξάνει κατά πλάτος, διατηρώντας όμως παράλληλα την ημιτονοειδή του μορφή.

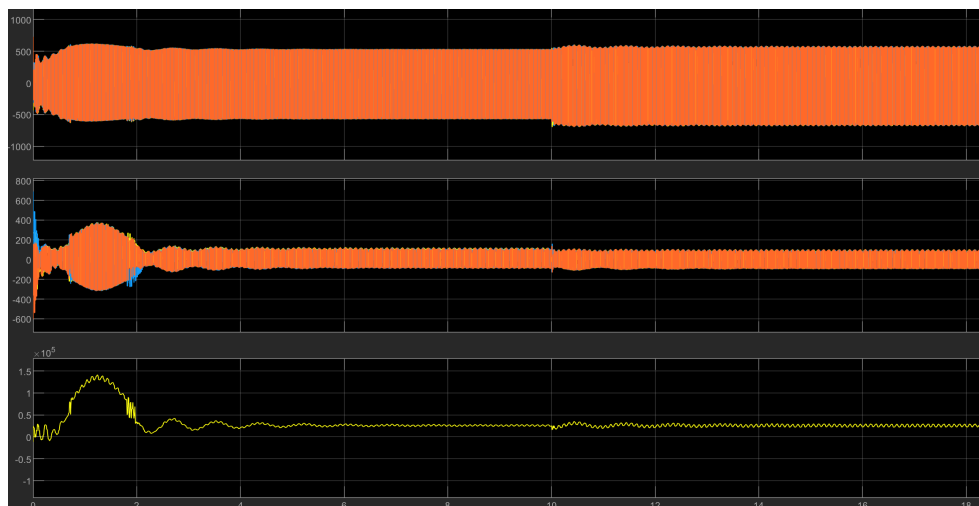
Την ίδια στιγμή, παρατηρούνται κάποιες ελαφριές ταλαντώσεις που οφείλονται στην εκτεταμένη χρήση διάφορων παθητικών φίλτρων και στην μη ιδανική τους προσαρμογή στο σύστημα. Σε κάθε περίπτωση όμως, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και η ζητούμενη κάλυψη των αναγκών επιτυγχάνεται.



Εικόνα 7.2: Αποδιδόμενη ισχύς του συστήματος (zoom).

Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα των διάφορων components του συστήματος.

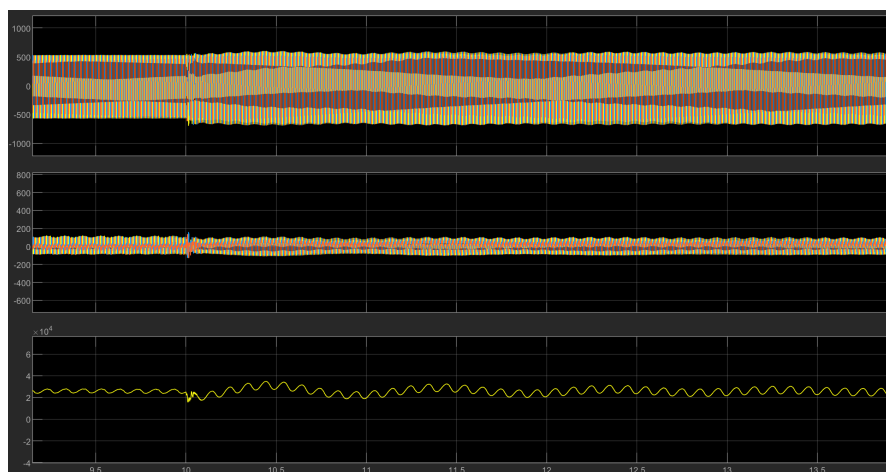
Ξεκινώντας με την ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια εξάγονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Εικόνα 7.3: Αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας.

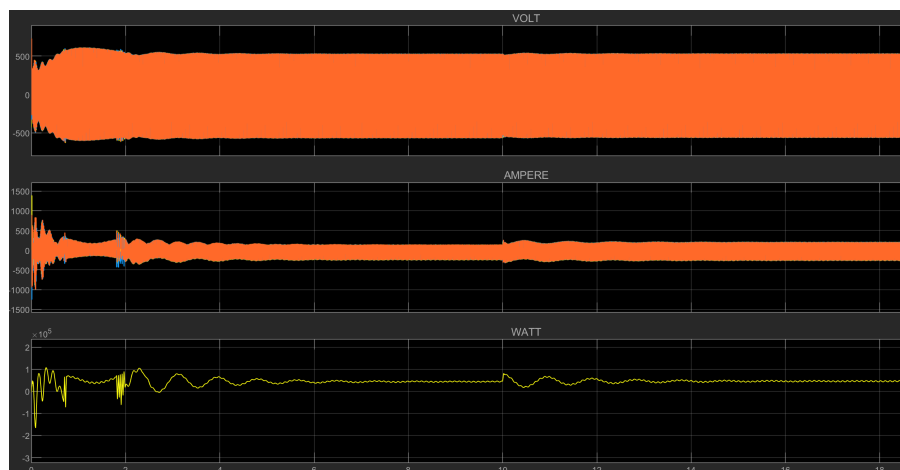
Η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας όμοια με την συνολική αποδιδόμενη ισχύ, παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο μεταβατικό φαινόμενο στις αρχικές τιμές του χρονικού ορίζοντα, που καθώς μεταβαίνει το σύστημα από την αρχική κατάσταση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας εξαφανίζεται πλήρως, δίνοντας ένα ικανοποιητικό ποσό της ισχύος και συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο στην κάλυψη της ζήτησης. Την χρονική στιγμή 10 sec γίνεται αντιληπτή και εδώ η μεταβολή του φορτίου, με συνέπεια να ξανά εμφανίζεται ένα σχετικά μικρό μεταβατικό φαινόμενο που σύντομα αποσβένει.

Με τη χρήση του zoom παρατηρείται το μέγεθος αυτών των ταλαντώσεων:



Εικόνα 7.4: Αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας (zoom).

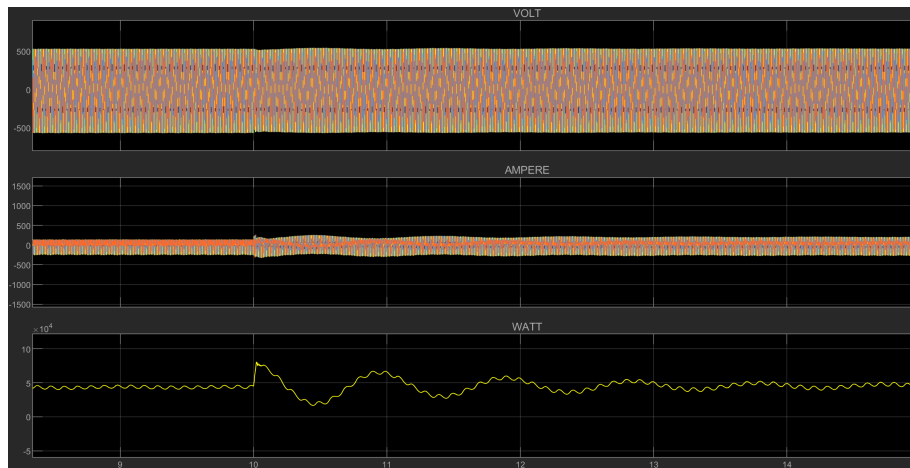
Σε ό,τι αφορά την γεννήτρια Ντίτζελ, αυτή θα συμπεριφέρεται ως ακολούθως:



Εικόνα 7.5: Αποδιδόμενη ισχύς της Ντιζελογεννήτριας.

Όμοια με τα προηγούμενα διαγράμματα, και εδώ αποτυπώνεται το μεταβατικό φαινόμενο. Χαρακτηριστικό είναι ότι για κάποιες χρονικές στιγμές το σύστημα της ντιζελογεννήτριας φαίνεται να απορροφά ισχύ, μέχρις ότου φτάσει σε ένα ικανό επίπεδο που θα μας εγγυηθεί την ομαλή και σταθερή λειτουργία. Κατά την στιγμή της μετάβασης του φορτίου ακολουθεί ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο το οποίο όμως φαίνεται να λαμβάνει τέλος σε σύντομο χρονικό διάστημα, επιστρέφοντας στην ομαλή λειτουργία της μηχανής.

Με τη χρήση του zoom διακρίνονται καλύτερα οι μεταβολές στην αποδιδόμενη ισχύ της γεννήτριας:



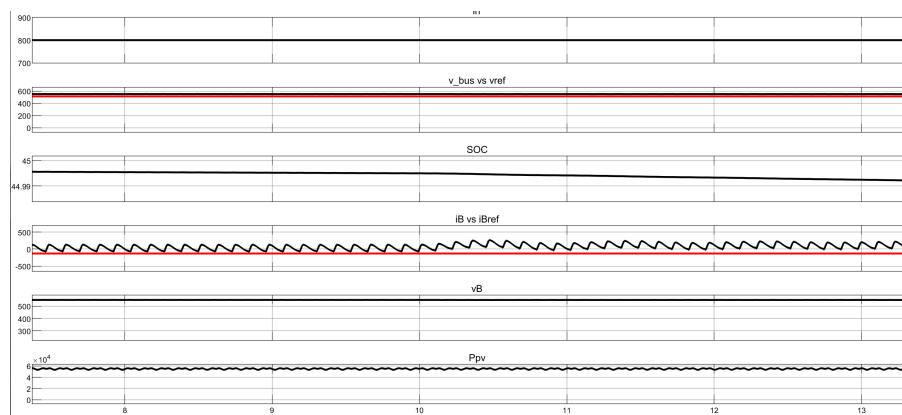
Εικόνα 7.6: Αποδιδόμενη ισχύς της Ντιζελογεννήτριας (zoom). Κατά αντιστοιχία, τα διαγράμματα των μπαταριών φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 7.7: Αποδιδόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ και το SoC της μπαταρίας.

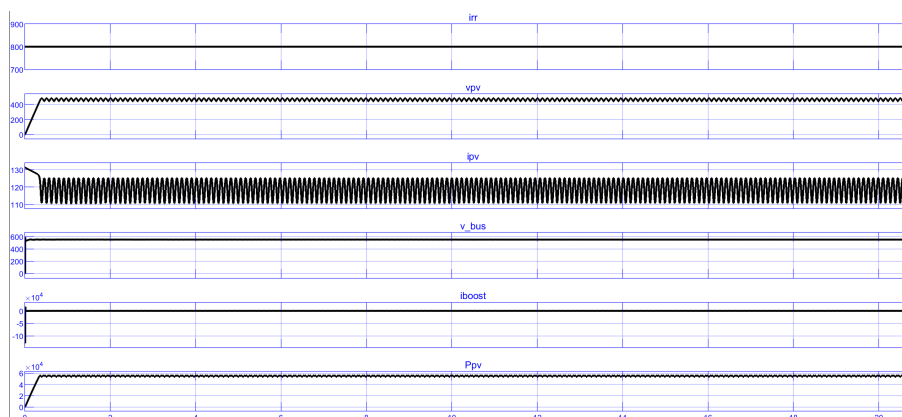
Παρατηρείται, ότι την χρονική περίοδο από 1-3 sec το SoC της μπαταρίας αυξάνεται ελαφρώς ως συνέπεια στην τεράστια περίσσεια ισχύος που υπάρχει στο

σύστημα. Μετά από αυτή τη χρονική περίοδο, το σύστημα φαίνεται να διατηρείται σταθερό, μέχρι την στιγμή της μετάβασης του φορτίου. Την χρονική στιγμή 10 sec γίνεται αντιληπτό ότι η μπαταρία εκφορτίζεται με μεγάλο ρυθμό, προκειμένου με την σειρά της να συμβάλει στην κάλυψη της αύξησης της ζήτησης. Γενικά, η μείωση που παρατηρείται είναι πολύ μικρή (της τάξης του 0.01 %), όμως κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο επειδή το σύστημα αντιλαμβάνεται σαν χρονικό ορίζοντα το δευτερόλεπτο.



Εικόνα 7.8: Αποδιδόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ και το SoC της μπαταρίας (zoom).

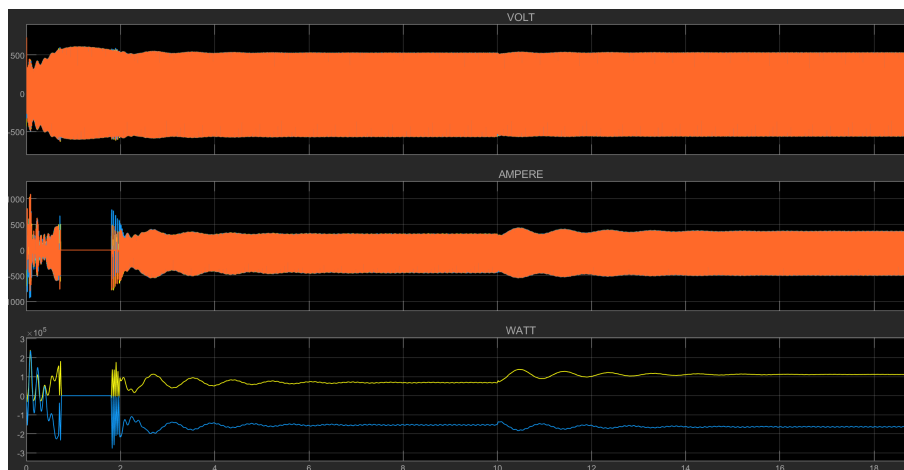
Με τη χρήση του zoom φαίνονται οι μικρο-κυματώσεις του ρεύματος της μπαταρίας. Η ύπαρξή τους οφείλεται στον ίδιο λόγο που το συνολικό σύστημα διατηρεί αυτές τις μικρο-ταλαντώσεις, και ως συνέπεια, το σύστημα μπαταρίας προσπαθεί να τις αποσβέσει αποκτώντας αυτή την μορφή. Άμεσα συνδεδεμένο με το σύστημα της μπαταρίας είναι και το φωτοβολταϊκό σύστημα του μικροδικτύου (Εικόνα 7.9).



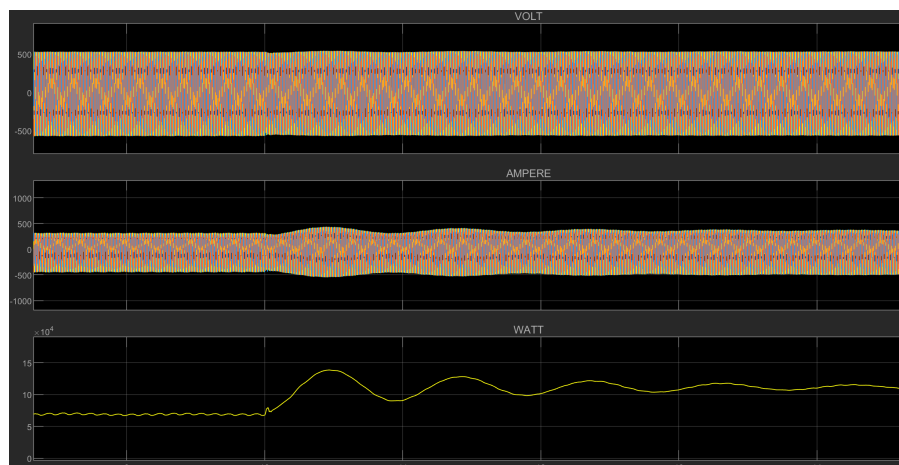
Εικόνα 7.9: Αποδιδόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ.

Στην παραπάνω εικόνα διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος καθώς και η τελική ισχύς που αποδίδει υπό σταθερή ηλιακή ακτινοβολία 800 W/m^2 . Η τάλαντωση που φαίνεται σχετικά με το ρεύμα των στοιχείων είναι σχεδόν αμελητέα και επι της ουσίας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν ένα DC μέγεθος, με όμοιο τρόπο όπως και η τάση. Σαν iboost ορίζεται το ρεύμα μετά τον DC-DC converter.

Η ισχύς που αποδίδει το σύστημα φωτοβολταϊκών-μπαταρία ενσωματώνεται στην αποδιδόμενη ισχύ μέσω του Inverter, ο οποίος μετατρέπει την συνεχή τάση και ρεύμα σε εναλλασσόμενα. Τα διαγράμματα που δείχνουν τον τρόπο λειτουργίας του είναι τα εξής (Εικόνες 7.10-7.11):



Εικόνα 7.10: Αποδιδόμενη ισχύς του Inverter.



Εικόνα 7.11: Αποδιδόμενη ισχύς του Inverter (zoom).

Ο Inverter λειτουργεί όπως ακριβώς θα έπρεπε. Όταν η παραγόμενη ισχύς του συστήματος είναι μεγαλύτερη από την ζητούμενη παύει την λειτουργία του, όπως συμβαίνει την χρονική περίοδο από 1 μέχρι 1.9 sec. Υπό ζητούμενο φορτίο 140 kW αποδίδει μια ισχύ της τάξεως των 70 kW, ενώ μετά την μεταβολή του φορτίου αυξάνεται στα 110 kW προκειμένου να καλύψει την ζήτηση.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η κάλυψη των αναγκών επιτεύχθηκε από την ροή ενέργειας που προήλθε από τον inverter (άρα κατ' επέκταση από την μπαταρία, μιας και το φωτοβολταϊκό σύστημα παρήγαγε σταθερή ισχύ). Τα υπόλοιπα components του συστήματος την στιγμή της μετάβασης παρουσίασαν μεταβατικά φαινόμενα, αλλά λίγο αργότερα επέστρεψαν στις φυσιολογικές τους τιμές, όπως ήταν καθορισμένες αυτές πριν την μεταβολή.

Κατά αντιστοιχία με τον inverter υπάρχει και ο rectifier ο οποίος λειτουργεί με την ακριβώς αντίθετη λογική, δηλαδή την μετατροπή ρεύματος από συνεχή μεγέθη σε εναλλασσόμενα. Όπως είναι αναμενόμενο, όταν λειτουργεί ο inverter δεν θα λειτουργεί ο rectifier και το αντίστροφο.



Εικόνα 7.12: Αποδιδόμενη ισχύς του rectifier.

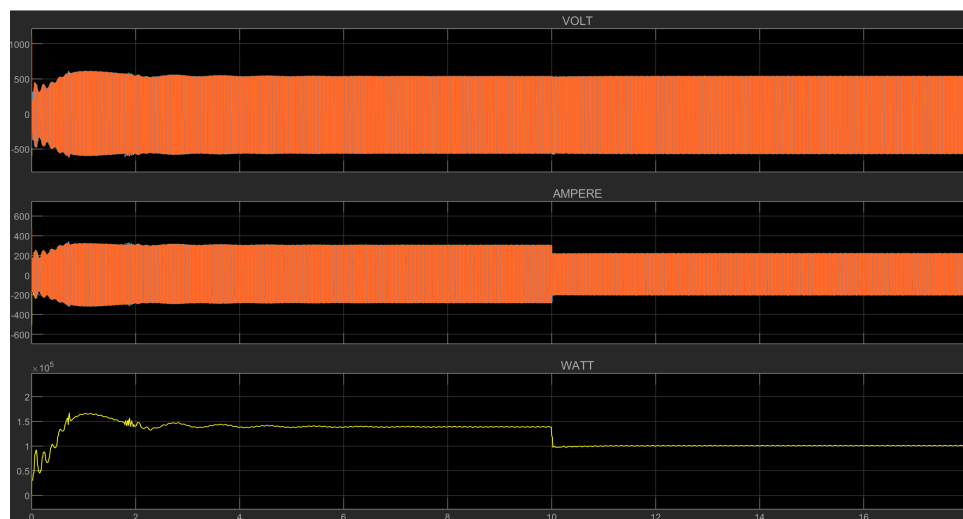
Σε αυτό το component παρατηρείται ότι έχει ροή ισχύος από το σύστημα προς την μπαταρία ακριβώς την χρονική στιγμή όπου η ανεμογεννήτρια παρήγαγε μια τεράστια ισχύ. Αυτήν την μεταφορά ισχύος την είχε παρατηρηθεί ακόμα και στο SoC της μπαταρίας, όπου στιγμιαία φαινόταν να φορτίζεται από την περίσσεια ενέργειας.

Συμπερασματικά, η μεταφορά αυτού του ποσού της ενέργειας πίσω στην μπαταρία, πέρα του ότι αποδεικνύει ότι το σύστημα λειτουργεί όπως θα έπρεπε όταν θα έπρεπε, συμβάλλει και στην εξομάλυνση των μεταβολών που γίνονται αντιληπτές από το φορτίο (μέσω του διαγράμματος της συνολικής παραγόμενης ισχύος).

7.2 Σενάριο A2

Σε αυτό το σενάριο υπάρχει η αντίθετη λογική από πριν. Το φορτίο, πάλι υπό ιδανικές συνθήκες σε ό,τι αφορά την λειτουργικότητα των components, την χρονική στιγμή 10 sec μειώνεται ακαριαία από τα 140 kW στα 100 kW. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση αυτό το σενάριο είναι αρκετά πιο ρεαλιστικό, μιας και κάτι τέτοιο θα μπορούσε να είχε συμβεί σε κάποια περίπτωση σφάλματος του μικροδικτύου που θα ανάγκαζε κάποια φορτία να βγουν εκτός. Το ζητούμενο και σε αυτήν την περίπτωση είναι να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα θα ανταποκριθεί, πως δηλαδή θα κατανέμει την παραγόμενη ισχύ του και τι συνέπεια θα έχει αυτό στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Τα αποτελέσματα του εξεταζόμενου σεναρίου αναλύονται στην συνέχεια, με πρώτο την συνολική παραγόμενη ισχύ του συστήματος.

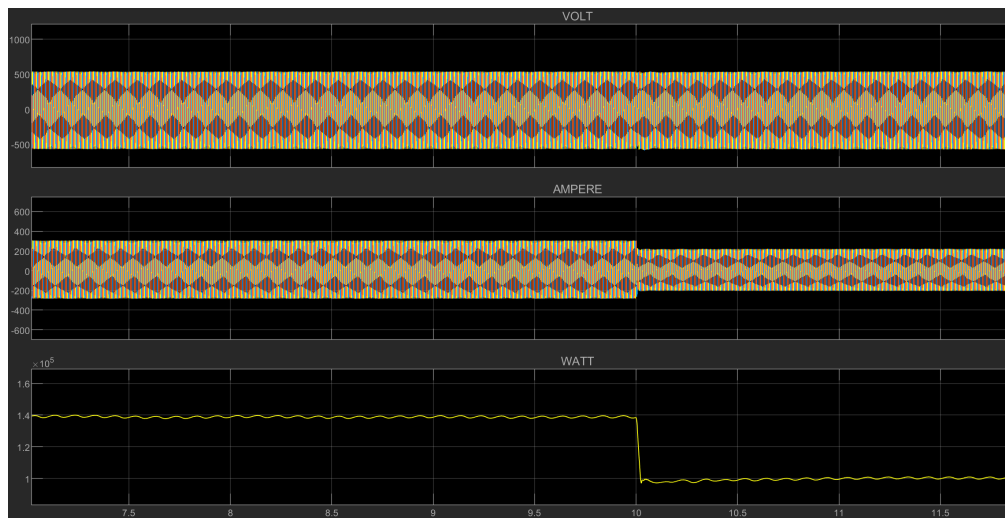


Εικόνα 7.13: Αποδιδόμενη ισχύς του σεναρίου A2.

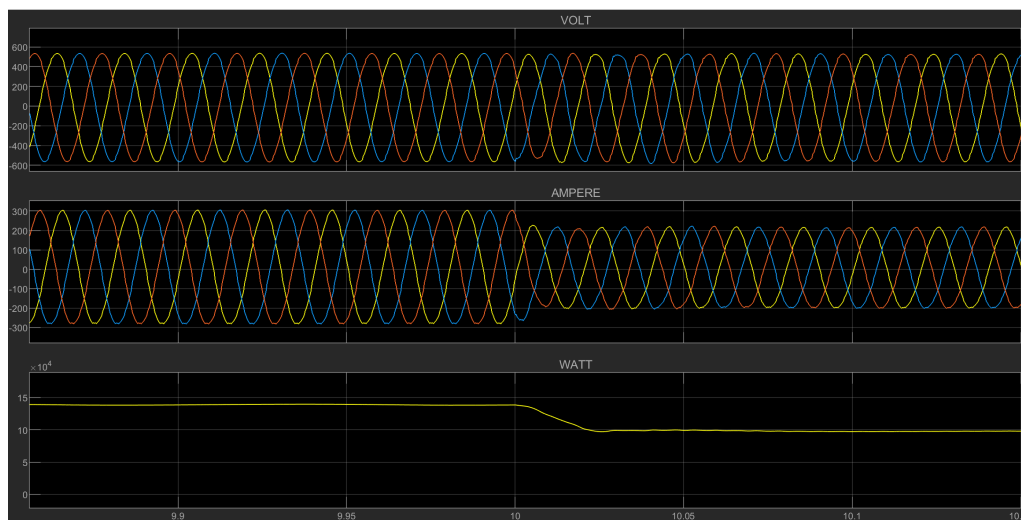
Παρατηρείται ότι και σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα που ξεκινάει από την αρχική του κατάσταση OFF, μεταβαίνει μέσω ενός σύντομου μεταβατικού φαινομένου στην επιθυμητή παραγωγή ισχύος, δηλαδή τα 140 kW. Και πάλι, την χρονική στιγμή 10 sec προκύπτει η μεταβολή στο φορτίο, με συνέπεια το σύστημα να προσπαθεί και να επιτυγχάνει σχεδόν ακαριαία την μετάβαση στην νέα κατάσταση ισορροπίας.

Και σε αυτήν την περίπτωση, η τάση όπως είναι αναμενόμενο διατηρείται σταθερή, ενώ το ρεύμα προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο στις ανάγκες του φορτίου.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.14) παρατηρείται ότι υπάρχει και πάλι μια ελαφριά κυμάτωση που οφείλεται στους ίδιους λόγους που είχαν περιγραφεί νωρίτερα. Μέσω της χρήσης του super-zoom (Εικόνα 7.15) παρατηρείται ακόμα και η στιγμή της μετάβασης και κυρίως το πόσο ομαλή είναι, όπως επίσης και η ημιτονοειδή μορφή του ρεύματος και της τάσης.

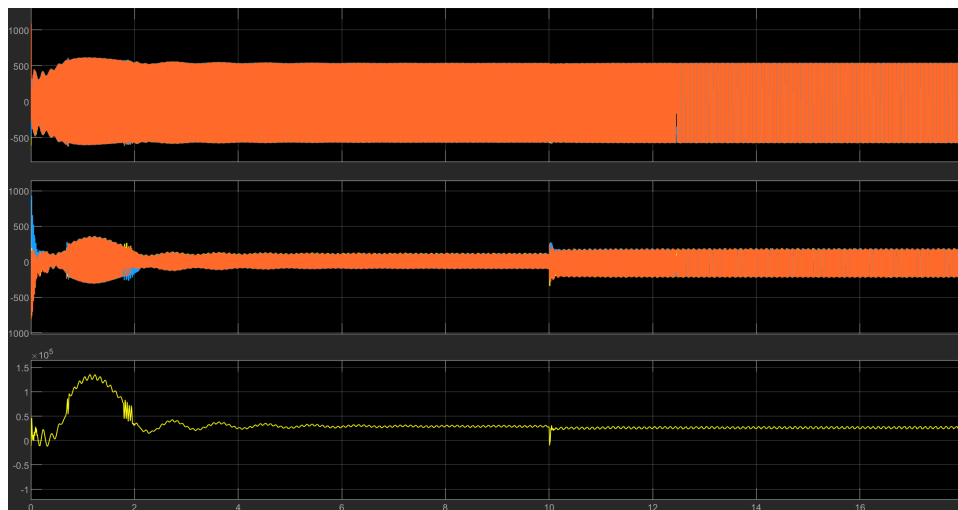


Εικόνα 7.14: Αποδιδόμενη ισχύς του σεναρίου A2(zoom).



Εικόνα 7.15: Αποδιδόμενη ισχύς του σεναρίου A2 (super-zoom).

Σε ό,τι αφορά την παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια, τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι τα ακόλουθα:



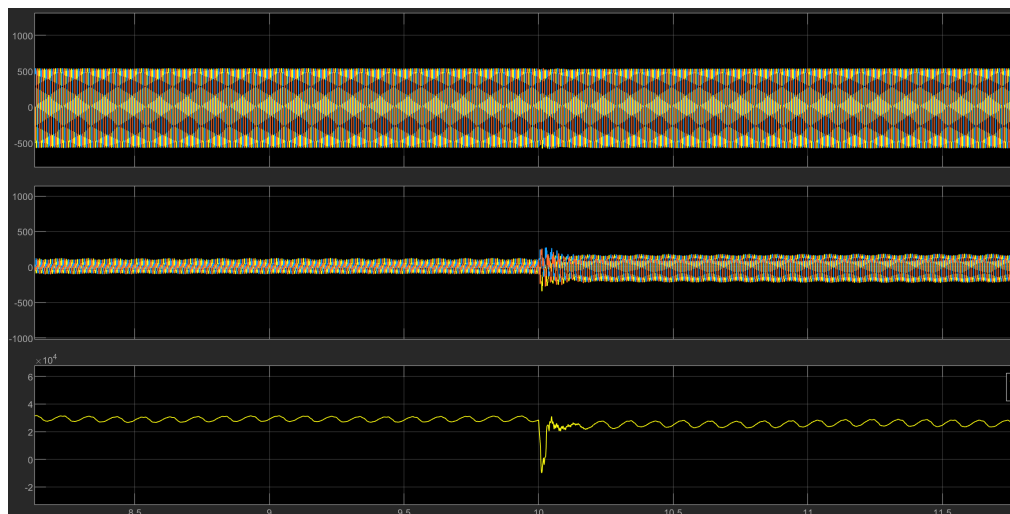
Εικόνα 7.16: Αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας του σεναρίου A2.

Το μεταβατικό φαινόμενο κάνει και εδώ την εμφάνισή του, όμως όπως και στην προηγούμενη περίπτωση σε σύντομο χρονικό διάστημα το σύστημα μεταβαίνει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Κατά την στιγμή της μεταβολής της ζήτησης, η ανεμογεννήτρια σχεδόν ακαριαία αναπροσαρμόζεται στις νέες απαιτήσεις.

Χαρακτηριστικό είναι ότι το πλάτος του ρεύματος αλλάζει, όμως παρόλα αυτά η συνολική αποδιδόμενη ισχύς παραμένει σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την μεταβολή τα παθητικά φίλτρα του συστήματος αντικαθίστανται με νέα, προκειμένου το σύστημα να αποδίδει την ίδια ισχύ με αυτή που έδινε πριν την μεταβολή.

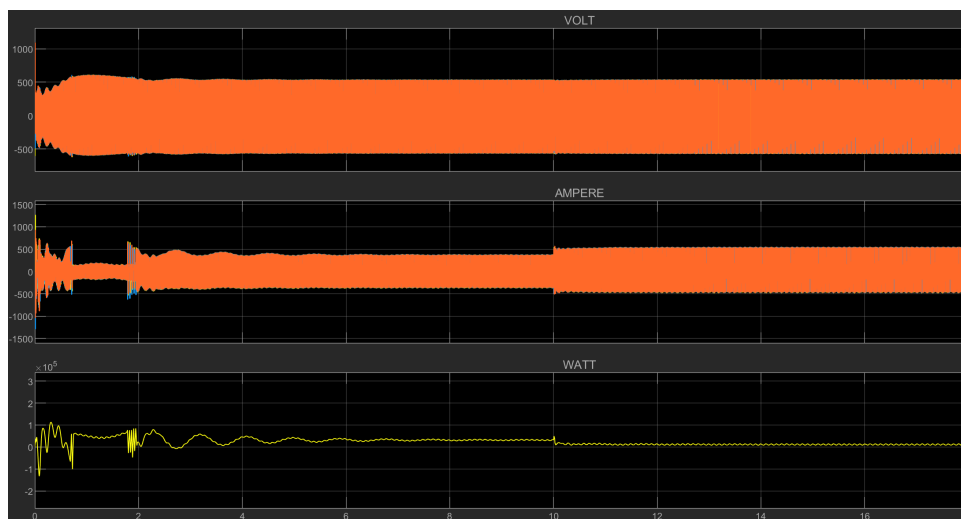
Κάτι τέτοιο μπορεί να μην έχει πολύ νόημα σε πραγματικές συνθήκες, μιας και στην πραγματικότητα επιζητείται η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τις διάφορες ΑΠΕ του συστήματος. Αυτό προκειμένου να γίνουν αντιληπτές οι μεταβολές που οφείλονται στο φορτίο και όχι στις αλλαγές των διάφορων φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

Επί της ουσίας, έχει ενδιαφέρον η ροή της ισχύος από το σύστημα αποθήκευσης, με δεδομένες συνθήκες στον αέρα, την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.17) παρατηρείται καλύτερα η στιγμή της μεταβολής, ενώ την ίδια στιγμή διακρίνεται και σε αυτήν την περίπτωση η μικρο-κυμάτωση που διακατέχει το όλο σύστημα. Χαρακτηριστικό σε αυτό το διάγραμμα είναι το γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια χαμηλώνει, έστω και λίγο, την αποδιδόμενη ισχύ της, συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο στην μείωση της συνολικής παραγόμενης ισχύς και στην μεταφορά της στα 100 kW.



Εικόνα 7.17: Αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας του σεναρίου A2 (zoom).

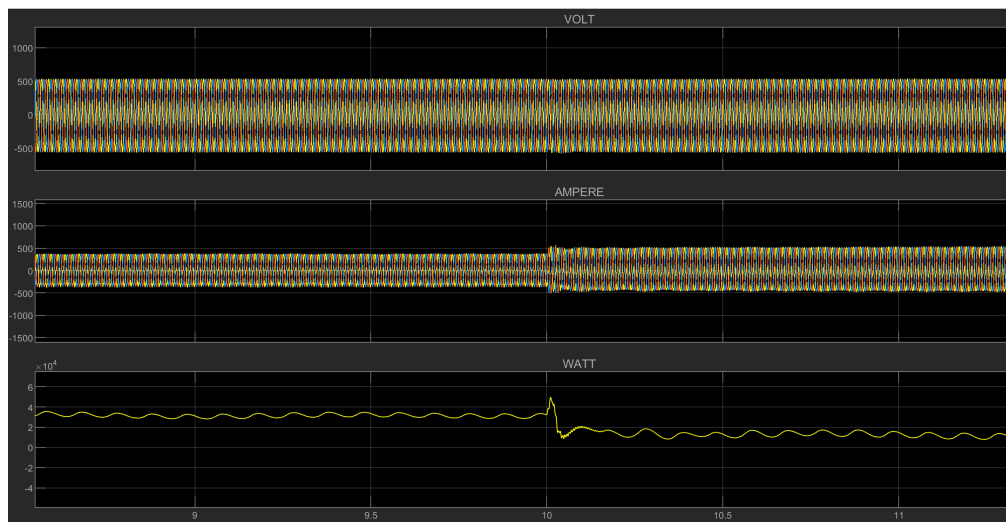
Με την ίδια λογική συμπεριφέρεται και η γεννήτρια ντίζελ. Ενώ αρχικά φαίνεται να παραβιάζει τα ονομαστικά της όρια, μετά το πέρας κάποιων δευτερολέπτων μεταβαίνει στην επιθυμητή της τιμή προκειμένου να αποδώσει την ζητούμενη ισχύ.



Εικόνα 7.18: Αποδιδόμενη ισχύς της μηχανής ντίζελ του σεναρίου A2.

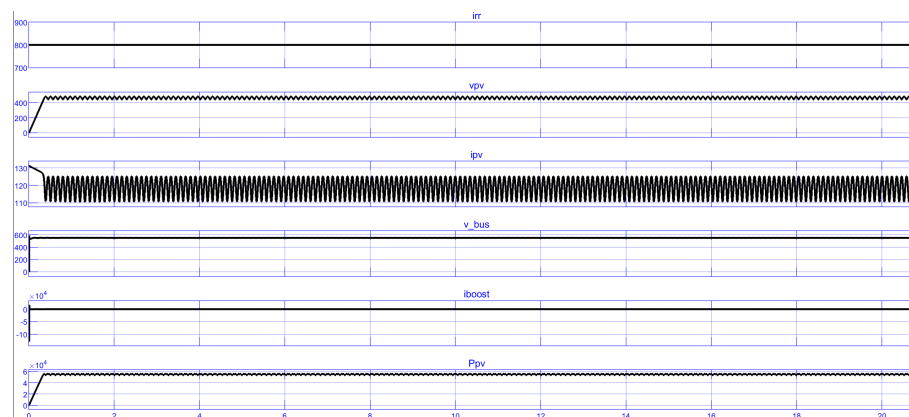
Κατά αντιστοιχία με την ανεμογεννήτρια, την στιγμή της αλλαγής της ζήτησης παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα κυμάτωσης και αύξησης του πλάτους του ρεύμα-

τος, που όμως δεν συνδυάζεται με ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος αλλά απεναντίας παρατηρείται μείωση. Τα παθητικά φίλτρα, όπως και πριν, καταναλώνουν μεγάλο μέρος της παραγόμενης ισχύος προκειμένου η κυματομορφή της ισχύος εξόδου να έχει την όσο το δυνατόν πιο ομαλή μορφή.



Εικόνα 7.19: Αποδιδόμενη ισχύς της μηχανής ντίζελ του σεναρίου A2 (zoom). Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.19) παρατηρείται ότι και εδώ η ισχύς που αποδίδει η μηχανή ντίζελ στο σύστημα μειώνεται, προκειμένου να συμβάλει στην μείωση της συνολικής ζητούμενης κατανάλωσης.

Σε ό,τι αφορά τα φωτοβολταϊκά πάνελ, αυτά λειτουργούν υπό τις ίδιες προϋποθέσεις όπως και στο προηγούμενο σενάριο, δηλαδή με σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία και σχετικά κοντά στις ονομαστικές τους τιμές.

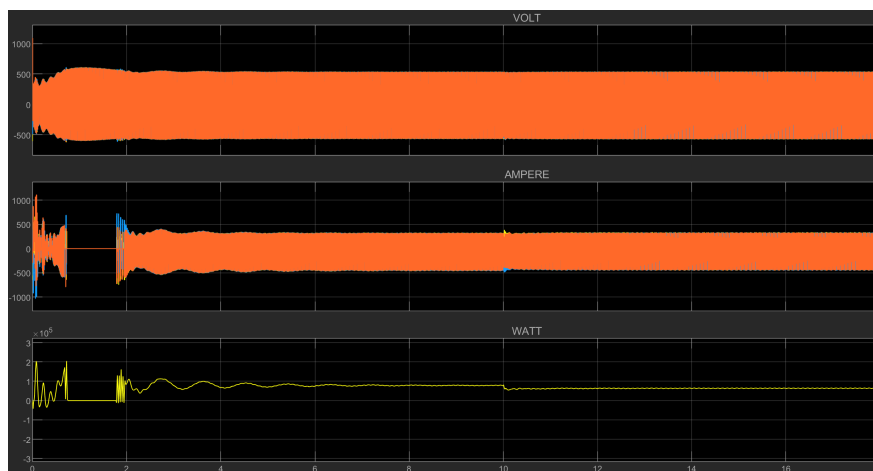


Εικόνα 7.20: Αποδιδόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ του σεναρίου A2.

Η αλλαγή της ζήτησης τα αφήνει ανεπηρέαστα όπως και θα έπρεπε να είναι, καθώς την ίδια στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία δεν επιδέχεται αλλαγή. Δεν συμβαίνει όμως και το ίδιο στο διάγραμμα της μπαταρίας. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι την χρονική στιγμή που υπάρχει περίσσεια ενέργειας, η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στο σύστημα, ενώ αμέσως μετά από αυτό το μεταβατικό φαινόμενο η μπαταρία εκφορτίζεται προκειμένου να βοηθήσει στην κάλυψη των αναγκών.

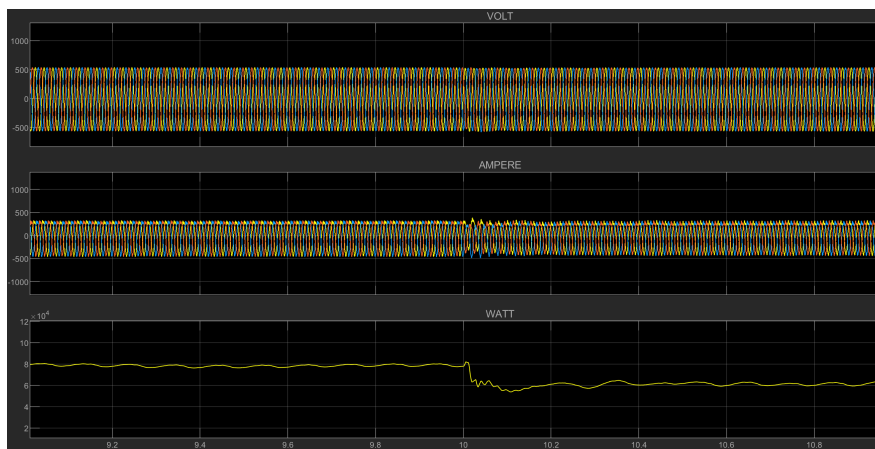


Εικόνα 7.21: Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του σεναρίου A2. Κατά την στιγμή της μεταβολής, παρατηρείται ότι η μπαταρία συνεχίζει να εκφορτίζεται, όμως ο ρυθμός εκφόρτισης της είναι αισθητά μειωμένος. Ουσιαστικά, πάλι τροφοδοτεί το σύστημα με ενέργεια αλλά αισθητά μικρότερη σε μέγεθος (φαίνεται από την αλλαγή της κλίσης του SoC (Εικόνα 7.21)).



Εικόνα 7.22: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του inverter του σεναρίου A2.

Η ισχύς του συστήματος μπαταρίας-φωτοβολταϊκών μεταφέρεται στο σύστημα μέσω του inverter (Εικόνα 7.22). Την χρονική περίοδο όπου η ισχύς του συνολικού συστήματος ξεπερνάει την ζητούμενη ισχύ, ο αντιστροφέας βγαίνει εκτός λειτουργίας. Από την άλλη, όλες τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές τροφοδοτεί το σύστημα με μια σταθερή ισχύ που προέρχεται από το σύστημα μπαταρίας-φωτοβολταϊκών. Αυτό που παρατηρήθηκε και που σχετίζεται και με τα προηγούμενα αποτελέσματα, τόσο στο διάγραμμα του State of Charge των μπαταριών (Εικόνα 7.21) όσο και στον υπολοίπων components, είναι η σχετική μείωση στην παράδοση της ισχύος μετά την χρονική στιγμή όπου συμβαίνει η μεταβολή στην ζήτηση. Αυτό γίνεται ακόμα πιο εμφανές με την βοήθεια του zoom (Εικόνα 7.23):



Εικόνα 7.23: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του inverter του σεναρίου A2 (zoom).



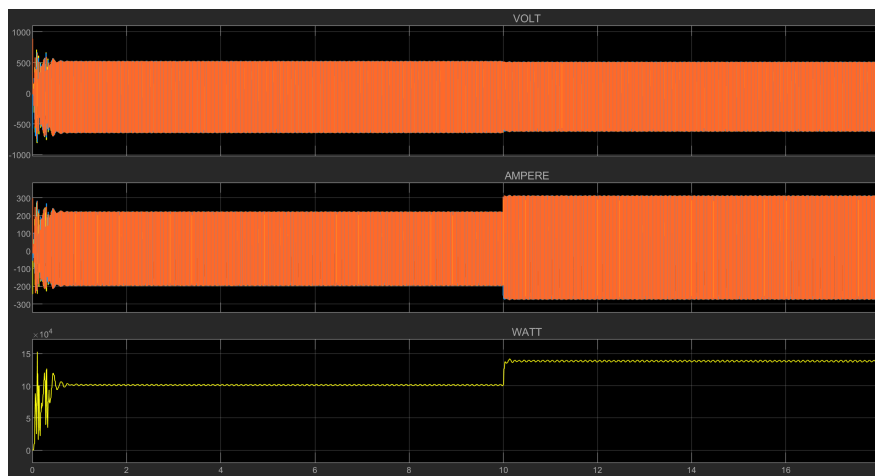
Εικόνα 7.24: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του rectifier του σεναρίου A2.

Ο ανορθωτής δουλεύει με αντίθετη λογική από τον αντιστροφέα. Όπως είναι αναμενόμενο, τις χρονικές στιγμές όπου λειτουργεί ο ένας ο άλλος είναι κλειστός αλλά και το ανάποδο.

Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο προηγούμενο διάγραμμα (Εικόνα 7.24), όπου η περισσευούμενη ισχύς που αποδίδει το σύστημα διοχετεύεται μέσω του ανορθωτή στο σύστημα αποθήκευσης. Επιπλέον, καθ' όλη την διάρκεια που το σύστημα της μπαταρίας εκφορτίζεται ο ανορθωτής παραμένει κλειστός αφήνοντας τον αντιστροφέα να μεταφέρει την απαιτούμενη ισχύ.

7.3 Σενάριο A3

Στο τρίτο κατά σειρά σενάριο λειτουργίας του συστήματος, εξετάστηκε η απότομη αύξηση του φορτίου (όπως δηλαδή και στο σενάριο A1) όταν η ντιζελογεννήτρια βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Για να το προσομοιωθεί αυτό, έχει θεωρηθεί αρχικό φορτίο προς κάλυψη τα 100 kW και στην συνέχεια μετάβαση στα 140 kW. Να σημειωθεί, ότι το αρχικό φορτίο καθώς και το προσαυξανόμενο είναι αισθητά μειωμένο ώστε το σύστημα να μην απαιτηθεί να φτάσει στα ενδεχόμενα όριά του. Η ισχύς εξόδου του συνολικού μικροδικτύου φαίνεται στην εικόνα 7.25:

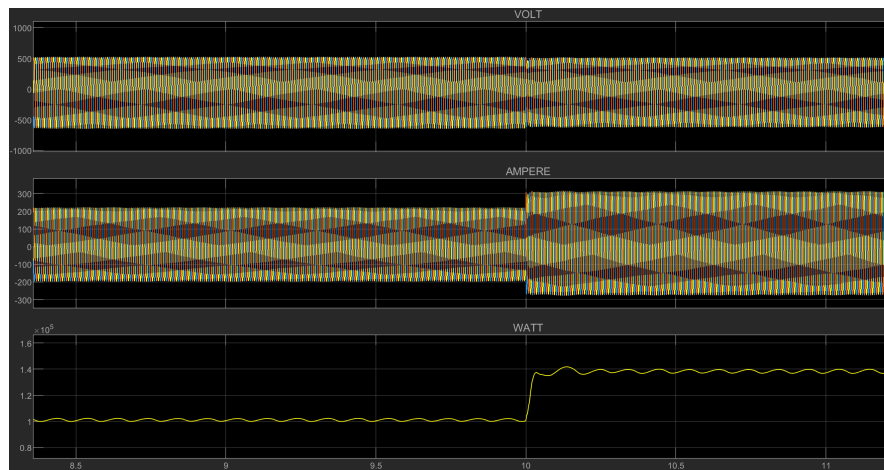


Εικόνα 7.25: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς στο φορτίο του σεναρίου A3.

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, παρατηρούνται και εδώ κάποια μεταβατικά φαινόμενα τα οποία όμως αυτή την φορά επιλύονται με αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, μιας και η ύπαρξη ενός λιγότερου component είναι σαφές ότι απλοποιεί το σύστημα σε αρκετά μεγάλο βαθμό, με συνέπεια ενδεχόμενες αλλαγές-μεταβολές που συμβαίνουν σε αυτό να διεκπεραιώνονται με ακόμη μεγαλύτερη ευκολία και ταχύτητα.

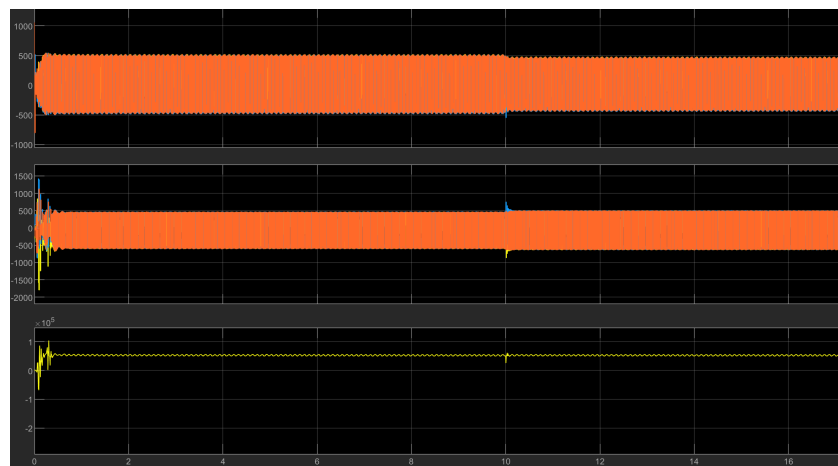
Αξίζει να σημειωθεί, ότι ακόμα και η μικρή σχετικά κυμάτωση που υπήρχε στα προηγούμενα σενάρια εδώ φαίνεται να είναι σχεδόν ανύπαρκτη.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.26) παρατηρείται ότι ακόμη και η μετάβαση από το μικρότερο ζητούμενο φορτίο στο μεγαλύτερο είναι σχετικά ποιο ομαλή και ταχύτατη, ενώ ταυτόχρονα η τάση διατηρείται σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της αλλαγής.



Εικόνα 7.26: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς στο φορτίο του σεναρίου A3 (zoom).

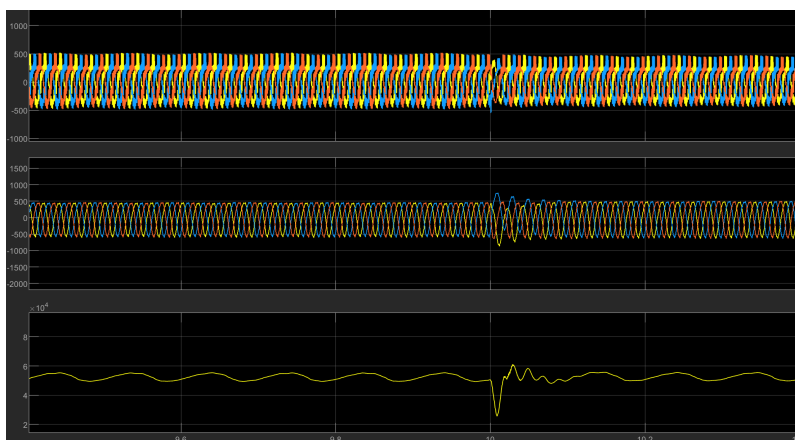
Αρκετά κοντά σε αυτά τα αποτελέσματα βρίσκονται και τα διαγράμματα του υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας (Εικόνα 7.27). Κατά αντιστοιχία με τα διαγράμματα της συνολικής αποδιδόμενης ισχύς, και εδώ το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο είναι αισθητά μικρότερο και κατά πλάτος αλλά και σε χρονική διάρκεια.



Εικόνα 7.27: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας του σεναρίου A3.

Και πάλι με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.28) παρατηρείται ότι η αύξηση της

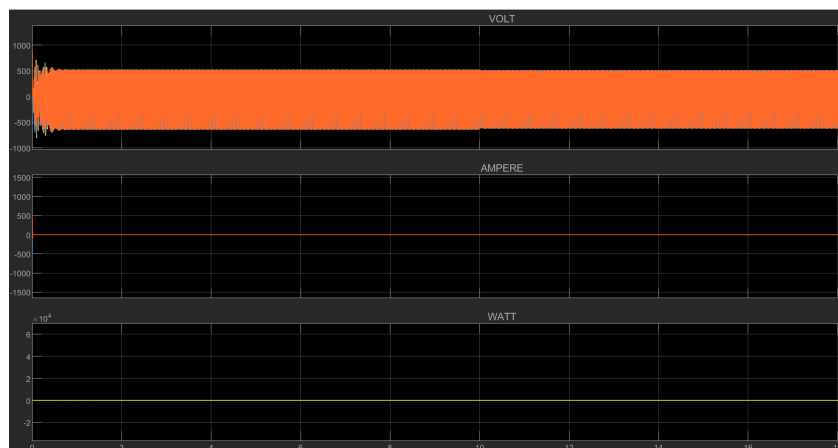
ζήτησης έχει δημιουργήσει ένα μεταβατικό φαινόμενο πολύ μικρότερης όμως διάρκειας έναντι των δυο προηγούμενων σεναρίων.



Εικόνα 7.28: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας του σεναρίου A3 (zoom).

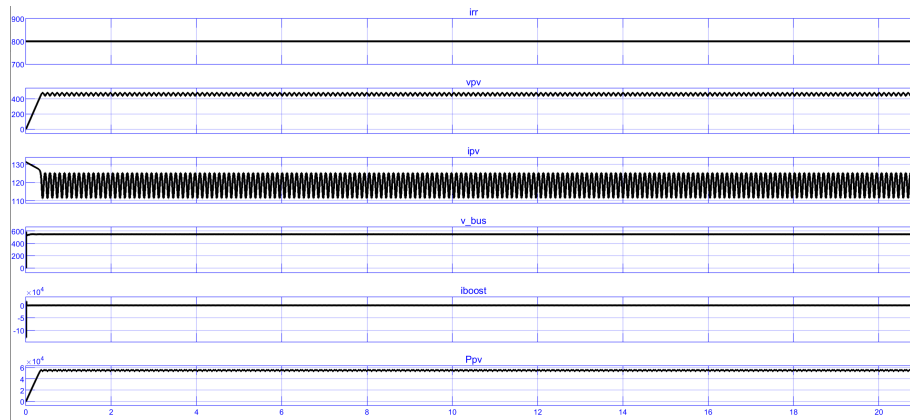
Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, είναι η σχετική μείωση στο πλάτος της τάσης που οφείλεται στην χρήση των διάφορων φίλτρων και μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται προκειμένου το σύστημα να είναι όσο το δυνατόν πιο ευσταθές. Αυτό όμως δεν επηρεάζει όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως στην συνολική μεταφερόμενη ισχύ του μικροδικτύου, καθώς η τάση τελικώς στηρίζεται και από το σύστημα φωτοβολταϊκών-μπαταρίας.

Προφανώς, η παραγόμενη ισχύ που προέρχεται από την μηχανή ντίτζελ θα είναι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης σταθερή και ίση με μηδέν.



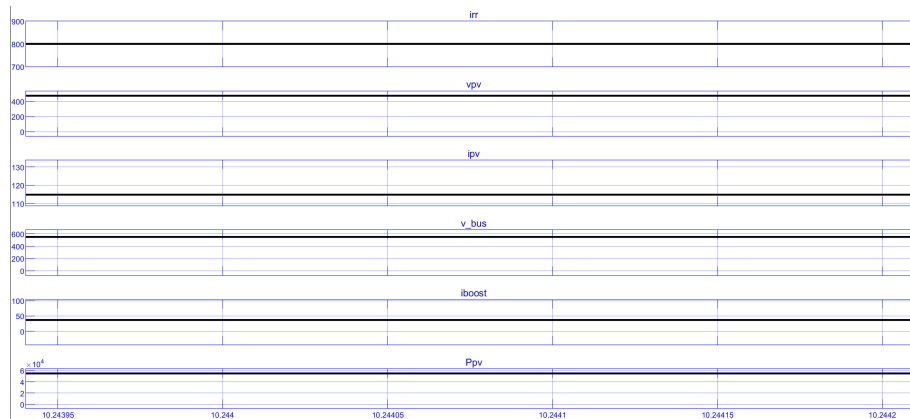
Εικόνα 7.29: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας του σεναρίου A3.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί όμοια με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι η αποδιδόμενη ισχύς του θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από οποιαδήποτε μεταβολή που δεν σχετίζεται με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 7.30: Συνολική παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου A3.

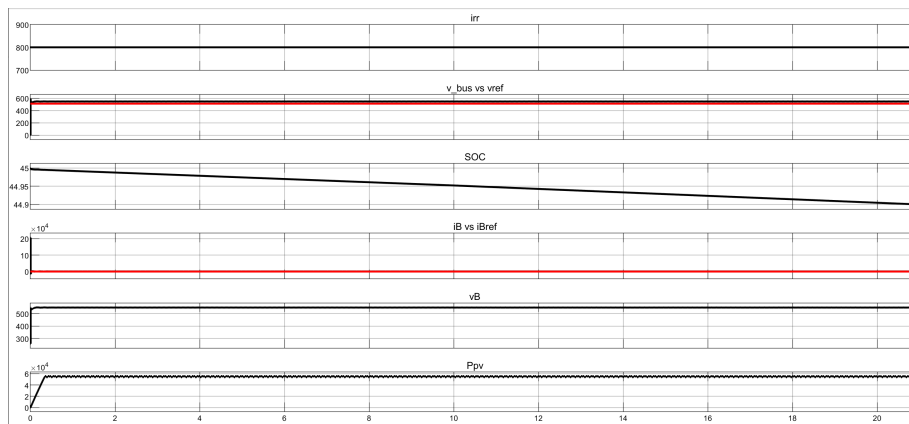
Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.31) παρατηρούμε και την ακριβή τιμή του iboost, δηλαδή του ρεύματος μετά τον DC-DC converter.



Εικόνα 7.31: Συνολική παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου A3 (zoom)

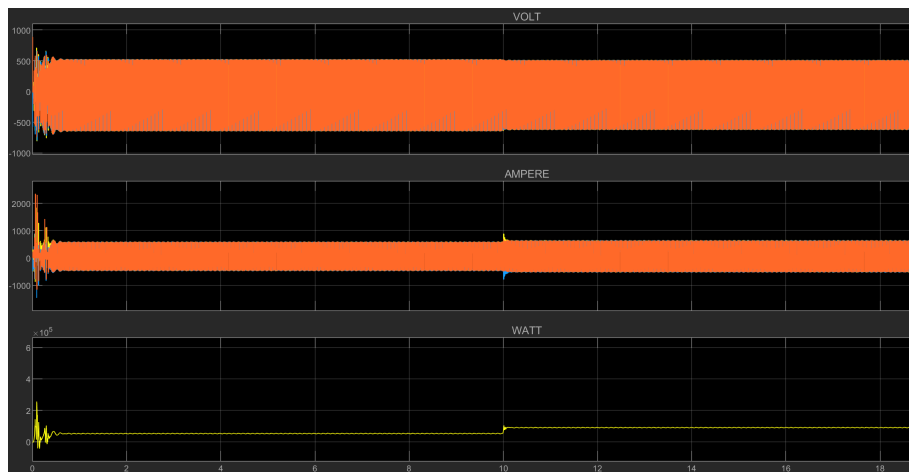
Είναι λογικό ότι καθώς η μηχανή ντίζελ βρίσκεται εκτός λειτουργίας, η κάλυψη της απαιτούμενης ισχύος θα πρέπει να προέλθει σε μεγαλύτερο βαθμό από τα υπόλοιπα υποσυστήματα.

Αυτό ακριβώς γίνεται και στην περίπτωση της μπαταρίας, όπου σε αυτό το σενάριο η κλίση με την οποία δείχνει ότι εκφορτίζεται είναι αισθητά πιο απότομη, άρα το SoC μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό και η μπαταρία εκφορτίζεται γρηγορότερα.



Εικόνα 7.32: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας του σεναρίου A3

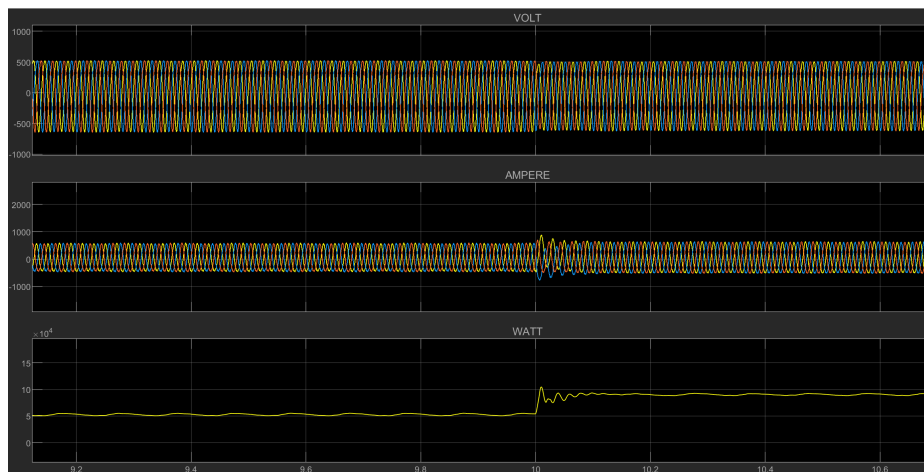
Η ισχύς που μεταφέρεται μέσω του αντιστροφέα στο συνολικό μας φορτίο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 7.33):



Εικόνα 7.33: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου A3

Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα αυτού του σεναρίου, το μεταβατικό φαινόμενο που προκύπτει αρχικά είναι σαφώς μικρότερο και επιλύεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Κατά την στιγμή της αλλαγής του φορτίου ζήτησης, παρατηρείται ότι η μετάβαση στην νέα αποδιδόμενη ισχύ είναι πολύ ομαλή και σύντομη. Η τάση μένει σταθερή, ενώ το ρεύμα ελαφρώς αυξάνεται. Το πιο σημαντικό όμως, είναι το γεγονός ότι σχεδόν όλο το ποσό της νέας ζήτησης καλύπτεται από το σύστημα μπαταρία-αντιστροφέας.

Αυτό γίνεται ακόμα πιο εμφανές με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.34) παρακάτω:



Εικόνα 7.34: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου A3 (zoom).

Όπως είναι αναμενόμενο, ο ανορθωτής (Εικόνα 7.35) δεν παίζει και πολύ ιδιαίτερο ρόλο σε αυτό το σενάριο, παρά μόνο στις αρχικές συνθήκες όπου ακόμα το σύστημα δεν είναι σταθερό και απαιτείται ροή ενέργειας προς την μπαταρία.

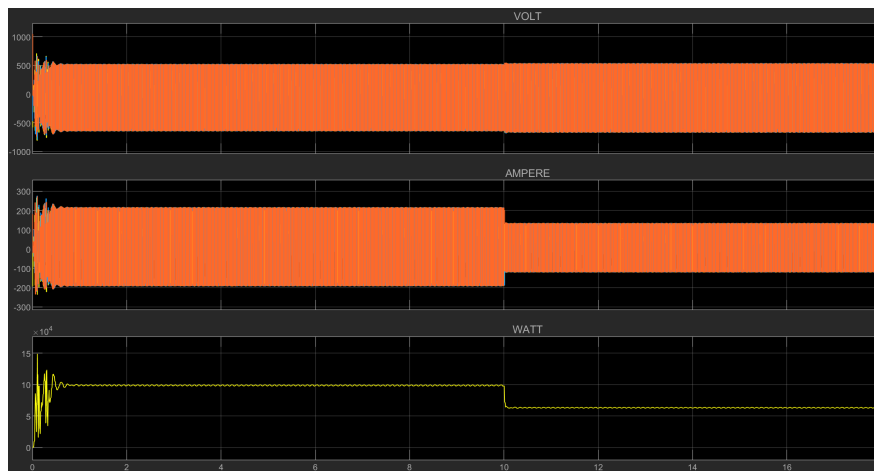


Εικόνα 7.35: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του ανορθωτή του σεναρίου A3 (zoom).

7.4 Σενάριο A4

Σε αυτό το σενάριο συνδυάστηκε η μείωση του φορτίου ζήτησης καθώς και το γεγονός ότι η μηχανή ντίζελ θα έπρεπε να παραμείνει κλειστή. Πρόκειται ουσιαστικά για την συνέχεια του προηγούμενου σεναρίου, με την διαφορά ότι το απαραίτητο φορτίο προς κάλυψη θα καθοριζόταν από τα αρχικά 100 kW στα μόλις 60 kW.

Το διάγραμμα της κάλυψης της ζήτησης του συγκεκριμένου σεναρίου είναι αυτό που ακολουθεί (Εικόνα 7.36):



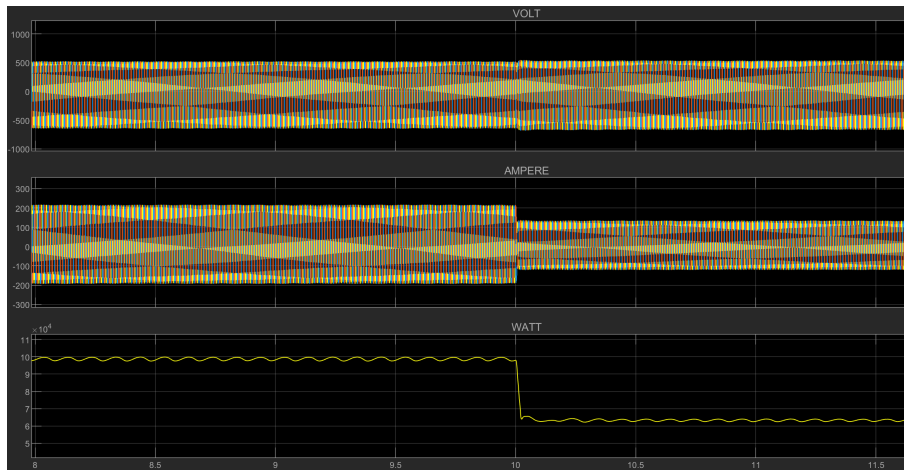
Εικόνα 7.36: Συνολική προσφερόμενη ισχύς του σεναρίου A4.

Με την ίδια λογική όπως και στο προηγούμενο σενάριο, παρατηρείται ότι και πάλι το μεταβατικό φαινόμενο που συμβαίνει στην αρχή είναι αισθητά μικρότερης διάρκειας και μεγέθους πλάτους. Το σύστημα και σε αυτό το σενάριο καταφέρνει να διατηρήσει μια ισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης, και αυτό φαίνεται την χρονική στιγμή 10 sec όπου εκεί συμβαίνει η μείωση του φορτίου.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, η απουσία της μηχανής ντίζελ καθιστά το σύστημα πιο εύκολα ελέγξιμο και πιο ευέλικτο, με αποτέλεσμα η μεταβολή να ολοκληρώνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

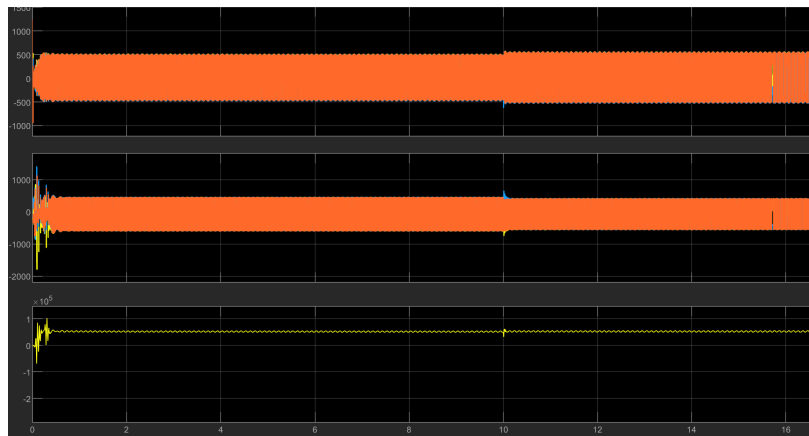
Όμοια με τα προηγούμενα σενάρια, η τάση καθ' όλη την διάρκεια των φαινομένων διατηρείται σταθερή και το ρεύμα μεταβάλλεται κατά αντιστοιχία.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.37) επιβεβαιώνεται αυτό που σχολιάστηκε νωρίτερα, δηλαδή την γρήγορη μετάβαση από μια κατάσταση σε μια άλλη, όπως και επιπλέον την μείωση των διάφορων κυματώσεων κατά αναλογία με το προηγούμενο σενάριο.



Εικόνα 7.37: Συνολική προσφερόμενη ισχύς του σεναρίου A4 (zoom)

Η ανεμογεννήτρια σε αυτό το σενάριο δουλεύει με την ίδια λογική όπως και πριν (Εικόνα 7.38):

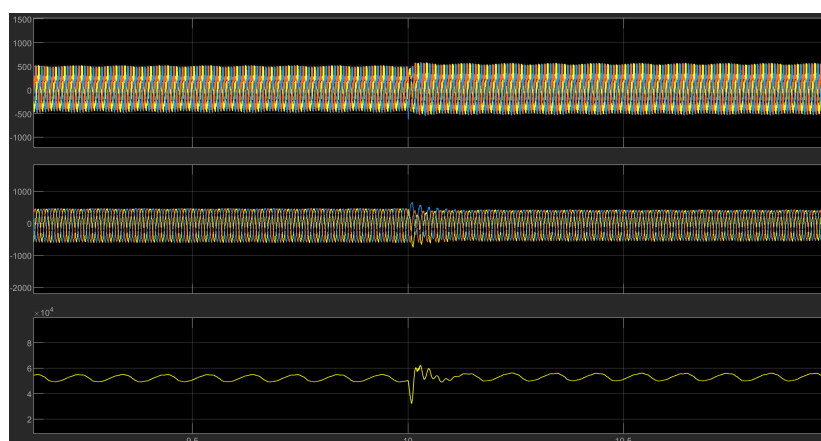


Εικόνα 7.38: Προσφερόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας του σεναρίου A4.

Παρά το σύντομο μεταβατικό φαινόμενο στην αρχή, κατά την διάρκεια της αλλαγής παραμένει σε απολύτως λογικά πλαίσια. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο όπου εκεί το πλάτος της τάσης ελαφρώς μειωνόταν, εδώ παρατηρείται μια μικρή αύξηση. Σε αυτήν την περίπτωση, η ανεμογεννήτρια είναι που ουσιαστικά προσπαθεί να στηρίξει την τάση και για αυτό τον λόγο παρατηρείται αυτό το φαινόμενο. Σε κάθε περίπτωση, το τελικό αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό όπως άλλωστε φάνηκε και από τα προηγούμενα διαγράμματα.

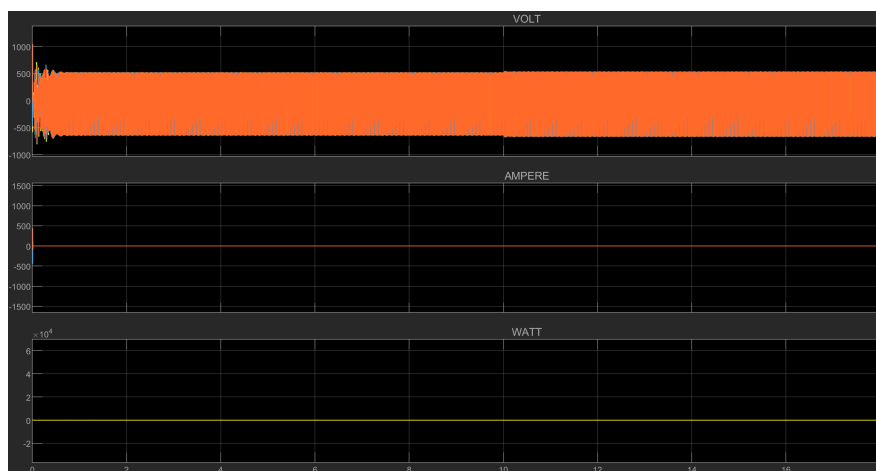
Με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.39) παρατηρείται καλύτερα η μετάβαση στην

νέα ζητούμενη ισχύ. Να σημειωθεί ότι λίγο μετά την στιγμή της αλλαγής του φορτίου ζήτησης, φαίνεται η παραγωγή από την ανεμογεννήτρια να αυξάνεται ελαφρώς, κάτι που όμως καθώς περνάει ο χρόνος τελικά καταλήγει στις προηγούμενες τιμές της.



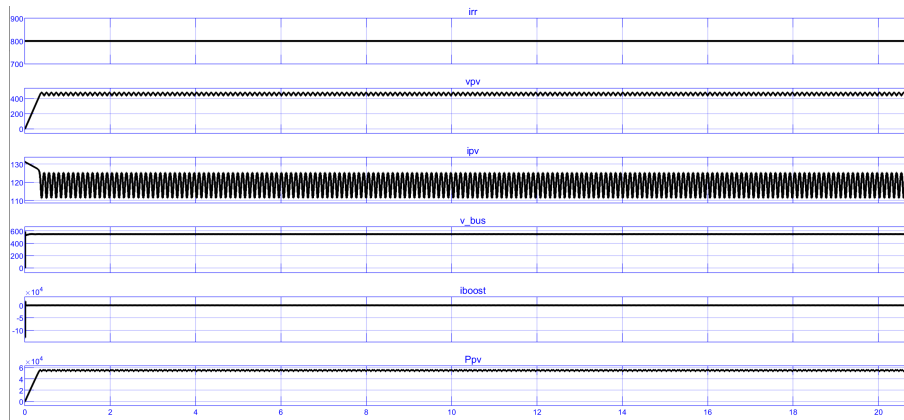
Εικόνα 7.39: Προσφερόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας του σεναρίου A4 zoom.

Η μηχανή ντίζελ όπως και στο προηγούμενο σενάριο είναι ανενεργή, επομένως η συνολική ισχύ που προσφέρεται από αυτήν θα είναι συνεχώς μηδέν.



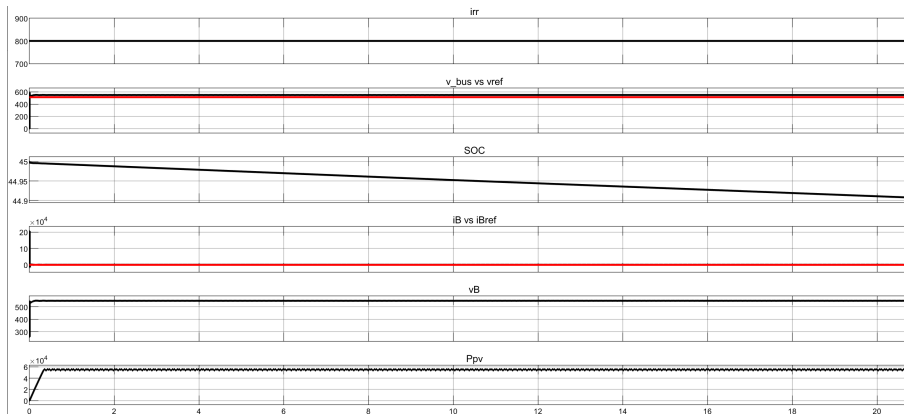
Εικόνα 7.40: Προσφερόμενη ισχύς μηχανής ντίζελ του σεναρίου A4.

Και σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα των φωτοβολταϊκών θα λειτουργεί ανεξάρτητα, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία μένει ανεπηρέαστη (όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις) (Εικόνα 7.41).



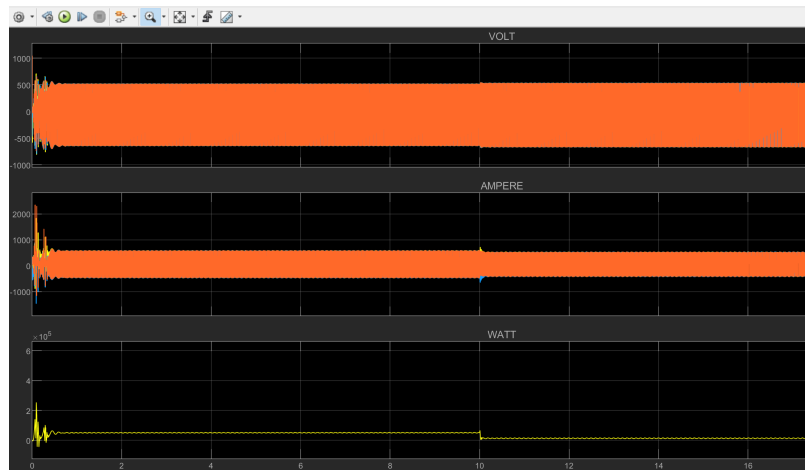
Εικόνα 7.41: Προσφερόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου A4.

Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο όπου η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μας έδειχνε ότι εκφορτίζεται γρηγορότερα μετά την αλλαγή του φορτίου, εδώ υπάρχει η αντίθετη λογική, μιας και το φορτίο αντί να αυξάνεται θα μειώνεται. Κατ' επέκταση, η συνολική ισχύς που θα πρέπει να αποδώσει το σύστημα μειώνεται με συνέπεια η εκφόρτιση της μπαταρίας να καθυστερεί να συμβεί (Εικόνα 7.42).



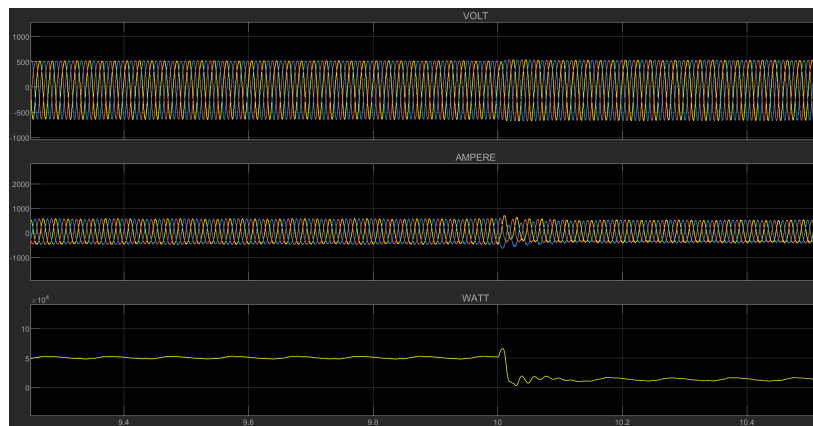
Εικόνα 7.42: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας του σεναρίου A4.

Σε πλήρη συμφωνία με το προηγούμενο διάγραμμα έρχεται και το διάγραμμα του αντιστροφέα, στο οποίο παρατηρείται ότι μετά την χρονική στιγμή 10 δευτερολέπτων η αποδιδόμενη ισχύς στο σύστημα ελαττώνεται αισθητά (Εικόνα 7.43).



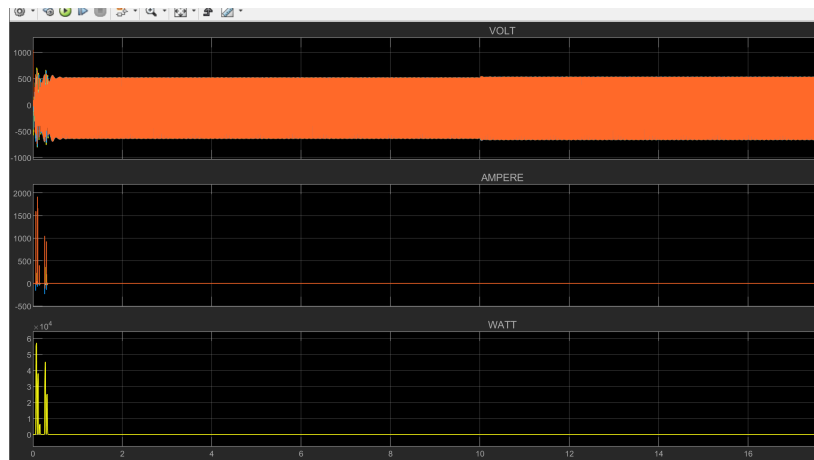
Εικόνα 7.43: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου A4.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.44) παρατηρείται ότι η απαιτούμενη μείωση που επιθυμούμε, δηλαδή τα 40 kW, « χάνονται » από την αντίστοιχη μείωση μεταφοράς ισχύος του inverter:



Εικόνα 7.44: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου A4 (zoom).

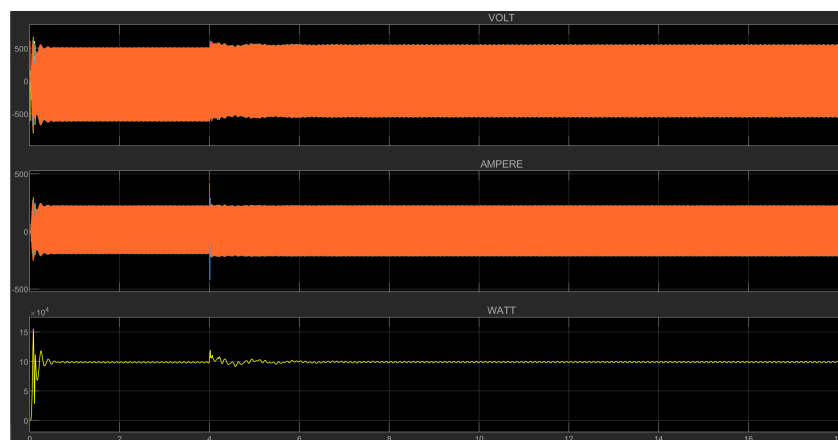
Και σε αυτό το σενάριο, όπως είναι αναμενόμενο ο ανορθωτής (Εικόνα 7.45) δεν παίζει κάποιο ιδιαίτερο ρόλο παρά μόνο στην αρχή λειτουργίας του συστήματος. Αυτό είναι εύκολα κατανοητό, καθώς ο αντιστροφέας λειτουργεί καθ' όλη την διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος και την ίδια στιγμή δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη λειτουργία των δυο components.



Εικόνα 7.45: Μεταφορά ισχύος μέσω του ανορθωτή του σεναρίου A4.

7.5 Σενάριο A5

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η λειτουργία του μικροδικτύου με αρχικά απενεργοποιημένη την μηχανή ντίζελ, και στην συνέχεια υπό το ίδιο σταθερό φορτίο, ενεργοποιείται. Το φορτίο ήταν σταθερό στα 100 kW και την χρονική στιγμή 4 sec ενεργοποιείται η γεννήτρια με σκοπό να καταγραφούν τα μεταβατικά φαινόμενα που δημιουργούνται εξαιτίας αυτής. Όπως είναι γνωστό, η εκκίνηση μιας μηχανής ντίζελ εν μέσω αυτών των συνθηκών του μικροδικτύου μας θα μπορούσε να είχε πολλές καταστροφικές επιπτώσεις. Παρ όλα αυτά, όπως θα φανεί και από τα διαγράμματα που ακολουθούν, το σύστημα κατάφερε και προσαρμόστηκε γρήγορα. Το συνολικό φορτίο που παρήγαγε το μικροδίκτυο ήταν το ακόλουθο (Εικόνα 7.46):

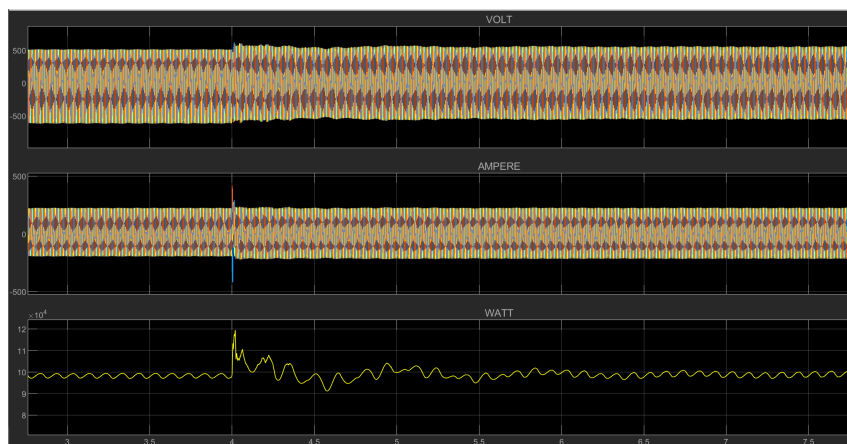


Εικόνα 7.46: Συνολική αποδιδόμενη ισχύς μικροδικτύου σεναρίου A5.

Παρατηρείται, ότι το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο είναι αισθητά μειωμένης διάρκειας, πράγμα που οφείλεται στην έλλειψη ύπαρξης της ντιζελογεννήτριας, όπως έχει ήδη φανεί και από τα δύο προηγούμενα σενάρια. Μετά το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο, το σύστημα καταφέρνει και επιτυγχάνει την ζητούμενη κάλυψη φορτίου ίσου με 100 kW.

Την χρονική στιγμή 4 sec η μηχανή ντίζελ μπαίνει σε λειτουργία, με αποτέλεσμα να υπάρξουν κάποιες μεταβολές στην παραδιδόμενη ισχύ, χωρίς όμως να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό το σύστημά μας, καθώς σε λιγότερο από 2 δευτερόλεπτα το μικροδίκτυο επιστρέφει στην κανονική και σωστή του λειτουργία.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.47) παρατηρείται καλύτερα τις μεταβολές που υφίσταται το σύστημά μας καθώς και την ευκολία που τις αντιμετωπίζει:

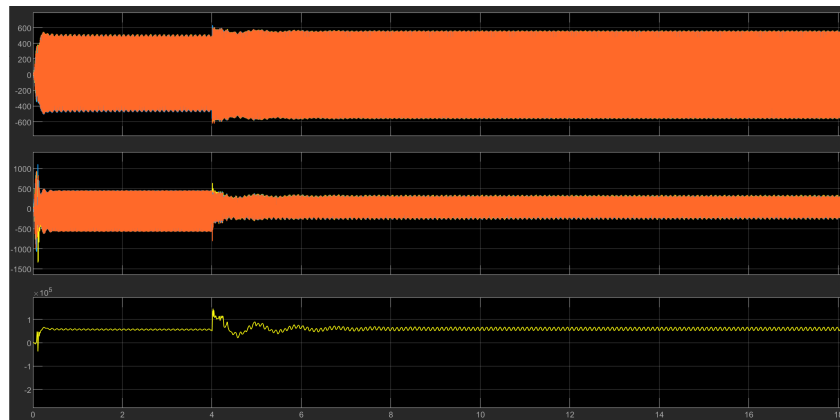


Εικόνα 7.47: Συνολική αποδιδόμενη ισχύς μικροδικτύου σεναρίου A5 (zoom).

Η ραγδαία αύξηση της ισχύος την χρονική στιγμή 4 sec είναι αποτέλεσμα των υψηλών ρευμάτων εκκίνησης της μηχανής, και όπως θα φανεί στην συνέχεια, μέσω της διάταξης του ανορθωτή, η περίσσεια αυτή ισχύς μεταφέρεται στο σύστημα αποθήκευσης ελαττώνοντας έτσι τις επιδράσεις που ενδεχομένως θα είχαν.

Οι επιδράσεις της εκκίνησης της ντιζελογεννήτριας είναι εμφανείς σε όλα τα components. Ξεκινώντας από την ανεμογεννήτρια (Εικόνα 7.48), αυτό που παρατηρείται είναι και εδώ μια μεγάλη αύξηση της παραγόμενης ισχύος, προκειμένου να καλύψει (έστω και για απειροελάχιστο χρονικό διάστημα) τις ανάγκες εκκίνησης της γεννήτριας.

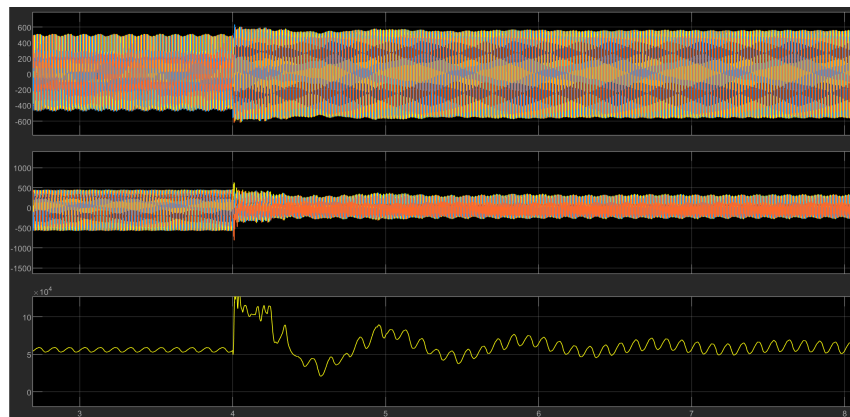
Αυτό που έχει ενδιαφέρον σε αυτό το διάγραμμα (που ακολουθεί), είναι το γεγονός ότι έστω και στιγμιαία η αποδιδόμενη ισχύς ξεπερνάει τις ονομαστικές τιμές της ανεμογεννήτριας, που οφείλεται όμως στους λόγους που είχαν προαναφερθεί σχετικά με τον καθορισμό των ορίων και την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων από την Simulink.



Εικόνα 7.48: Αποδιδόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας σεναρίου A5.

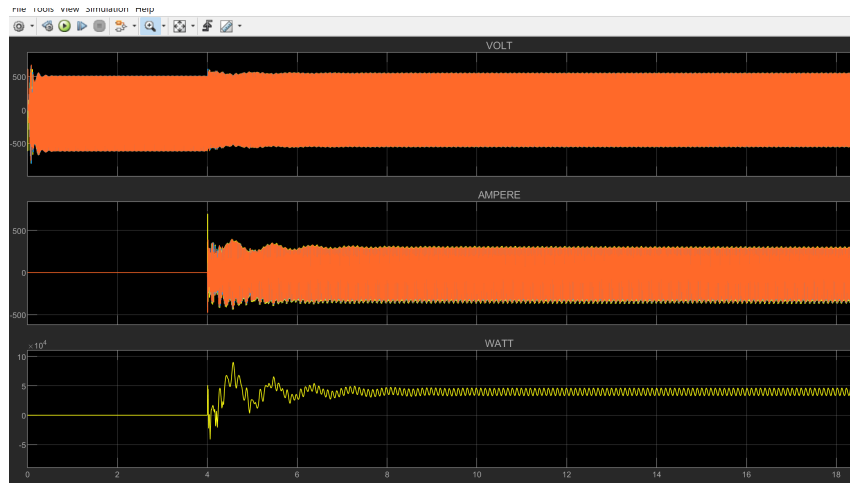
Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι σε αυτό το διάγραμμα, μετά την εκκίνηση της ντιζελογεννήτριας η τάση αυξάνεται, ενώ παράλληλα το ρεύμα μειώνεται. Αυτό είναι αποτέλεσμα και πάλι των διαφορετικών παθητικών φίλτρων και μετασχηματιστών που χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου η εισαγωγή της γεννήτριας να είναι όσο το δυνατόν πιο ανεπαίσθητη στο συνολικό δίκτυο.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.49) παρατηρείται καλύτερα η μέγιστη τιμή της ισχύος που αποδίδει η ανεμογεννήτρια, όπως επίσης και τις κυματώσεις και μεταβολές που υφίσταται μέχρις ότου αποκατασταθεί η κανονικότητα στο σύστημα.



Εικόνα 7.49: Αποδιδόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας σεναρίου A5 (zoom).

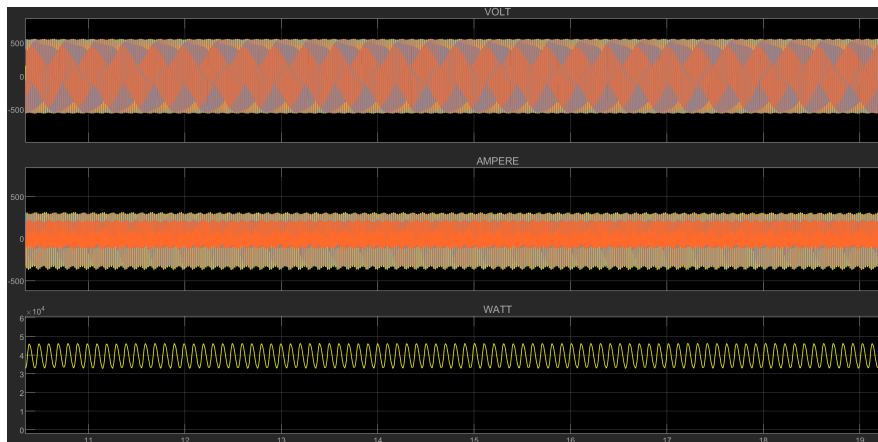
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει σε αυτό το σενάριο το διάγραμμα της ντιζελογεννήτριας, η οποία είναι και αυτή που προκαλεί όλες τις μεταβολές (Εικόνα 7.50).



Εικόνα 7.50: Αποδιδόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου A5.

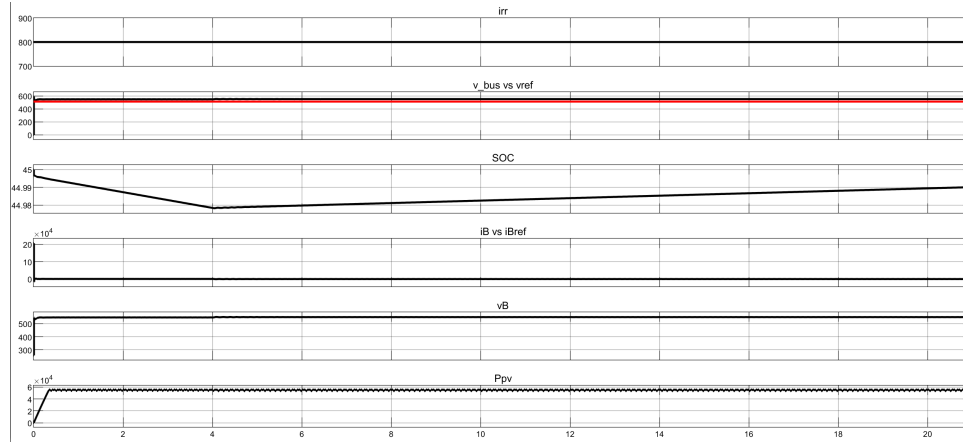
Κατά την εκκίνήσή της, παρατηρείται μεγάλη κατανάλωση ρεύματος άρα και συνεπώς αρχικής ισχύος. Αυτήν την ισχύ προσπαθεί στιγμιαία να καλύψει η ανεμογεννήτρια. Παρ όλα αυτά όμως, ύστερα από ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο διάρκειας μόλις 3 δευτερολέπτων η γεννήτρια τίθεται σε λειτουργία και είναι σε θέση να τροφοδοτήσει το σύστημα με αδιάλειπτη ισχύ. Οι οποιεσδήποτε μεταβολές στην τάση και το ρεύμα επιλύονται επίσης μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.51) παρατηρείται καλύτερα η μικρο-ταλάντωση γύρω από την ισχύ παραγωγής της ντιζελογεννήτριας, που κατά μέσο όρο είναι στα 40 kW.



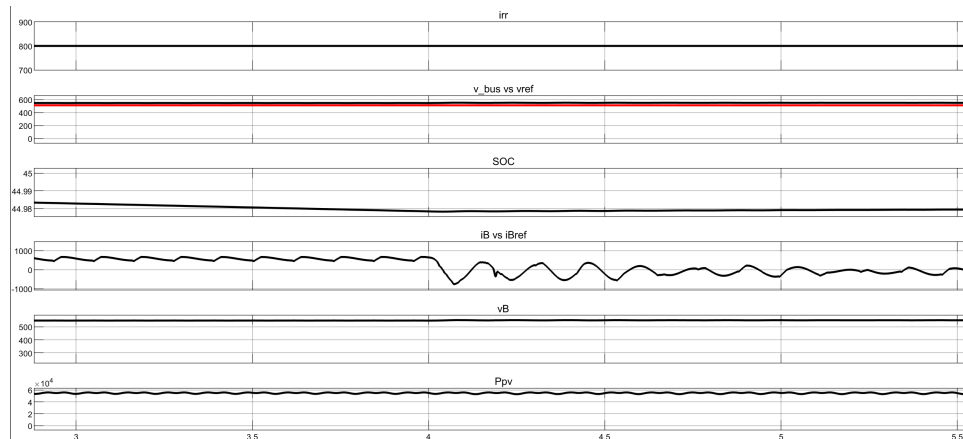
Εικόνα 7.51: Αποδιδόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου A5 (zoom).

Αυτό που έχει πολύ ενδιαφέρον είναι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (Εικόνα 7.52). Όπως είναι αναμενόμενο, με την εισαγωγή ενός νέου component όπως είναι η ντιζελογεννήτρια, το φορτίο που θα πρέπει να καλύψει το υποσύστημα μπαταρίας-φωτοβολταϊκών μειώνεται αισθητά, καθώς η εισαγωγή της ντιζελογεννήτριας καλύπτει πλέον ένα μέρος αυτού του ποσού.



Εικόνα 7.52: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας σεναρίου A5.

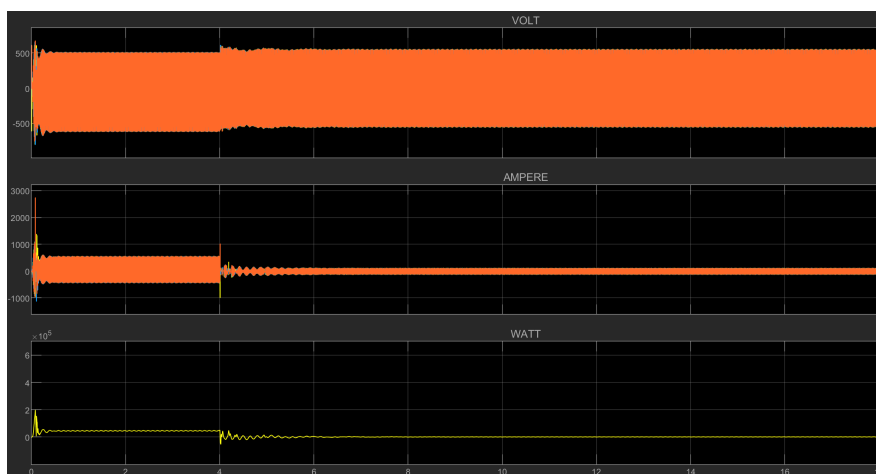
Αυτό που παρατηρείται είναι ακριβώς αυτό που αναμένεται. Την χρονική στιγμή της εισαγωγής της νέας μονάδας παραγωγής, το σύστημα της μπαταρίας-φωτοβολταϊκών επί της ουσίας εξοικονομεί το ποσό της ενέργειας που παράγει η νέα μονάδα. Αυτό πολύ χονδρικά σημαίνει ότι η μπαταρία φορτίζεται, όπως άλλωστε αποδεικνύει και η ανοδική κλίση του State of Charge.



Εικόνα 7.53: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας σεναρίου A5 (zoom).

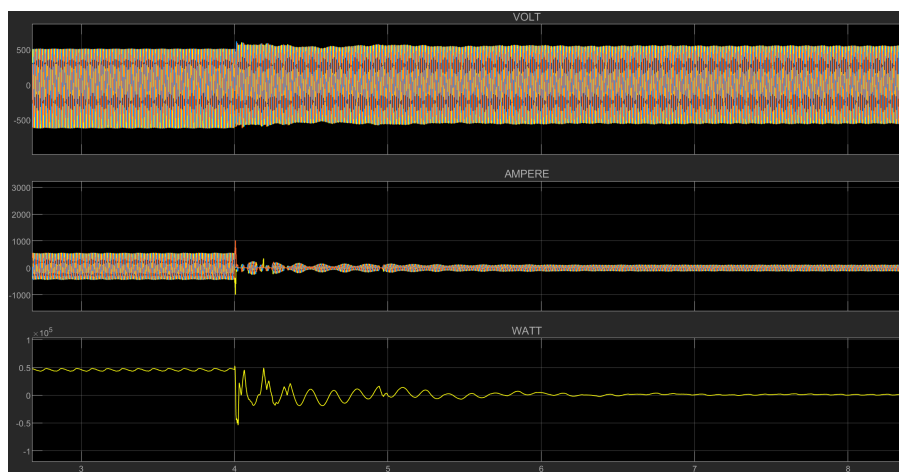
Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.53) παρατηρούμε ότι το ρεύμα που δίνει η μπαταρία μειώνεται ως συνέπεια αυτής της εξοικονόμησης που κάνει.

Αυτή η μείωση της μεταφερόμενης ισχύος δεν θα μπορούσε να μην είναι εμφανής και στην ισχύ που μεταφέρει ο αντιστροφάς (Εικόνα 7.54).



Εικόνα 7.54: Μεταφερόμενη ισχύς inverter σεναρίου A5.

Πράγματι, μετά την χρονική στιγμή όπου έχει επιτευχθεί η σύζευξη της ντιζελογεννήτριας με το μικροδίκτυο, η μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα είναι αισθητά μικρότερη.

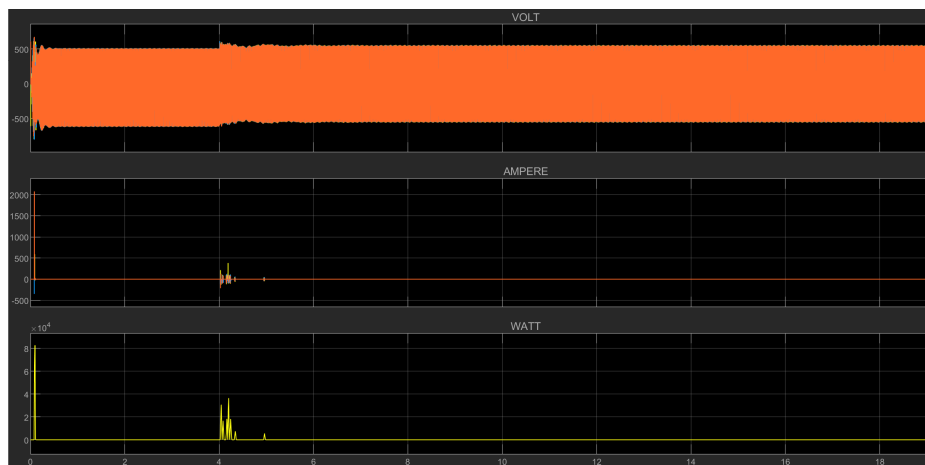


Εικόνα 7.54: Μεταφερόμενη ισχύς inverter σεναρίου A5 (zoom).

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.54) φαίνεται ότι σχεδόν όλη η ισχύς που αρχικά μετέφερε ο αντιστροφέας καλύπτεται πλέον από την ντιζελογεννήτρια, με αποτέλεσμα να βγαίνει σχεδόν εκτός λειτουργίας.

Η χρήση του ανορθωτή (Εικόνα 7.55) περιορίζεται και σε αυτό το σενάριο στις δύο μόνο περιπτώσεις όπου κρίνεται απαραίτητο, δηλαδή στο αρχικό μεταβατικό φαινόμενο αλλά και για ένα σύντομο χρονικό διάστημα αμέσως μετά την είσοδο της ντιζελογεννήτριας στο μικροδίκτυο.

Και πάλι όμως η ύπαρξή του είναι απαραίτητη, καθώς καταφέρνει και μεταφέρει σημαντικά ποσά ενέργειας πίσω στο σύστημα αποθήκευσης, συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο και στην εξομάλυνση της ανατάραξης.



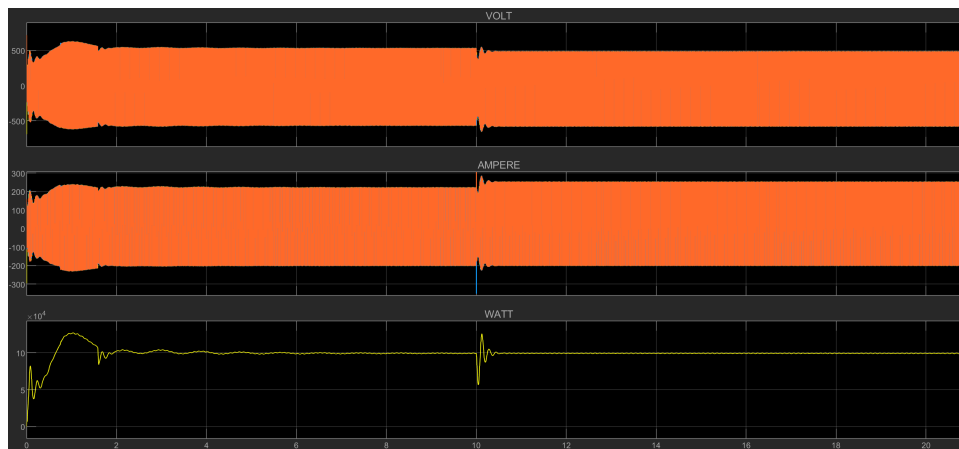
Εικόνα 7.55: Μεταφερόμενη ισχύς rectifier σεναρίου A5.

7.6 Σενάριο A6

Σε αυτό το σενάριο εξετάστηκε η απόκριση του μικροδικτύου με αρχικά ενεργοποιημένη την ντιζελογεννήτρια, και υπό σταθερό φορτίο την απότομη αποδέσμευσή της από αυτό. Πρόκειται για ένα ενδιαφέρον σενάριο, καθώς μπορεί να προσομοιώσει τον τρόπο με τον οποίο θα ανταποκριθεί το σύστημα σε κάποια περίπτωση βλάβης μιας συμβατικής μονάδας.

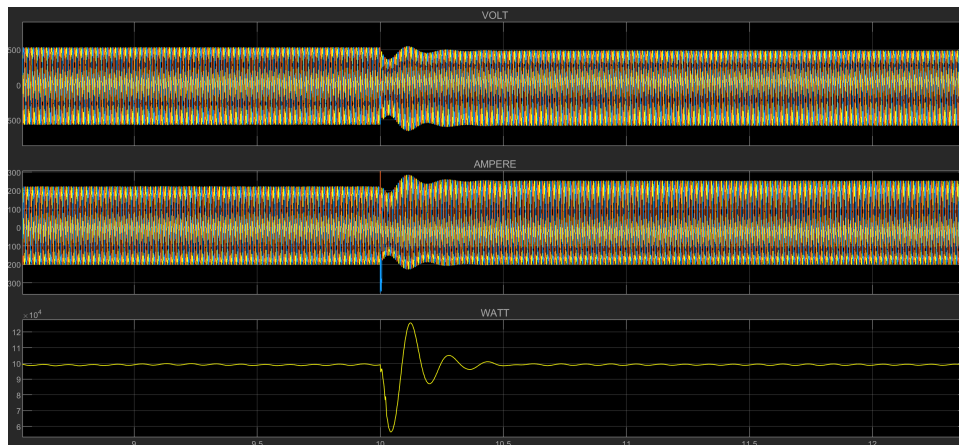
Με την ίδια λογική όπως και στο προηγούμενο σενάριο, υπό σταθερό φορτίο 100 kW ξεκίνησε η λειτουργία του μικροδικτύου αρχικά, και την χρονική στιγμή 10 sec αποδεσμεύτηκε ακαριαία η γεννήτρια ντίτζελ.

Τα αποτελέσματα που αφορούν την μεταφορά ισχύος από το μικροδίκτυο προς το φορτίο είναι αυτά που ακολουθούν (Εικόνα 7.56):



Εικόνα 7.56: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου A6.

Αυτό που παρατηρείται εκ πρώτης όψεως είναι το γεγονός ότι το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο είναι αισθητά μεγαλύτερο έναντι της προηγούμενης περίπτωσης όπου η γεννήτρια ντίζελ ήταν αρχικά απενεργοποιημένη. Αυτό, έρχεται σε συμφωνία και με τα προηγούμενα σενάρια κατά τα οποία η γεννήτρια ήταν εξ αρχής ON. Σε δεύτερη φάση, η έξοδος της ντιζελογεννήτριας δεν φαίνεται να προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην ευστάθεια και στην σωστή λειτουργία του μικροδικτύου, καθώς το σύντομο μεταβατικό φαινόμενο που δημιουργείται αποσβένει σχετικά γρήγορα (σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο).



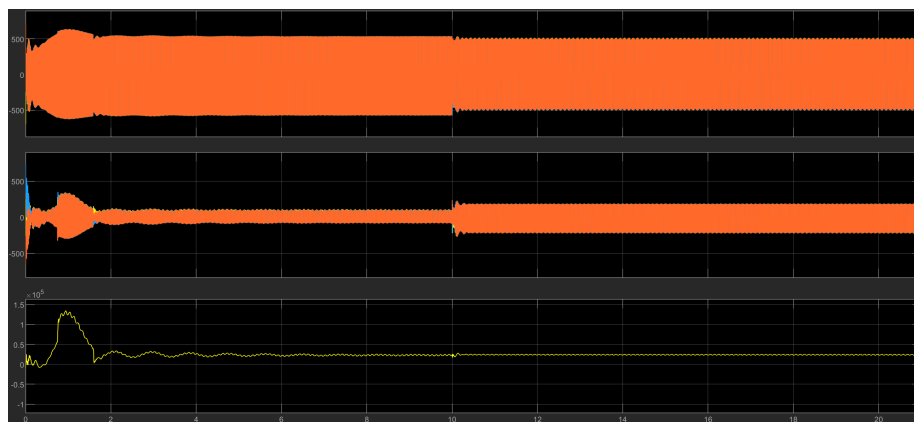
Εικόνα 7.57: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου A6 (zoom).

Και πριν την έξοδο της γεννήτριας αλλά και μετά, η συνολική μεταφερόμενη ισχύς προς το φορτίο είναι ικανοποιητική, ενώ οι μικροταλαντώσεις που παρατηρούνται

είναι αρκετά μικρότερες από προηγούμενα σενάρια.

Αυτό φαίνεται ακόμα καλύτερα και με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.57), όπως επίσης και το πόσο σύντομα αποσβένει η ανατάραξη.

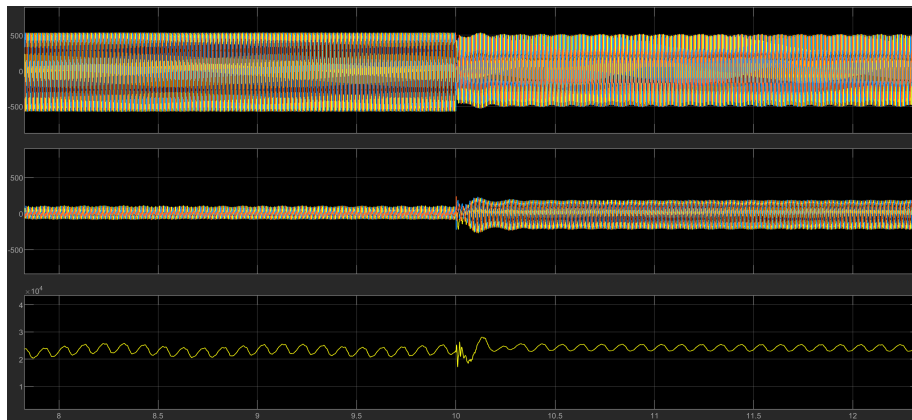
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια (Εικόνα 7.58). Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα η ύπαρξη ενός μεταβατικού φαινομένου είναι αναπόφευκτη, πόσο μάλλον όταν η ντιζελογεννήτρια είναι αρχικά ενεργοποιημένη. Και σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα καταφέρνει να έρθει σε μια σχετική ισορροπία μετά από ένα σύντομο διάστημα. Μετά την χρονική στιγμή όπου η γεννήτρια βγαίνει εκτός, η ανεμογεννήτρια εξακολουθεί να δίνει στο μικροδίκτυο το ίδιο ποσό της ισχύος, με την διαφορά όμως ότι πλέον η τάση και το ρεύμα είναι ελαφρώς αλλαγμένα κατά πλάτος. Αυτό δεν είναι η πρώτη φορά που συμβαίνει, και η αιτιολόγηση είναι η ίδια και σχετίζεται με τις αλλαγές που έχουν γίνει στα ενεργά φίλτρα και τους μετασχηματιστές προκειμένου η ανατάραξη που οφείλεται στην ντιζελογεννήτρια να μην επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό σύστημα.



Εικόνα 7.58: Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας σεναρίου A6.

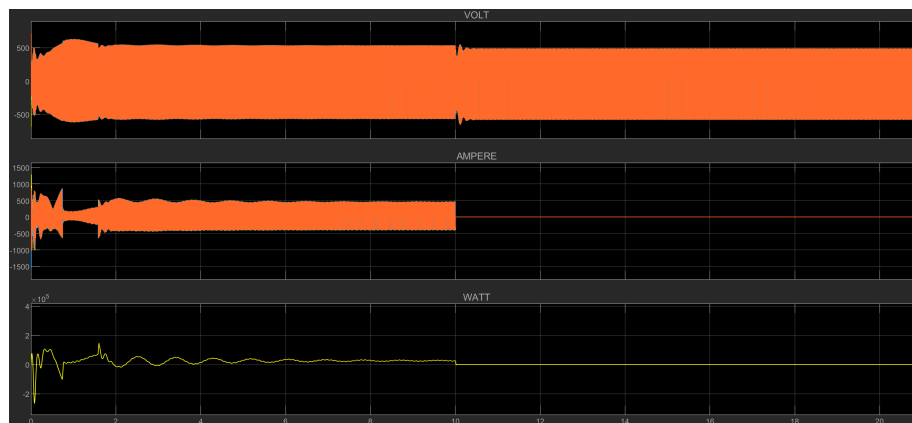
Με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.59) θα παρατηρηθεί ότι η κυμάτωση είναι σχετικά μειωμένη, η ανατάραξη επιλύεται αρκετά γρήγορα σε χρόνο λιγότερο από μισό δευτερόλεπτο, καθώς και ότι η συνολική αποδιδόμενη ισχύς ελαφρώς αυξάνεται.

Αυτό το φαινόμενο είχε ξανά παρατηρηθεί και σε προηγούμενο σενάριο, και ουσιαστικά μετά από σύντομο χρονικό διάστημα το σύστημα γυρίζει στις αρχικές τιμές του.



Εικόνα 7.59: Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας σεναρίου A6 (zoom).

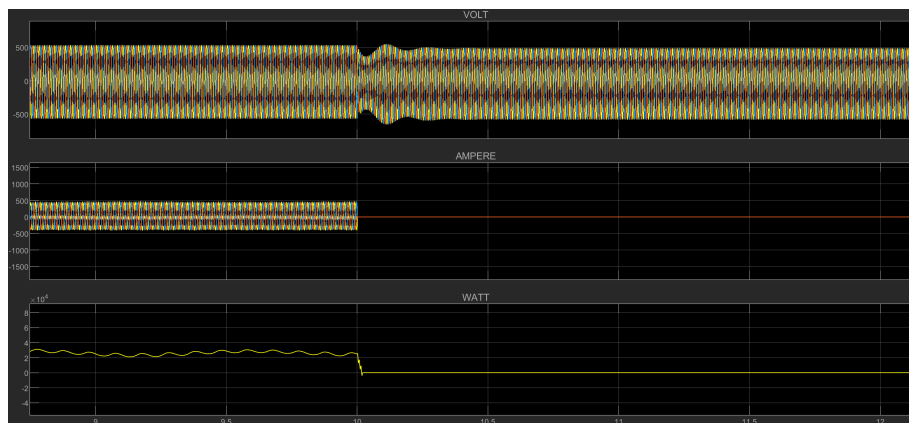
Το διάγραμμα της ντιζελογεννήτριας διαφέρει λίγο σε ό,τι αφορά το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο, καθώς και στο χρονικό διάστημα στο οποίο επιλύεται.



Εικόνα 7.60: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου A6.

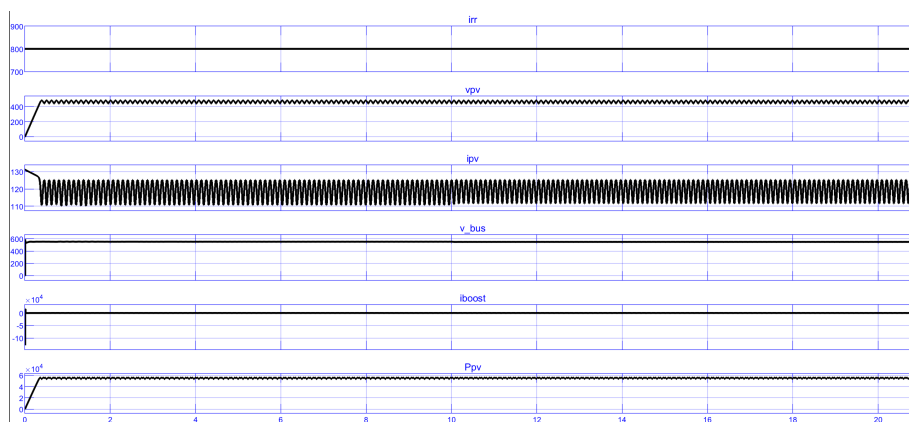
Αυτό που παρατηρείται είναι μια λίγο μεγαλύτερη κυμάτωση στην παραγόμενη ισχύ, η οποία ταυτόχρονα επιλύεται σε χρονικό ορίζοντα περίπου 2 δευτερολέπτων μετά το πέρας της αρχικής αναταραχής. Σε κάθε περίπτωση, είναι εμφανές ότι το σύστημα καταφέρνει και ενσωματώνει την γεννήτρια παραγωγής ντίζελ με τρόπο τέτοιο, που να μας δίνει μια σχετικά σταθερή ισχύ της τάξης των 25 kW. Αυτό φαίνεται καλύτερα και με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.61), όπως την ίδια στιγμή παρατηρείται η ταχύτητα με την οποία βγαίνει εκτός του συστήματος. Η στιγμή της αποσύνδεσης με το μικροδίκτυο προκαλεί κάποιες μικρο-μεταβολές στην παραγόμενη τάση, που γίνονται όμως αισθητές μόνο στο επίπεδο της ντιζελογεννήτριας αφού στο συνολικό σύστημα διατηρείται σταθερή κατά πλάτος, όπως

ήδη έχει παρουσιαστεί.

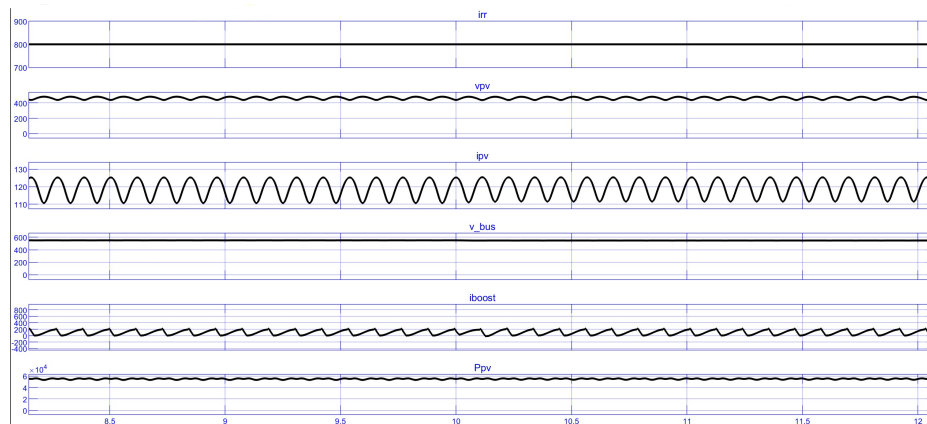


Εικόνα 7.61: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου A6 (zoom).

Το σύστημα των φωτοβολταϊκών και σε αυτό το σενάριο δεν παρουσιάζει αλλαγές (Εικόνα 7.62), καθώς και εδώ η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία διατηρείται σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των μεταβολών του συστήματος. Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται ότι η αποδιδόμενη ισχύς είναι σταθερή και αρκετά κοντά στα ονομαστικά μεγέθη του συστήματος, ενώ με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.63) παρατηρούμε ότι το ρεύμα στην έξοδο του DC-DC converter είναι σταθερό (παρουσιάζει μονάχα μια μικρή κυμάτωση που οφείλεται στην κυμάτωση που παράγει το ίδιο το φωτοβολταϊκό i_{pv}).



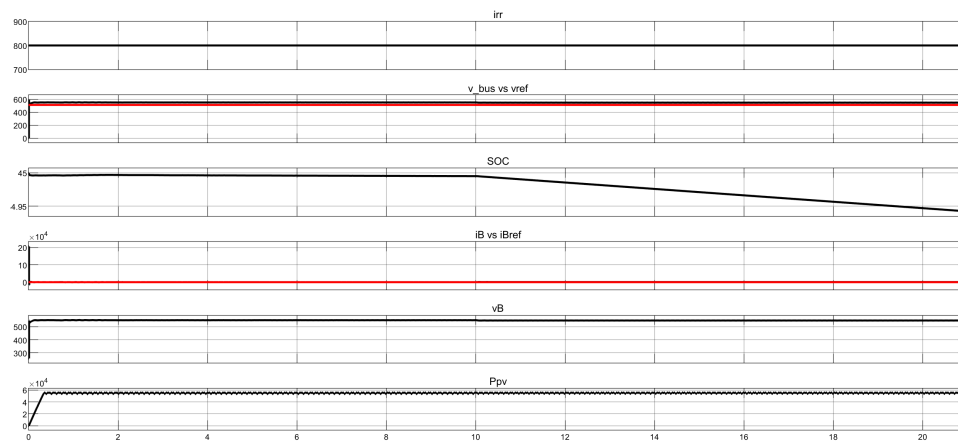
Εικόνα 7.62: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος σεναρίου A6.



Εικόνα 7.63: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος σεναρίου A6 (zoom).

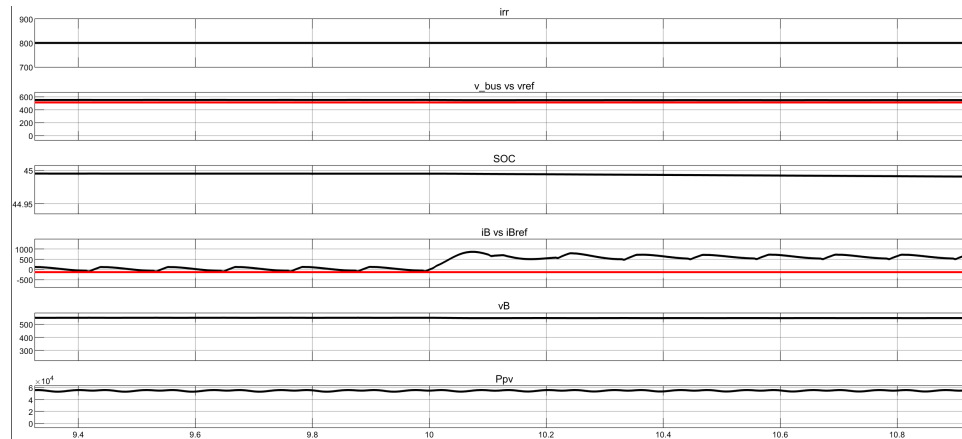
Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας λειτουργεί με τον αναμενόμενο τρόπο. Κατά την διάρκεια που η ντιζελογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία, παρατηρείται ότι η κατάσταση φόρτισης της είναι σχεδόν σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι μόνο ένα μικρό ποσό ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένο στην μπαταρία χρησιμοποιείται προκειμένου να καλυφθεί η ανάγκη του φορτίου.

Αυτό αλλάζει όμως την στιγμή που η γεννήτρια παραγωγής ντίζελ βγαίνει εκτός λειτουργίας. Από το σημείο εκείνο και μετά, παρατηρείται μια αισθητά μεγαλύτερη μείωση της κλίσης, που σε απλούς όρους σημαίνει ότι υπάρχει αύξηση στην αποδιδόμενη ισχύ. Αυτό είναι τελείως αποδεκτό, καθώς το σύστημα προσπαθεί να καλύψει το κενό που άφησε η ντιζελογεννήτρια με τους όποιους διαθέσιμους πόρους που έχει.



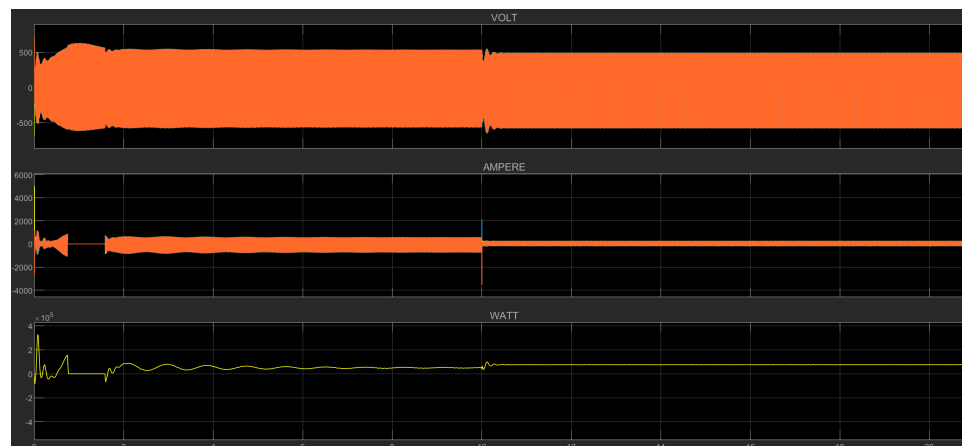
Εικόνα 7.64: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας σεναρίου A6.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.65) παρατηρείται ότι το ρεύμα που αποδίδει η μπαταρία επίσης αυξάνεται (i_B), πράγμα που αποδεικνύει και την απότομη εκφόρτισή της.



Εικόνα 7.65: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας σεναρίου A6 (zoom).

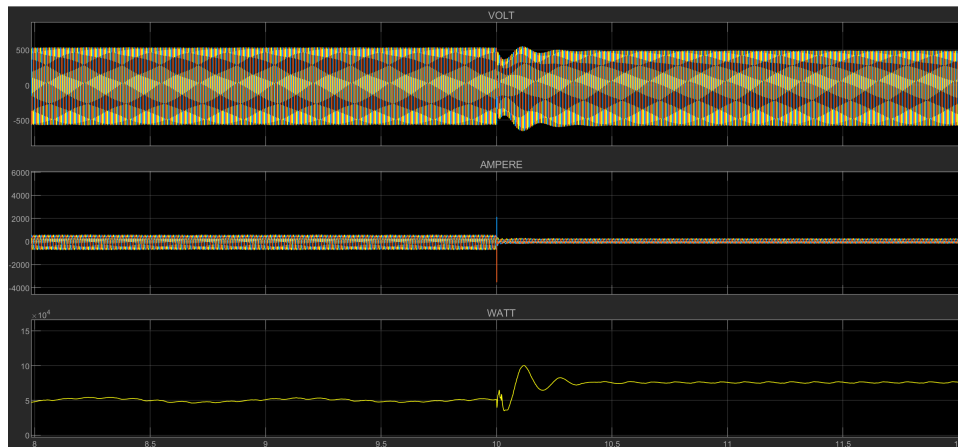
Αυτή η αλλαγή στην αποδιδόμενη ισχύ φαίνεται και στην λειτουργία του inverter. Μετά το μεταβατικό φαινόμενο όπου το σύστημα προσπαθεί να έρθει σε κατάσταση ορθής λειτουργίας, παρατηρείται ότι έχουμε μια συνεχή ροή ενέργειας προς το μικροδίκτυο (Εικόνα 7.66).



Εικόνα 7.66: Μεταφορά ισχύος μέσω αντιστροφέα σεναρίου A6.

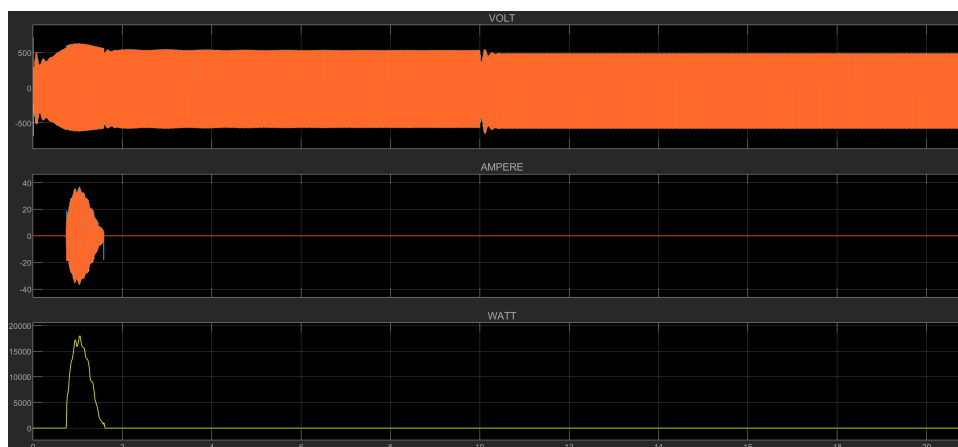
Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.67) παρατηρείται ότι μετά την έξοδο της γεννήτριας από το μικροδίκτυο, ο αντιστροφέας καλύπτει την επιπλέον ανάγκη του φορτίου που δημιουργείται, επιβεβαιώνοντας ουσιαστικά την αλλαγή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, εκεί όπου το σύστημα απέδιδε

μια σταθερή ισχύ γύρω στα 50 kW, την στιγμή της μεταβολής και μετά από ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο, παρατηρούμε ότι αποδίδει περίπου 70 kW. Τα 20 kW επιπλέον εκφράζουν το κενό στην παραγωγή που άφησε η γεννήτρια.



Εικόνα 7.67: Μεταφορά ισχύος μέσω αντιστροφέα σεναρίου A6 (zoom).

Κατά αντιστοιχία με τον αντιστροφέα, λειτουργεί και ο ανορθωτής. Όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, η χρήση του περιορίζεται στην εκκίνηση του συστήματος. Αυτό που θα περιμέναμε, ήταν την χρονική στιγμή λίγο μετά τα 10 sec να υπάρχει κάποια ροή ενέργειας πίσω στο σύστημα μπαταρίας. Όπως διακρίνεται και από το διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 7.68), αυτό δεν επιτυγχάνεται και οφείλεται σε δύο λόγους.



Εικόνα 7.68: Μεταφορά ισχύος μέσω ανορθωτή σεναρίου A6.

Ο πρώτος λόγος, είναι ότι το σύστημα ελέγχου αντιστροφέα-ανορθωτή λειτουργεί

με βάση την μέγιστη τιμή της τάσης που έχει το σύστημα την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Εάν για παράδειγμα η τάση είναι μεγαλύτερη από μια καθορισμένη τιμή, τότε λειτουργεί ο ανορθωτής προκειμένου να μεταφέρει ισχύ στο σύστημα αποθήκευσης, ενώ η αντίστοιχη διαδικασία γίνεται στην αντίθετη περίπτωση. Επομένως, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή το σύστημα δεν ανιχνεύει τιμές στην μέγιστη τάση που να υπερβαίνουν το όριο που έχει τεθεί για την έναρξη λειτουργίας του ανορθωτή.

Ο δεύτερος λόγος σχετίζεται εν μέρει με τον πρώτο. Την ακριβή χρονική στιγμή της εξόδου της ντιζελογεννήτριας, παρατηρείται από το διάγραμμα με zoom του αντιστροφέα (Εικόνα 7.68), ότι η τάση στιγμιαία τείνει να πέσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα με συνέπεια να οδηγηθεί το σύστημα σε αστάθεια. Αυτό όμως δεν επιτυγχάνεται, καθώς σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ο αντιστροφέας κατάφερε και την επανέφερε στις φυσιολογικές της τιμές. Επομένως, την χρονική στιγμή που στο συνολικό σύστημα φαίνεται να υπάρχει μια περίσσεια ισχύος, στην πραγματικότητα δεν μπορεί να λειτουργήσει ο ανορθωτής προκειμένου να την εξαλείψει καθώς εκείνη την στιγμή ενεργεί ο αντιστροφέας.

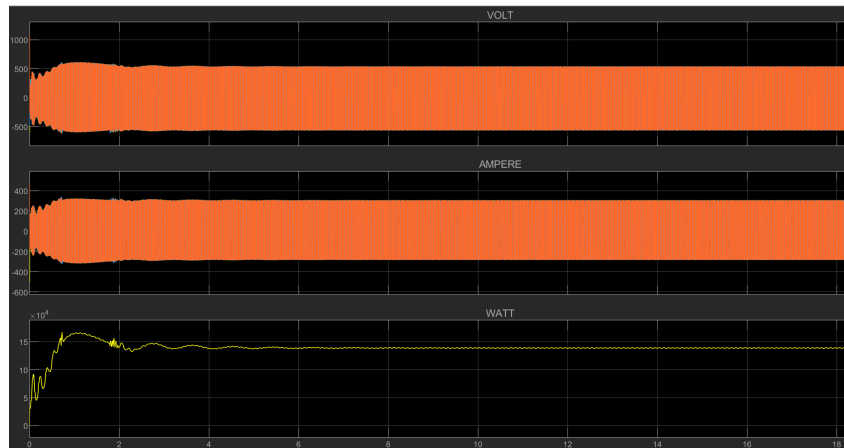
Το σημαντικό είναι ότι η αναταραχή που προκύπτει επιλύεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα από τα διάφορα components του συστήματος. Υπό πραγματικές συνθήκες προφανώς θα απαιτούνταν κάποιες επιπλέον ενέργειες ώστε να διασφαλιστεί στο μέγιστο η σωστή και ατάραχη λειτουργία του μικροδίκτυου.

7.7 Σενάριο A7

Σε αυτό το σενάριο σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα όπου υπήρχε σταθερή προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος σε μεταβαλλόμενη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Για να επιτευχθεί αυτό, τέθηκε σταθερό φορτίο στα 140 kW και εξετάστηκε η συμπεριφορά του συστήματος όταν η ηλιακή ακτινοβολία αυξήθηκε από τα 300 W/m^2 στα 800 W/m^2 . Η επιλογή αυτών των τιμών καθορίστηκε σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όπου αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι μπορούμε μέσα σε 1 δευτερόλεπτο να έχουμε μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας το μέγιστο κατά 25 W/m^2 . Επομένως σε χρόνο 20 δευτερολέπτων οι τιμές ορίστηκαν κατά αυτό τον τρόπο. Το συγκεκριμένο σενάριο εξετάζει το μικροδίκτυο για την περίπτωση που από συννεφιά βρεθεί να έχει μια σχετικά καλή ηλιοφάνεια (ίσως αφού πρωτίστως είχε περάσει κάποιο σύννεφο).

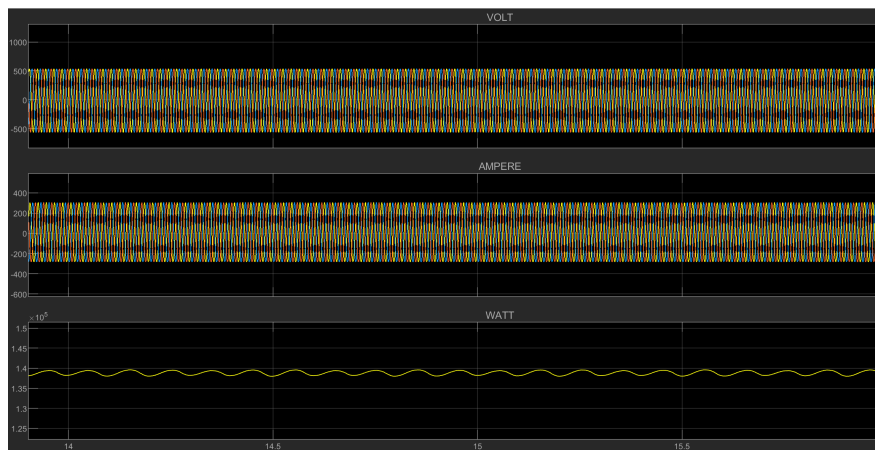
Συγκριτικά με όλα τα σενάρια όπου η αρχική ζήτηση ορίζεται στα 140 kW το μεταβατικό φαινόμενο είναι ανεπηρέαστο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε όλα τα προηγούμενα σενάρια, όπως και σε αυτό αλλά και στα επόμενα που θα εξεταστούν, η αρχική κατάσταση της μπαταρίας ορίζεται στο 45 %, που σημαίνει ότι το σύστημα αποθήκευσης έχει κάποιο ποσό ενέργειας το οποίο μπορεί να διαθέσει.

Τα αποτελέσματα της συνολικής παραδιδόμενης ισχύς είναι τα ακόλουθα (Εικόνα 7.69):



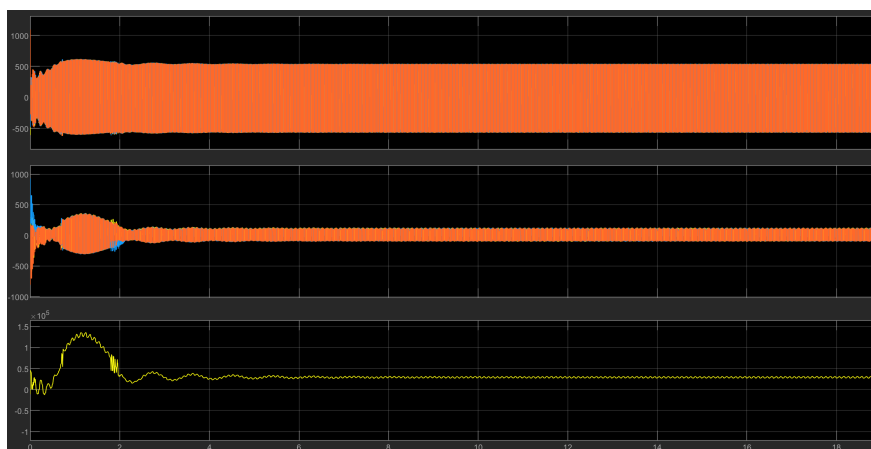
Εικόνα 7.69: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου A7.

Κατά τα άλλα, όπως και πριν, το σύστημα μένει ανεπηρέαστο και η συνολική ζητούμενη ισχύς φαίνεται να καλύπτεται ικανοποιητικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:

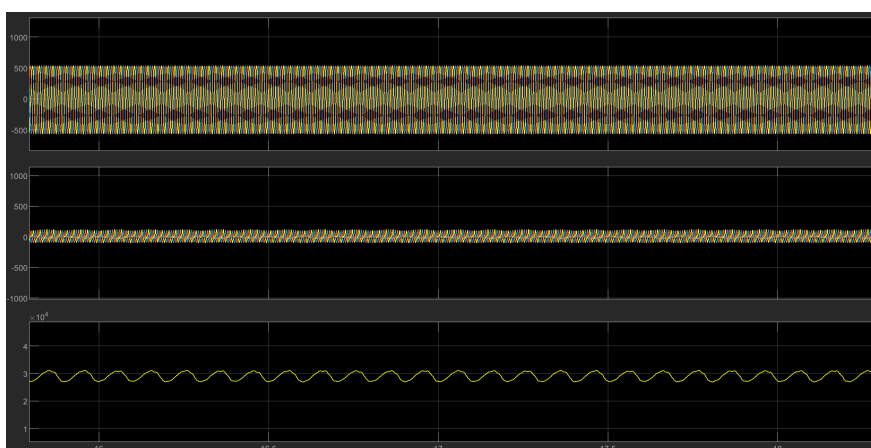


Εικόνα 7.70: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου A7 (zoom).

Η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια επίσης δεν αλλάζει σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις (Εικόνα 7.71). Και εδώ θα παρατηρήσουμε ότι η ισχύς που δίνει στο μικροδίκτυο το υποσύστημα μένει ανεπηρέαστη, καθώς η ταχύτητα του ανέμου σε αυτό το χρονικό διάστημα (όπως και σε όλα τα σενάρια) μένει ανεπηρέαστη.

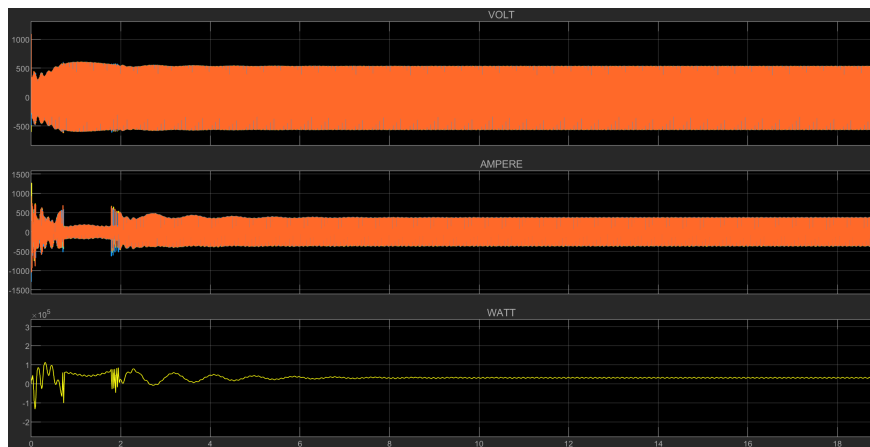


Εικόνα 7.71: Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας σεναρίου A7.



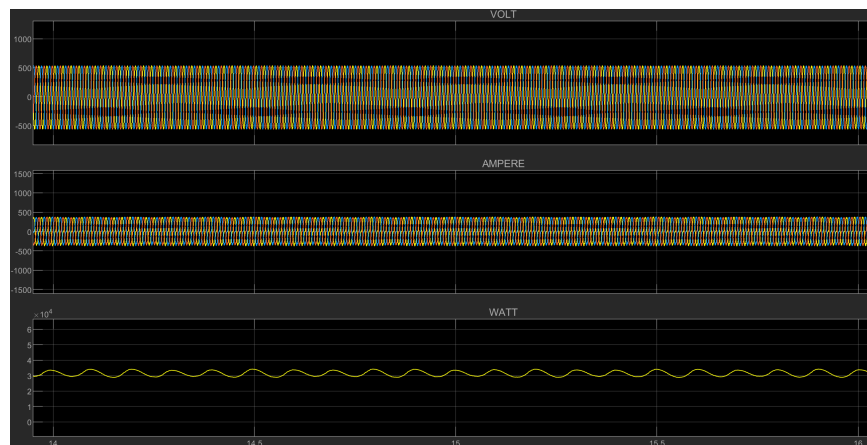
Εικόνα 7.72: Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας σεναρίου A7 (zoom).

Η παραγωγή της ντιζελογεννήτριας (Εικόνα 7.73) επίσης παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τα προηγούμενα σενάρια ,έχοντας ουσιαστικά ένα μικρό μεταβατικό φαινόμενο κατά την εκκίνηση του συστήματος. Όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας, επειδή δεν υπάρχει κάποια μεταβολή είτε στο φορτίο είτε σε κάποιο component του συστήματος, η παραγωγή ισχύος είναι σταθερή και αμετάβλητη.



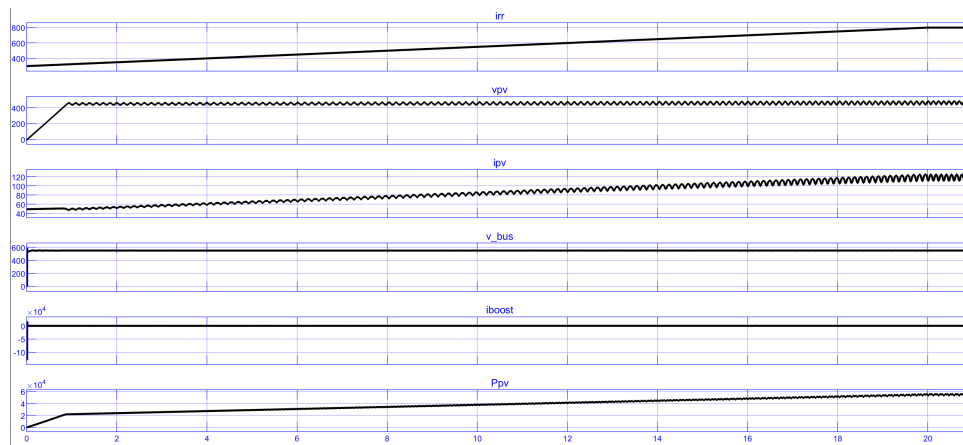
Εικόνα 7.73: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου A7.

Με τη χρήση του zoom παρατηρούμε και το ακριβές ποσό της ισχύος που συνεισφέρει στο σύστημα (Εικόνα 7.74).



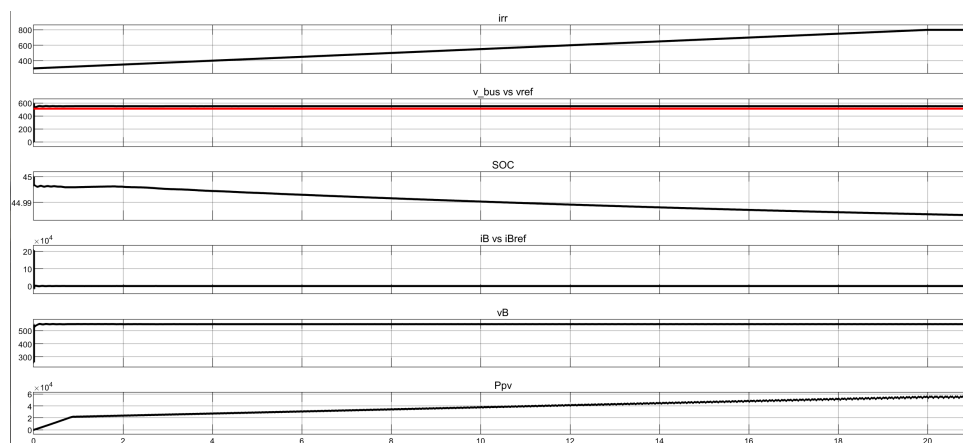
Εικόνα 7.74: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου A7 (zoom).

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρατηρείται στην ροή ισχύος που προέρχεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Καθώς η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται σταδιακά, υπάρχει ανάλογη αύξηση του παραγόμενου ρεύματος του φωτοβολταϊκού που έχει ως συνέπεια την αντίστοιχη δημιουργία ισχύος (Εικόνα 7.75). Το σύστημα ξεκινάει από χαμηλές τιμές παραγόμενης ισχύος και φτάνει σταδιακά στην αντίστοιχη παραγωγή που αναλογεί στα 800 W/m^2 , δηλαδή περίπου στα 60 kW.



Εικόνα 7.75: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος σεναρίου A7.

Εξίσου μεγάλο ενδιαφέρον με το φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσιάζει και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Εικόνα 7.76):

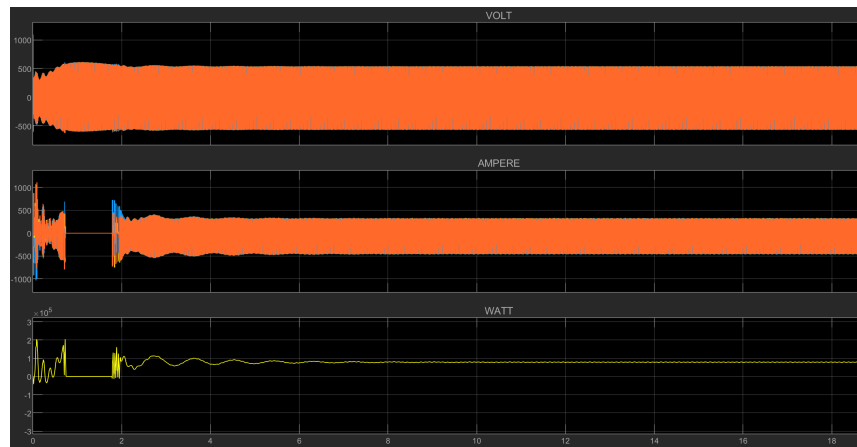


Εικόνα 7.76: Κατάσταση φόρτισης συστήματος μπαταρίας σεναρίου A7.

Αυτό που παρατηρείται σε αυτό το σενάριο, είναι πως ενώ αρχικά η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας φαίνεται να διατηρείται σταθερή (εξαιτίας του αρχικού μεταβατικού φαινομένου και της περίσσειας παραγόμενης ενέργειας), στην συνέχεια πέφτει με σχετικά γρήγορο ρυθμό. Αυτό ισχύει μέχρι κάποια χρονική στιγμή, όπου πλέον υπάρχει ικανή παραγόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα και επί της ουσίας η ζητούμενη ισχύς η οποία πλέον καλύπτεται από αυτό βοηθάει το σύστημα αποθήκευσης να ελαττώσει τον ρυθμό με τον οποίο τροφοδοτεί το συνολικό σύστημα. Χαρακτηριστικές είναι οι χρονικές στιγμές από τα 18 δευτερόλεπτα και μετά, όπου η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών έχει φτάσει πλέον σε ένα

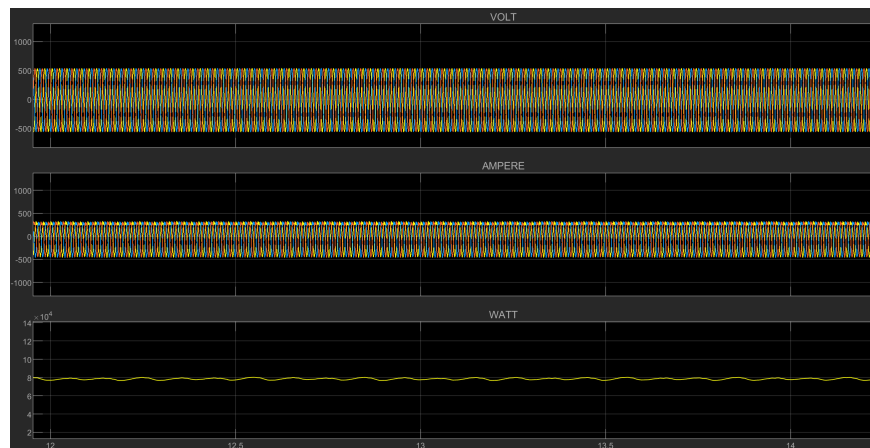
ικανοποιητικό επίπεδο ξεπερνώντας τα 40 kW.

Κατά αντιστοιχία με τα προηγούμενα σενάρια, ο inverter λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμβάλει στην κάλυψη της απαιτούμενης ισχύος (Εικόνα 7.77). Η λειτουργία του μένει ανεπηρέαστη από τις μεταβολές που συμβαίνουν στα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς το σύστημα αποθήκευσης βασισμένο στην μπαταρία έχει διαθέσιμη ισχύ με την οποία και τον τροφοδοτεί. Για αυτόν τον λόγο, το διάγραμμα του αντιστροφέα που ακολουθεί έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 7.77: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου A7.

Με τη χρήση του zoom παρατηρούμε ότι η ισχύς που μας μεταφέρει στο μικροδίκτυο είναι αδιάλειπτη και σταθερή στα 80 kW (Εικόνα 7.78).



Εικόνα 7.78: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου A7 (zoom).

Ο ανορθωτής, παρόμοια με τον αντιστροφέα, δεν λαμβάνει υπόψιν του τις μεταβολές που συμβαίνουν στο φωτοβολταϊκό σύστημα (Εικόνα 7.79). Η λειτουργία του περιορίζεται όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις στην μεταφορά ισχύος προς το σύστημα αποθήκευσης όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Μάλιστα, εδώ φαίνεται χαρακτηριστικά και το ποσό της ενέργειας που μεταφέρθηκε πίσω στην μπαταρία το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το State of Charge της είχε σταθερή κλίση.

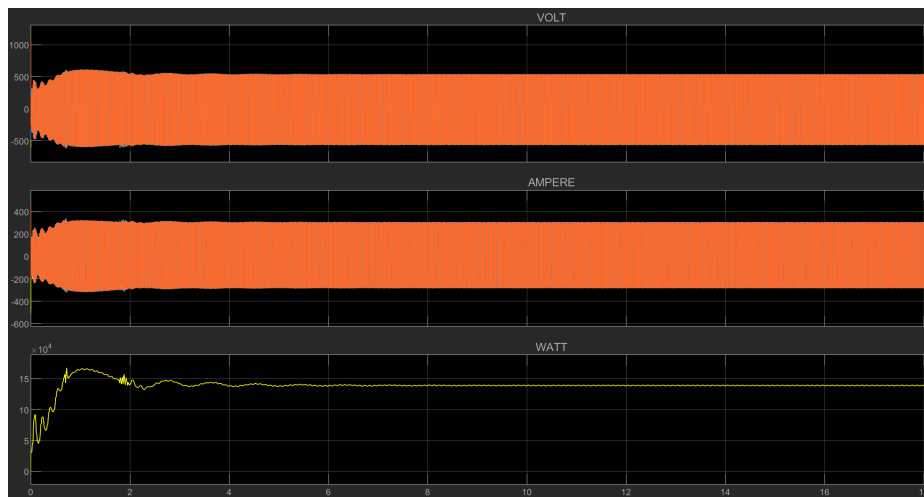


Εικόνα 7.79: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του ανορθωτή του σεναρίου A7.

7.8 Σενάριο A8

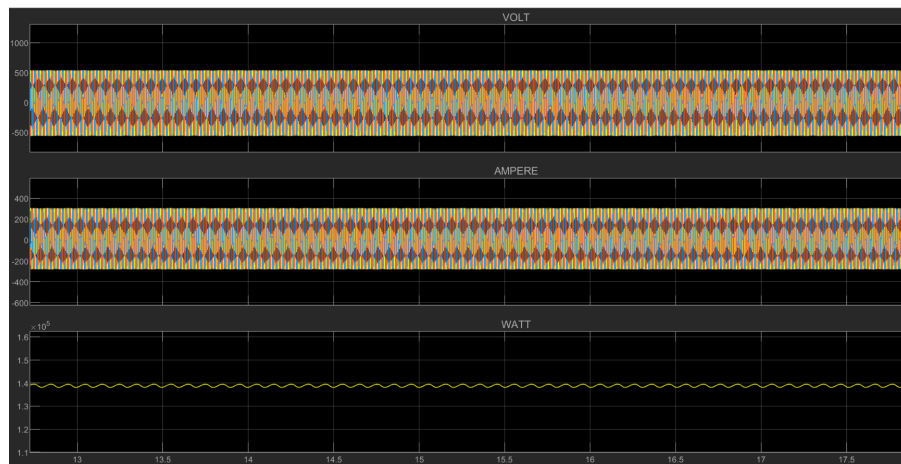
Η δημιουργία αυτού του σεναρίου βασίστηκε στην κατά αναλογία λειτουργία του προηγούμενου σεναρίου. Πλέον, αντί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία να αυξάνεται, έχει προσομοιωθεί το σύστημα ώστε να μειώνεται. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να παρουσιαστεί και σε ένα πραγματικό μικροδίκτυο, ειδικότερα την στιγμή που κάποια τοπική συννεφιά περάσει από πάνω. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν έρχονται σε πλήρη συμφωνία με αυτά του προηγούμενου σεναρίου (ειδικά σε ότι αφορά τις επιπτώσεις πάνω στο φωτοβολταϊκό σύστημα) αλλά και με τα προηγούμενα αυτού.

Η συνολική ζητούμενη ισχύς και σε αυτήν την περίπτωση τέθηκε ίση με 140 kW, ενώ για τις ανάγκες της προσομοίωσής η ηλιακή ακτινοβολία μειώθηκε από τα αρχικά 800 W/m^2 στα 300 W/m^2 για τους λόγους που είχαν αναφερθεί προηγουμένως.



Εικόνα 7.80: Συνολική παραδιδόμενη ισχύς του σεναρίου A8.

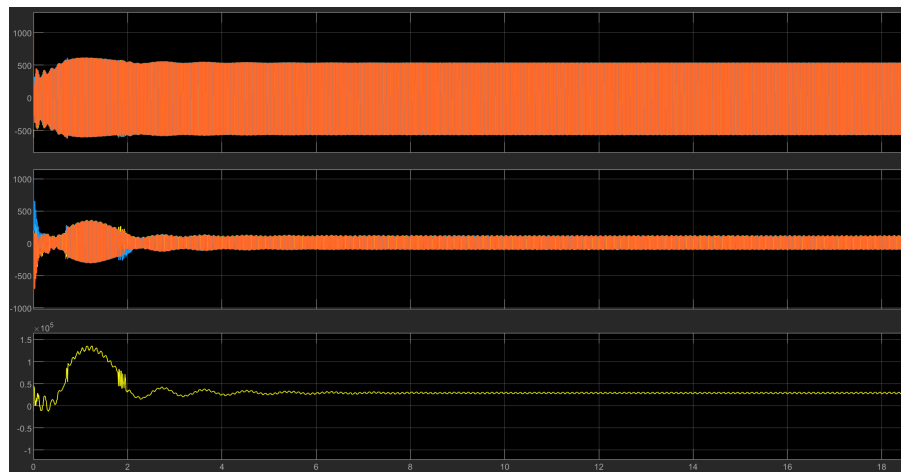
Γίνεται αμέσως αντιληπτό αυτό που είχε παρατηρηθεί και στο προηγούμενο σενάριο λειτουργίας. Το σύστημα δεν αναγνωρίζει τυχόν αλλαγές που υφίσταται το φωτοβολταϊκό υποσύστημα, και ως συνέπεια μένει ανεπηρέαστο παραδίδοντας συνεχώς την ζητούμενη ισχύ (Εικόνα 7.80). Παρακάτω με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.81) παρατηρούμε το πόσο σταθερά αποδίδεται η ζητούμενη ισχύς.



Εικόνα 7.81: Συνολική παραδιδόμενη ισχύς του σεναρίου A8 (zoom).

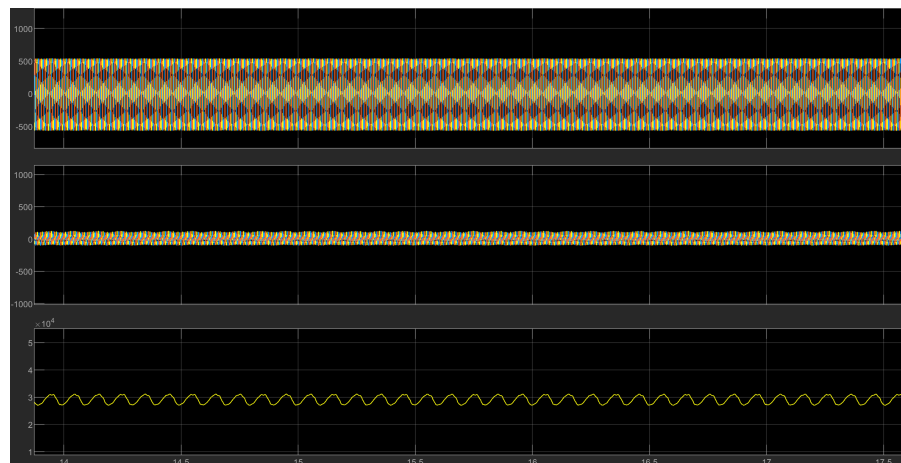
Η ανεμογεννήτρια σε παρόμοια λογική διατηρεί στην συνεχή της λειτουργία και την αδιάλειπτη παροχή σταθερής ισχύος προς το μικροδίκτυο (Εικόνα 7.82), όπως ακριβώς συνέβη και κατά την διάρκεια του προηγούμενου σεναρίου. Με δεδομένο

οτι η ταχύτητα του ανέμου δεν έχει μεταβληθεί, η παραγόμενη ισχύς μένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της αλλαγής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



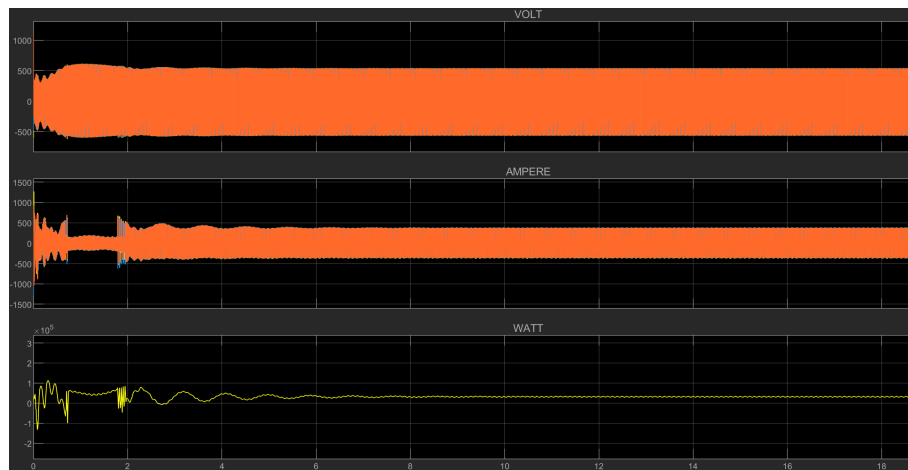
Εικόνα 7.82: Παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια του σεναρίου A8.

Η χρήση του zoom (Εικόνα 7.83) μας δείχνει οτι προσφέρει μια σταθερή ισχύ περίπου στα 30 kW:



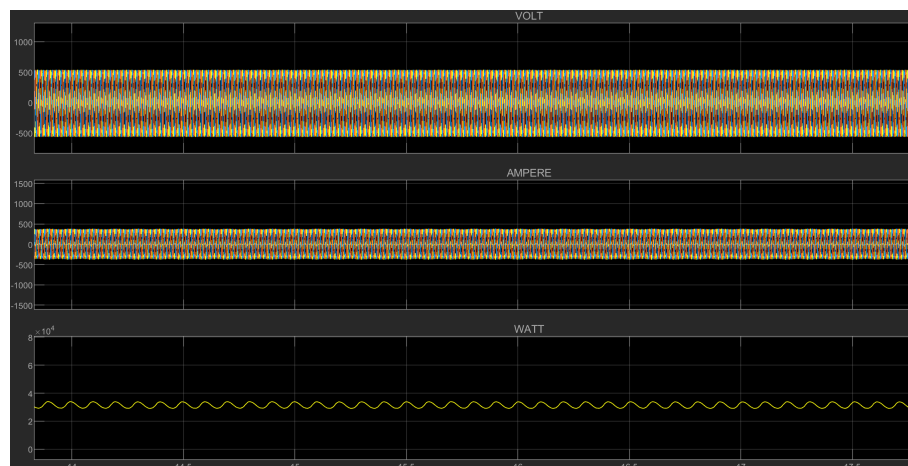
Εικόνα 7.83: Παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια του σεναρίου A8 (zoom).

Σύμφωνα με την ανεμογεννήτρια λειτουργεί και η ντιζελογεννήτρια (Εικόνα 7.84). Μετά το σύντομο μεταβατικό φαινόμενο, που όπως έχει αναφερθεί οφείλεται στο γεγονός οτι το σύστημα ξεκινάει από την αρχή, η ροή της ισχύος είναι σταθερή και αμετάβλητη παρά τις αλλαγές που υπάρχουν στην ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 7.84: Παραγόμενη ισχύς από την ντιζελογεννήτρια του σεναρίου A8.

Με τη χρήση του zoom θα παρατηρήσουμε ότι η γεννήτρια μας δίνει σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή σταθερή ισχύ ίση με 30 kW (Εικόνα 7.85).



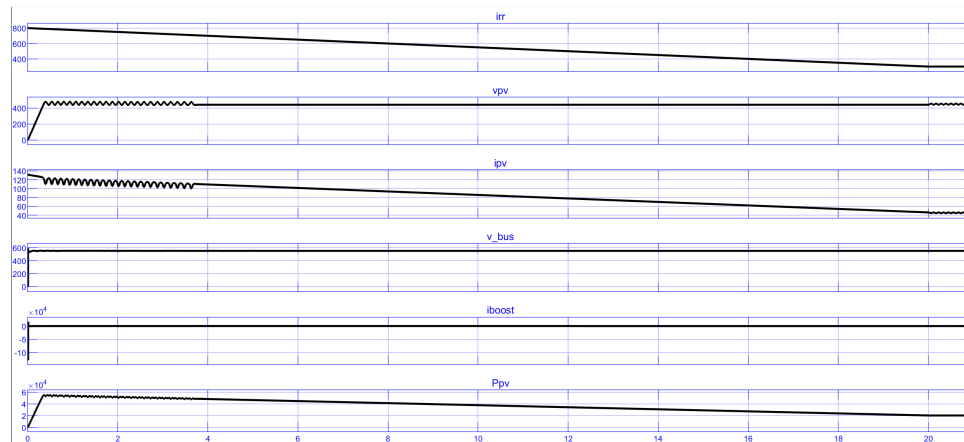
Εικόνα 7.85: Παραγόμενη ισχύς από την ντιζελογεννήτρια του σεναρίου A8 (zoom).

Το φωτοβολταϊκό σύστημα όπως είναι αναμενόμενο θα έχει και εδώ το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Καθώς η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται με σταθερό ρυθμό, θα παρατηρηθεί μια ταυτόχρονη μείωση του παραγόμενου ρεύματος των φωτοβολταϊκών στοιχείων και άρα και την μείωση της παραγόμενης ισχύος προς το σύστημα.

Ειδικότερα, θα παρατηρηθούν κάποιες αρχικές ταλαντώσεις που στην συνέχεια όμως θα εξαφανιστούν πλήρως. Αυτές οι ταλαντώσεις σχετίζονται με τις διαφορές

αρμονικές που εισέρχονται στο σύστημά από τα παθητικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται καθώς και από την ύπαρξη του DC-DC converter , ο οποίος δεν είναι ιδανικός. Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 7.86) γίνεται εμφανές αυτό ακόμα πιο έντονα και επί της ουσίας δικαιολογεί την μικρή ταλάντωση που παρουσίαζε το παραγόμενο ρεύμα σε όλα τα προηγούμενα σενάρια.

Καθώς το παραγόμενο ρεύμα μειώνεται, οι διάφοροι πυκνωτές και τα πηνία μπορούν να διαχειριστούν καλύτερα την όλη διαδικασία με συνέπεια η κλίση του ρεύματος να είναι αισθητά πιο λεία.

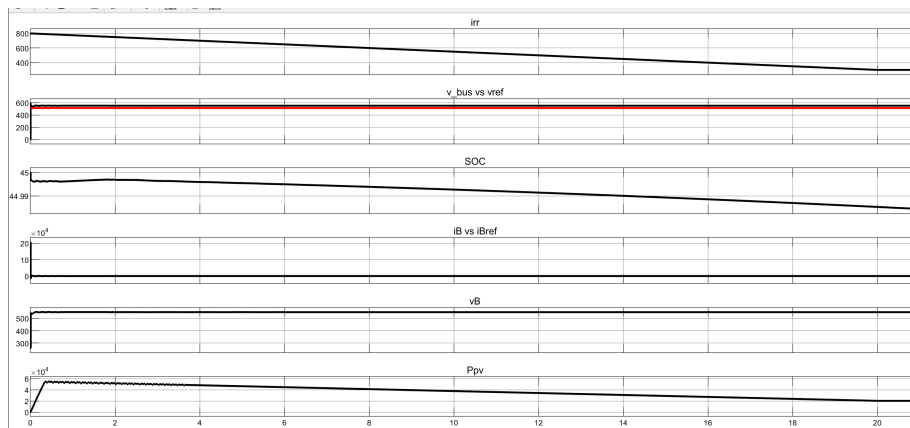


Εικόνα 7.86: Παραγόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα του σεναρίου A8.

Το σύστημα αποθήκευσης που συνδέεται άμεσα με το φωτοβολταϊκό σύστημα, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό όπως είναι αναμενόμενο από τις αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτό.

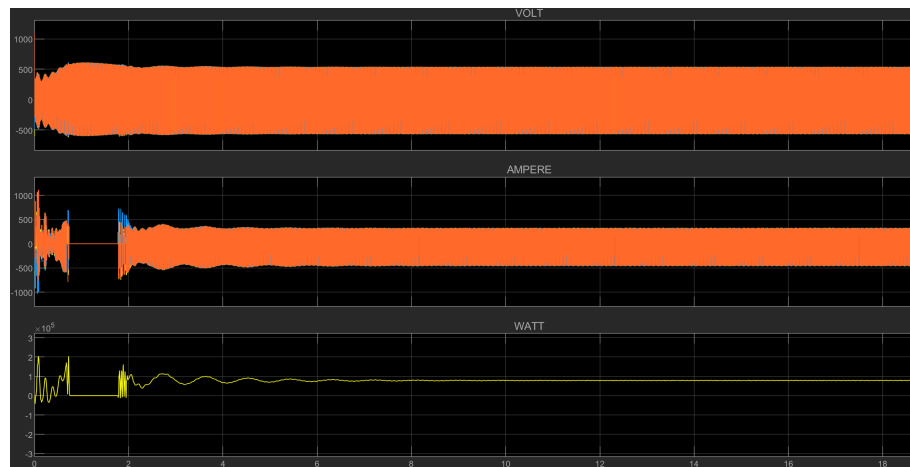
Χαρακτηριστικά, παρατηρείται στην εικόνα 7.87 ότι η κατάσταση φόρτισης όταν η μεταφερόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι επαρκής, αλλά και σε συνδυασμό με το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο που δημιουργεί μια περίσσεια ισχύος, όχι μόνο δεν μένει σταθερή αλλά ελαφρώς αυξάνεται. Αυτό όμως αλλάζει σχετικά γρήγορα, καθώς η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται. Βρισκόμενο σε μια κατάσταση όπου η ισχύς όπου λαμβάνει το σύστημα να μειώνεται ενώ ταυτόχρονα η ισχύς που απαιτεί για την ομαλή λειτουργία του να παραμένει σταθερή, το σύστημα αποθήκευσης δεν έχει άλλη επιλογή από το αρχίσει να εκφορτίζεται με σχετικά γρήγορο ρυθμό.

Αυτό γίνεται εμφανές μετά την χρονική στιγμή των 14 δευτερολέπτων όπου η κλίση είναι αισθητά αλλαγμένη:



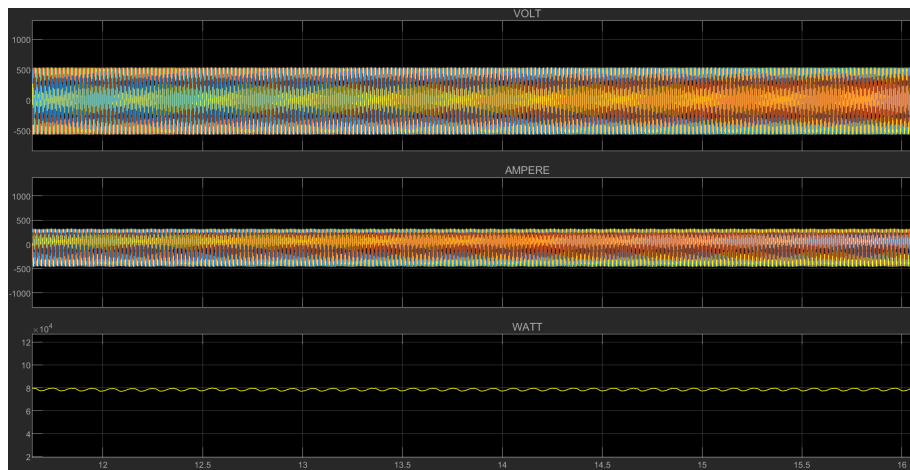
Εικόνα 7.87: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας του σεναρίου A8.

Ο inverter όπως και στο προηγούμενο σενάριο λειτουργεί ακατάπαυστα χωρίς να επηρεάζεται από την αλλαγή της παραγόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος (Εικόνα 7.88). Ανεξάρτητα με το ποσοστό εκφόρτισης της μπαταρίας και τον τρόπο με τον οποίο αυτό καθορίζεται, συνεχίζει να τροφοδοτεί όπως θα ήταν αναμενόμενο το σύστημα με ισχύ.



Εικόνα 7.88: Παραδιδόμενη ισχύς από τον αντιστροφέα του σεναρίου A8.

Όπως διακρίνεται και με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.88), η ισχύς που μεταφέρεται στο σύστημα έχει την ίδια σταθερή τιμή στα 80 περίπου kW, ποσότητα που συμβάλει αρκετά στην κάλυψη των αναγκών του φορτίου.



Εικόνα 7.89: Παραδιδόμενη ισχύς από τον αντιστροφέα του σεναρίου A8 (zoom).

Ακριβώς με την ίδια λογική μέχρι τώρα, ο ανορθωτής δεν χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό, παρά μόνο όταν κρίνεται αναγκαίο από το ίδιο το σύστημα. Το μεταφερόμενο ποσό από το μικροδίκτυο προς το σύστημα αποθήκευσης των μπαταριών φαίνεται στην εικόνα 7.90, και ουσιαστικά επιβεβαιώνει την ανοδική κλίση στην κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας στο χρονικό διάστημα 0.8 με 1.8 sec.



Εικόνα 7.90: Παραδιδόμενη ισχύς από τον ανορθωτή του σεναρίου A8.

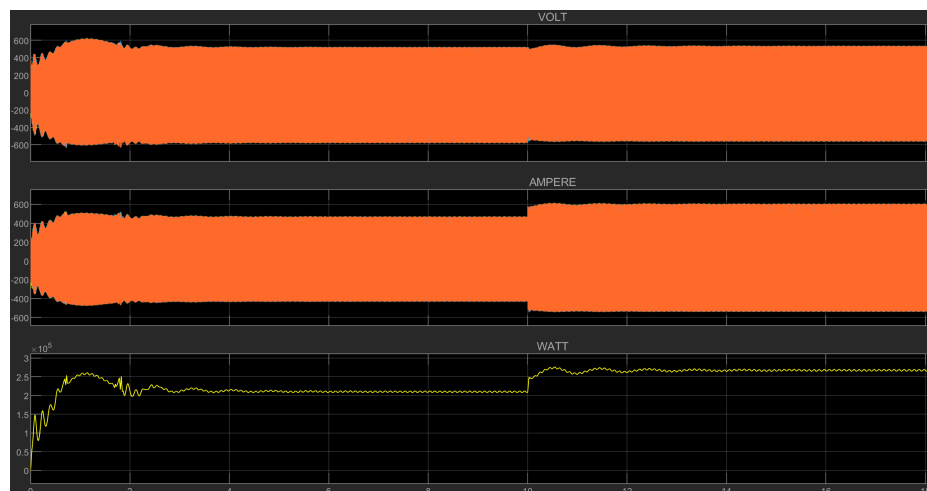
7.9 Σενάριο B1

Σε αυτή την κατηγορία των σεναρίων, ξεκινώντας με αυτό, το σύστημα επεκτείνεται αισθητά με την προσθήκη μιας επιπλέον ανεμογεννήτριας με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά. Η συγκεκριμένη αυτή προσθήκη εξετάζει την συμπεριφορά του συστήματος σε ενδεχόμενες αλλαγές που πρόκειται να συμβούν στον μέλλον του μικροδικτύου, προκειμένου να καλυφθούν μελλοντικές επιπλέον ανάγκες στο φορτίο ζήτησης.

Για αυτό τον λόγο, πλέον το βασικό φορτίο στις περισσότερες περιπτώσεις που θα εξεταστεί έχει αυξηθεί αισθητά, με ό,τι συνεπάγεται αυτό για τα σενάρια που εξετάζουν την ενδεχόμενη αύξηση. Ειδικότερα, στο πρώτο αυτό σενάριο το σύστημα προσομοιώνει την κάλυψη ενός φορτίου 210 kW με απότομη μετάβαση στα 270 kW. Η λογική είναι η ίδια με αυτή των σεναρίων της κατηγορίας A, και οι λόγοι που οι μεταβολές αυτές είναι ακαριαίες καθώς και διάφορες άλλες προϋποθέσεις που έχουν τεθεί έχουν εξηγηθεί νωρίτερα.

Σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 7.91) ότι η συνολική ισχύς που πρέπει να καλύψει το μικροδίκτυο καλύπτεται με μεγάλη επιτυχία. Η ύπαρξη μεταβατικών φαινομένων και σε αυτά τα σενάρια οφείλεται στην εκκίνηση του συστήματος από κατάσταση πλήρης αδράνειας.

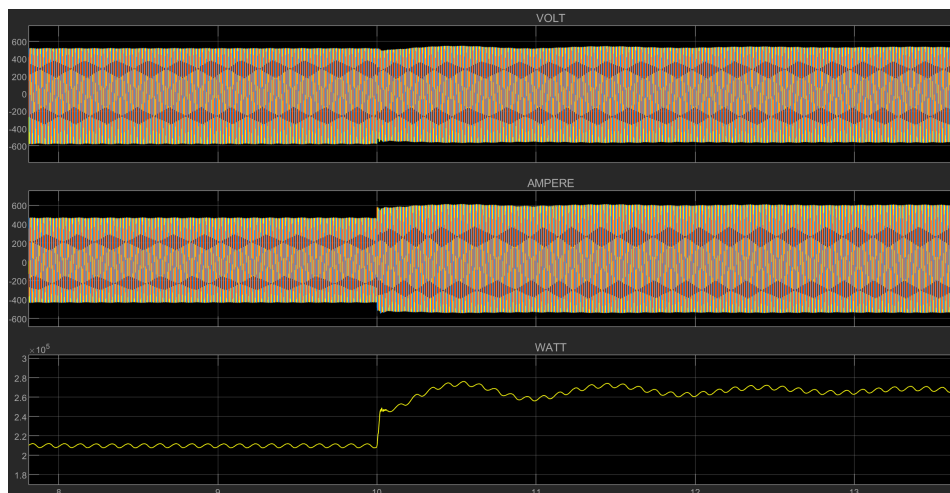
Αυτό που γίνεται αμέσως αντιληπτό είναι ότι μετά την σύντομη διαταραχή το σύστημα αποδίδει σταθερή ισχύ στα 210 kW, ενώ μετά την αλλαγή στο φορτίο ζήτησης ακολουθεί και πάλι ένα μεταβατικό φαινόμενο μικρής διάρκειας το οποίο επίσης επιλύεται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η μετάβαση στα 270 kW είναι σχετικά ομαλή, και το σύστημα καταφέρνει να την διατηρήσει χωρίς πρόβλημα.



Εικόνα 7.91: Συνολική αποδιδόμενη ισχύς σεναρίου B1.

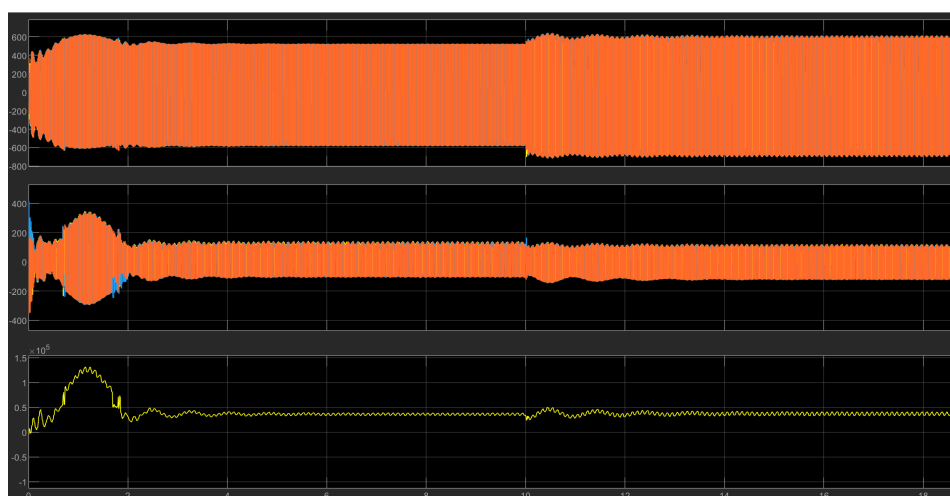
Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.92) παρατηρείται με ακρίβεια η αποδιδόμενη ισχύς του συστήματος πριν την διαταραχή, την ακριβή στιγμή της μεταβολής καθώς και την μετέπειτα αποδιδόμενη ισχύς του συστήματος σύμφωνα με την αλλαγμένη

ζήτηση.

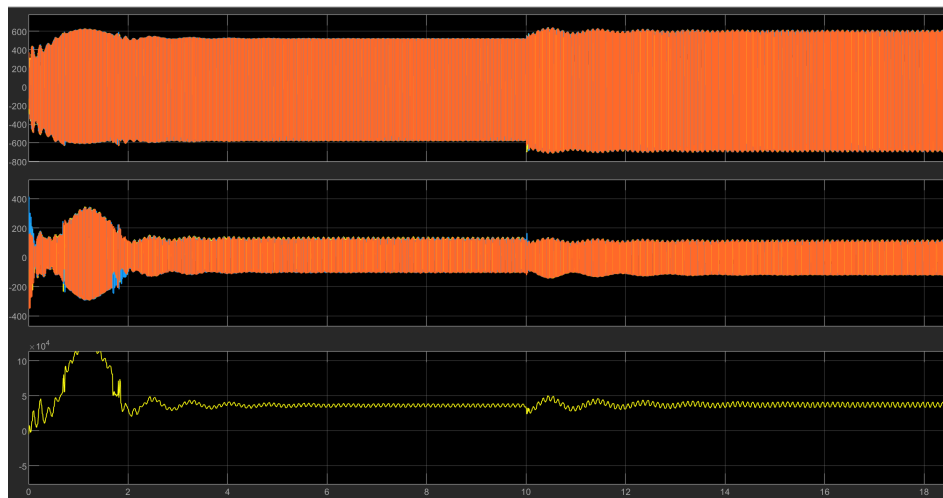


Εικόνα 7.92: Συνολική αποδιδόμενη ισχύς σεναρίου B1 (zoom).

Όπως είναι αναμενόμενο η παραγωγή και από τις δύο ανεμογεννήτριες θα είναι η ίδια, καθώς έχει γίνει η υπόθεση ότι πρόκειται για δυο όμοιες ανεμογεννήτριες της ίδιας τεχνολογίας και λογικής που λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες ταχύτητας ανέμου σε κοντινή απόσταση. Ως συνέπεια αυτών των προϋποθέσεων, τα αποτελέσματα στα οποία προκύπτουν έχουν την ίδια μορφή και αυτό αποδεικνύεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν:

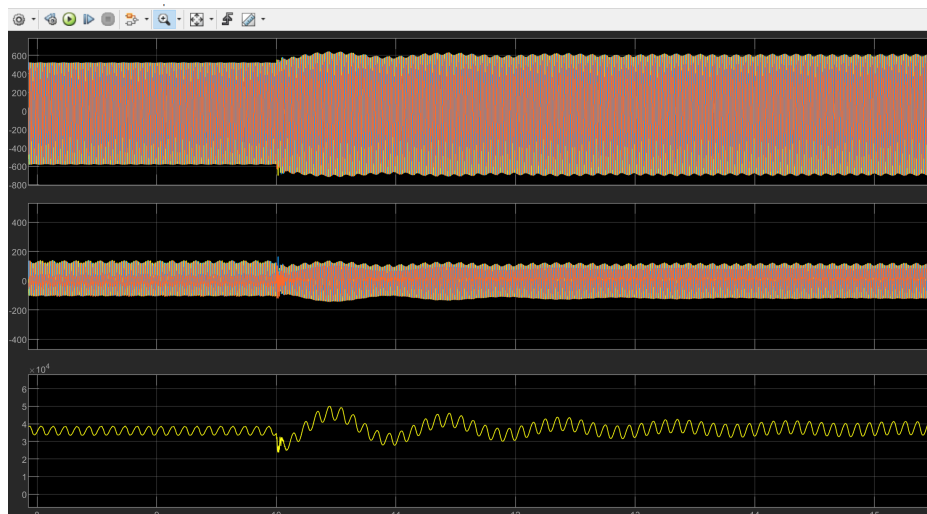


Εικόνα 7.93: Αποδιδόμενη ισχύς πρώτης ανεμογεννήτριας σεναρίου B1.

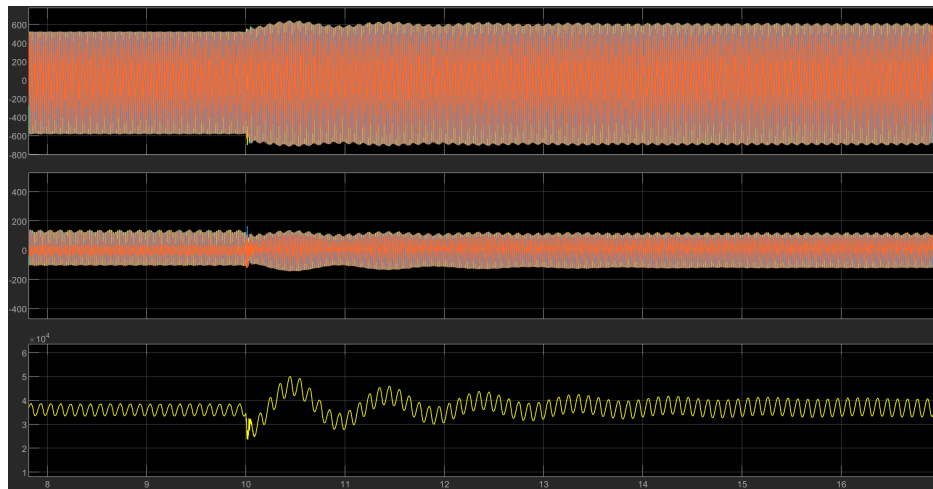


Εικόνα 7.94: Αποδιδόμενη ισχύς δεύτερης ανεμογεννήτριας σεναρίου B1.

Ειδικότερα, ακόμα και με την χρήση του zoom (Εικόνες 7.95-7.96) παρατηρείται ότι πρόκειται για εντελώς ίδια συμπεριφορά. Να σημειωθεί βέβαια, ότι υπό κανονικές συνθήκες κάτι τέτοιο ίσως να μην ήταν απόλυτα εφικτό, καθώς μικρο-αλλαγές θα μπορούσαν να αλλάξουν τον τρόπο λειτουργίας τους. Η Simulink όμως, με δεδομένο ότι επεξεργάζεται τις διαφορικές εξισώσεις των μοντέλων και με βάση αυτές δίνει τα ζητούμενα αποτελέσματα, δεν έχει λόγω να προχωρήσει σε αλλαγές που οφείλονται στην μοναδικότητα του εκάστοτε component.

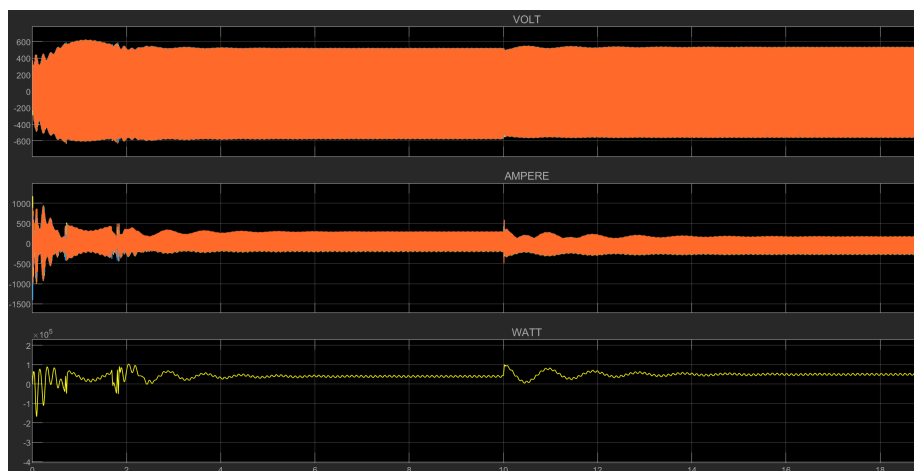


Εικόνα 7.95: Αποδιδόμενη ισχύς πρώτης ανεμογεννήτριας σεναρίου B1 (zoom).



Εικόνα 7.96: Αποδιδόμενη ισχύς δεύτερης ανεμογεννήτριας σεναρίου B1 (zoom).

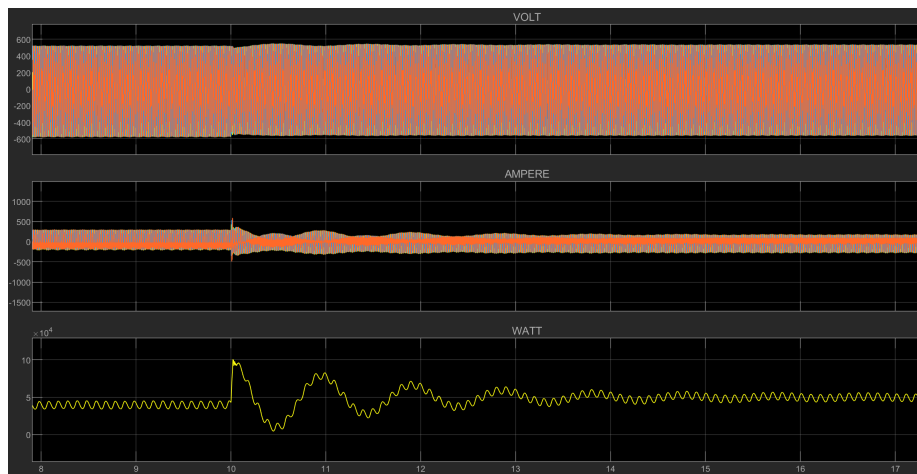
Η ντιζελογεννήτρια επίσης παρουσιάζει το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο της, που όμως επιλύεται και σε αυτή την περίπτωση σε σύντομο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 7.97: Αποδιδόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου B1.

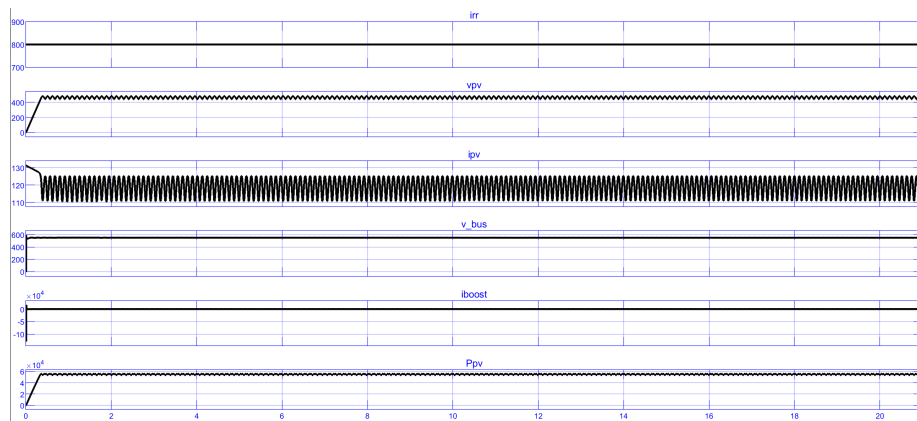
Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.98) παρατηρείται ότι η αποδιδόμενη ισχύς μετά την διαταραχή τείνει να αυξηθεί (όπως είχε παρατηρηθεί και σε άλλα υποσυστήματα σε προηγούμενες περιπτώσεις), κάτι που όμως σε βάθος χρόνου επαναφέρεται στις αρχικές του τιμές.

Και σε αυτήν την περίπτωση η αλλαγή του φορτίου προκαλεί ένα μεταβατικό φαινόμενο που όμως επιλύεται σε σύντομο χρονικό διάστημα.



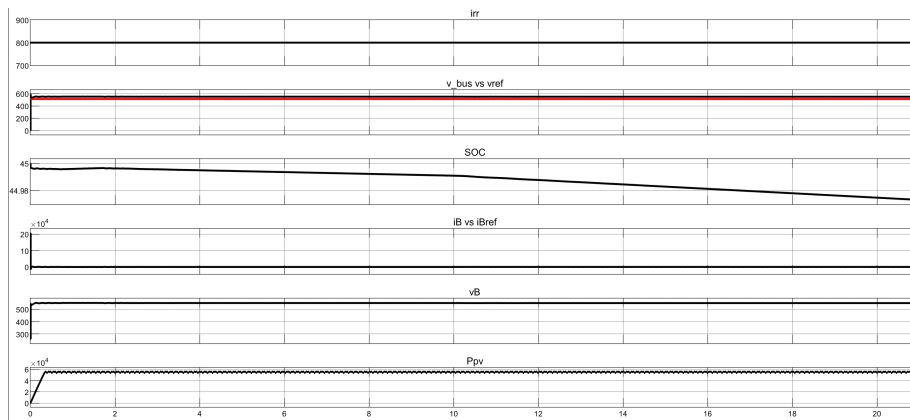
Εικόνα 7.98: Αποδιδόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας σεναρίου B1 (zoom).

Το φωτοβολταϊκό σύστημα (Εικόνα 7.99) όπως έχει ήδη παρατηρηθεί και από τα προηγούμενα σενάρια δεν επιδέχεται κάποιας αλλαγής, και αυτό επειδή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν αλλάζει. Από εκεί και ύστερα ούτε η επιπλέον αύξηση του φορτίου σχετίζεται με τον τρόπο λειτουργίας τους.



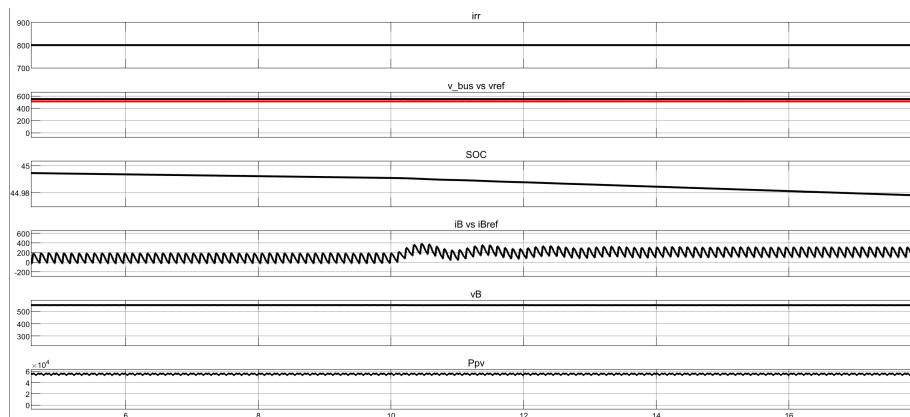
Εικόνα 7.99: Αποδιδόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος σεναρίου B1.

Σε αντίθεση με το φωτοβολταϊκό σύστημα, η αλλαγή του φορτίου γίνεται αισθητή από το σύστημα αποθήκευσης (Εικόνα 7.100) το οποίο δεν εξαρτάται άμεσα από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, αλλά καλείται να καλύψει τις επιπλέον ανάγκες που δημιουργούνται. Το σύστημα γενικά παρουσιάζει μια σταθερή εκφόρτιση μέχρι την στιγμή όπου η ζήτηση αυξάνεται ακαριαία. Μετά από αυτό το σημείο, ο ρυθμός εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αισθητά απότομος, μιας και το σύστημα τροφοδοτεί σε μεγάλο βαθμό την αύξηση των 60 kW.



Εικόνα 7.100: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης σεναρίου B1.

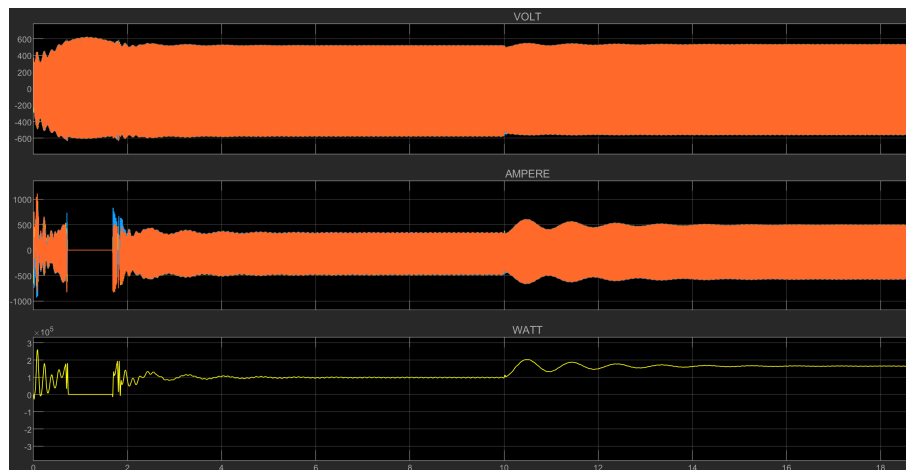
Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.101) παρατηρείται η αύξηση του ρεύματος που δίνει η μπαταρία στο σύστημα, πράγμα που δικαιολογεί και την αντίστοιχη μείωση στο ποσοστό εκφόρτισης της.



Εικόνα 7.101: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης σεναρίου B1 (zoom).

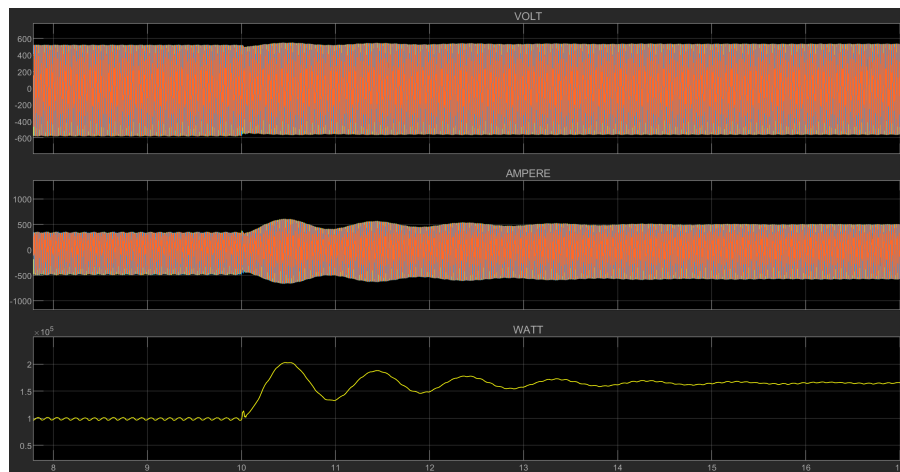
Η αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος φαίνεται ξεκάθαρα και από το διάγραμμα του αντιστροφέα (Εικόνα 7.102). Και σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε η μεταφορά ισχύος μεταξύ συστήματος αποθήκευσης και μικροδικτύου να είναι αμφίδρομη.

Η ροή ισχύος από τον συνδυασμό φωτοβολταϊκού συστήματος-σύστημα αποθήκευσης αντικατοπτρίζεται στο ποσό της ισχύος που μεταφέρεται από τον αντιστροφέα. Καθώς το φορτίο αλλάζει και την ίδια στιγμή παρατηρούμε την αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης της μπαταρίας, η αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται και στον inverter.



Εικόνα 7.102: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B1.

Με την χρήση του zoom παρατηρείται και το ακριβές ποσό που μεταφέρθηκε προς το μικροδίκτυο (Εικόνα 7.103). Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι η ονομαστική τιμή του αντιστροφέα είναι σαφώς μεγαλύτερη και για αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η κάλυψη μιας τόσο μεγάλης ροής ενέργειας.



Εικόνα 7.103: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B1 (zoom).

Κατά αντιστοιχία ο ανορθωτής λειτουργεί τις χρονικές στιγμές όπου δεν λειτουργεί ο αντιστροφέας (Εικόνα 7.104). Αυτό σημαίνει ότι την χρονική διάρκεια όπου συμβαίνει το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο υπάρχει μεταφορά ισχύος από το μικροδίκτυο προς το σύστημα αποθήκευσης, με σκοπό την ομαλότερη λειτουργίας του. Κατά την διάρκεια της αλλαγής του φορτίου, όπως αναμένεται, δεν υπάρχει λόγος

ενεργοποίησής του καθώς το μεταβατικό φαινόμενο που δημιουργείται δεν προκαλεί σημαντική αύξηση της παραγόμενης ισχύος που να ξεπερνάει την ζητούμενη ισχύ των 270 kW.

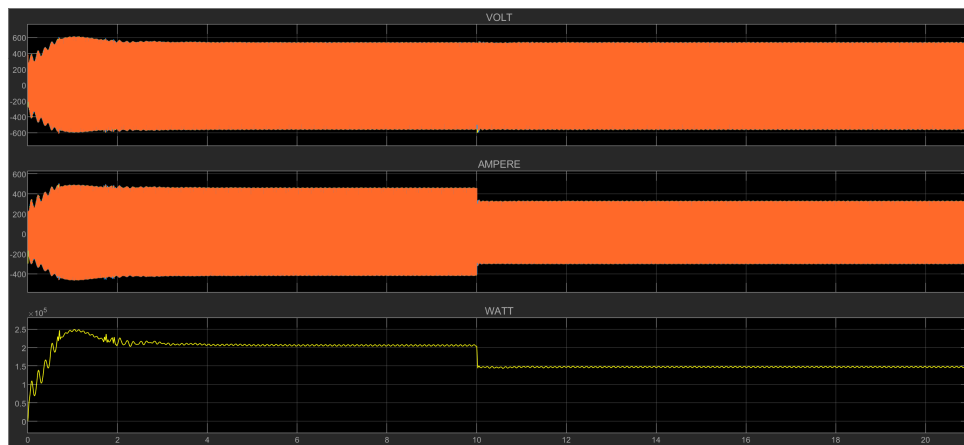


Εικόνα 7.104: Μεταφορά ισχύος μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B1.

7.10 Σενάριο B2

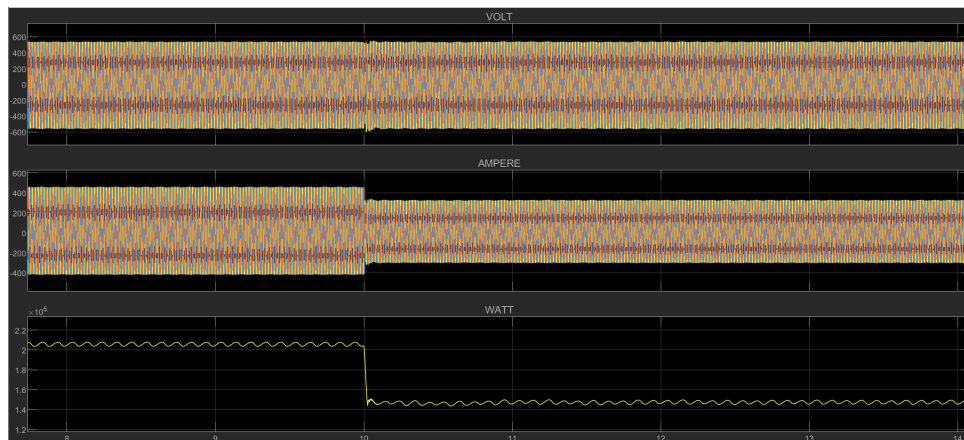
Κατά αντιστοιχία με το σενάριο A2 όπου εξετάστηκε η απόκριση του μικροδικτύου σε μια ενδεχόμενη απότομη ελάττωση του ζητούμενου φορτίου έχουμε και το σενάριο αυτό. Πλέον, το αρχικό φορτίο είναι μεγαλύτερο, στα 210 kW, και η μείωση είναι και σε αυτή την περίπτωση κατά 60 kW.

Και υπό αυτές τις προϋποθέσεις το σύστημα προσαρμόστηκε κατάλληλα, αφού κατάφερε να επανέλθει σε μια κατάσταση ισορροπίας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, αισθητά μικρότερο από την αντίστοιχη περίπτωση αύξησης του φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, η μεταφερόμενη ισχύς στο μικροδίκτυο από το αρχικό ζητούμενο φορτίο των 210 kW στα 150 kW είναι αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 7.105:



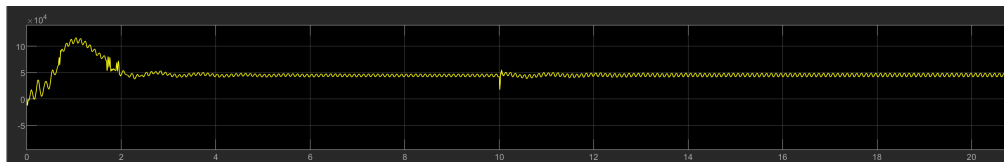
Εικόνα 7.105: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς σεναρίου B2.

Με την χρήση του zoom αποδεικνύεται ότι η μετάβαση στην νέα ζητούμενη ισχύς είναι σχεδόν ακαριαία:

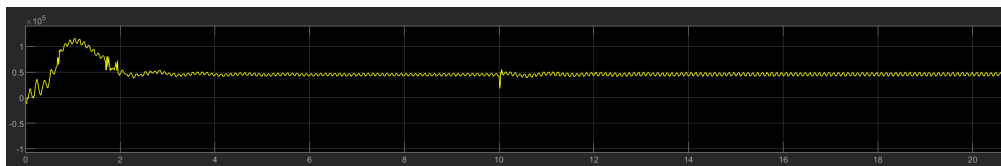


Εικόνα 7.106: Συνολική μεταφερόμενη ισχύς σεναρίου B2 (zoom).

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, οι ανεμογεννήτριες παράγουν την ίδια ισχύ σε κάθε χρονική στιγμή (Εικόνα 7.106). Την στιγμή της αλλαγής αντιλαμβάνονται, προσαρμόζονται και ξεπερνούν το μεταβατικό φαινόμενο με τον ίδιο τρόπο, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.

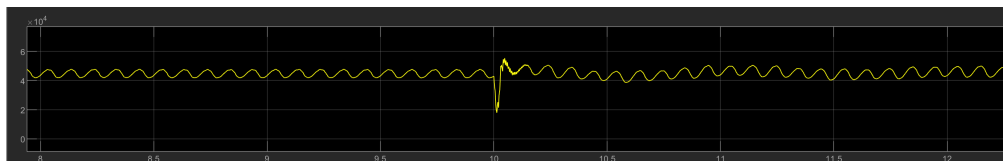


Εικόνα 7.107: Μεταφερόμενη ισχύς από την πρώτη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B2.

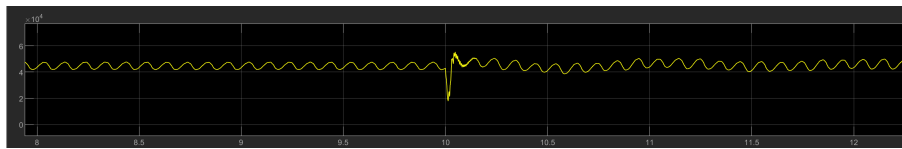


Εικόνα 7.108: Μεταφερόμενη ισχύς από την δεύτερη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B2.

Και κατά αντιστοιχία με την χρήση του zoom παρατηρούμε τις μικρές κυματώσεις που γενικά παρατηρούνται στο όλο σύστημα, όπως επίσης και την ταχύτητα απόσβεσης της διαταραχής:

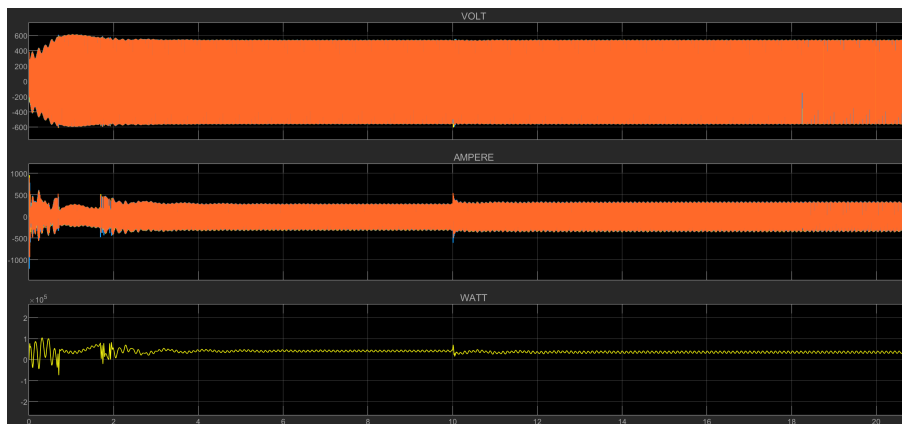


Εικόνα 7.109: Μεταφερόμενη ισχύς από την πρώτη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B2 (zoom).



Εικόνα 7.110: Μεταφερόμενη ισχύς της δεύτερης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B2 (zoom).

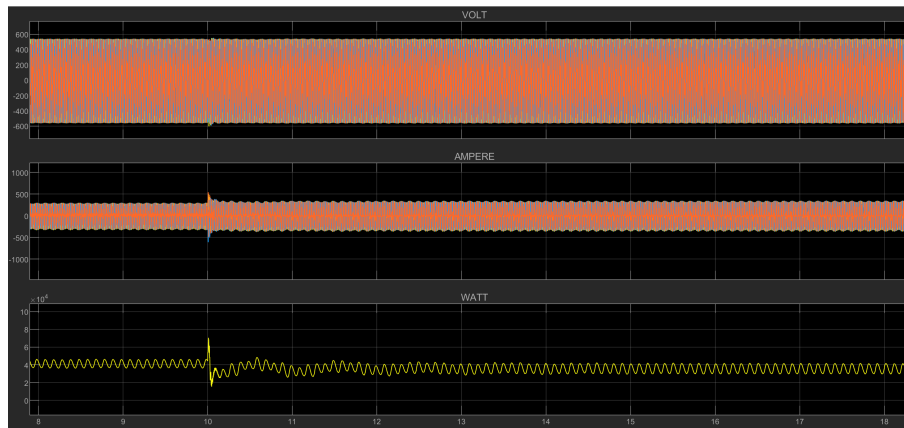
Η ντιζελογεννήτρια (Εικόνα 7.111) και σε αυτήν την περίπτωση λειτουργήσει όπως ήταν αναμενόμενο. Το σύντομο αρχικό μεταβατικό φαινόμενο είναι αισθητό και σε αυτό το σενάριο, όμως όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις δεν δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Μετά την αλλαγή του φορτίου προσαρμόστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειώσει λίγο την παραγόμενη ισχύ εξόδου της προς το σύστημα και να συμβάλει κατά αυτόν τον τρόπο στην ελάττωση της παραγωγής, με συνέπειες για την ίδια σχεδόν ανεπαίσθητες.



Εικόνα 7.111: Μεταφερόμενη ισχύς από την ντιζελογεννήτρια του σεναρίου B2.

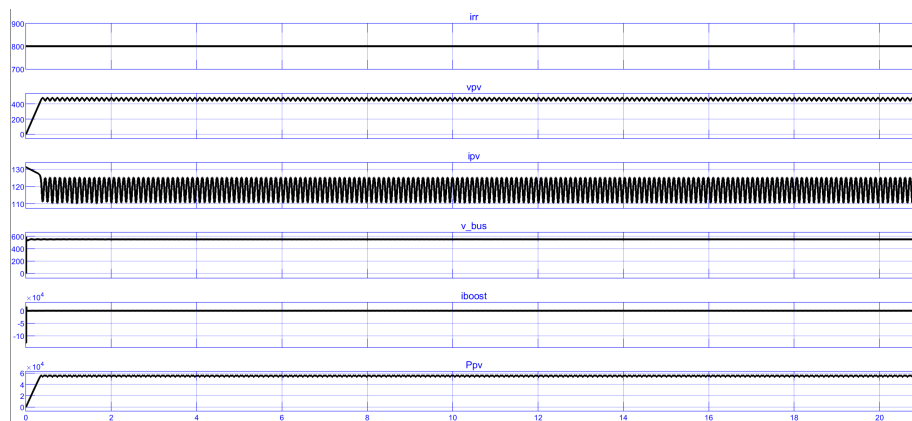
Κάνοντας χρήση του zoom (Εικόνα 7.112) θα παρατηρηθεί ότι την στιγμή της αλλαγής υπάρχει ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα κατά το οποίο η παραγωγή μεταβαίνει από μια κατάσταση υψηλής ισχύος εξόδου, σε μια κατάσταση χαμηλής ισχύος εξόδου.

Σε κάθε περίπτωση όμως, αυτό το φαινόμενο δεν επηρεάζει την συνολική ποιότητα ισχύος του συστήματος όπως και φάνηκε από τα προηγούμενα διαγράμματα.



Εικόνα 7.112: Μεταφερόμενη ισχύς από την ντιζελογεννήτρια του σεναρίου B2 (zoom).

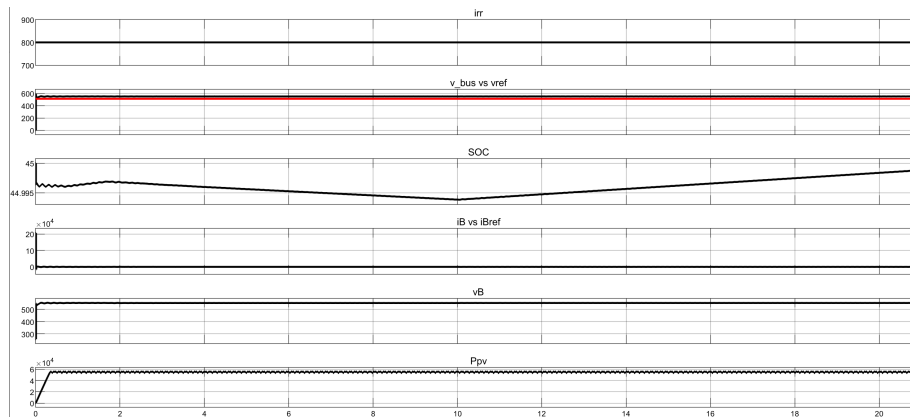
Το φωτοβολταϊκό σύστημα και σε αυτήν την περίπτωση συμβάλει στην παραγωγή ισχύος ακατάπαυστα (Εικόνα 7.113), μιας και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε αυτό δεν αλλάζει. Πέραν αυτού, δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί την αλλαγή στο φορτίο ζήτησης, μιας και η περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας αποθηκεύεται στην μπαταρία.



Εικόνα 7.113: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου B2.

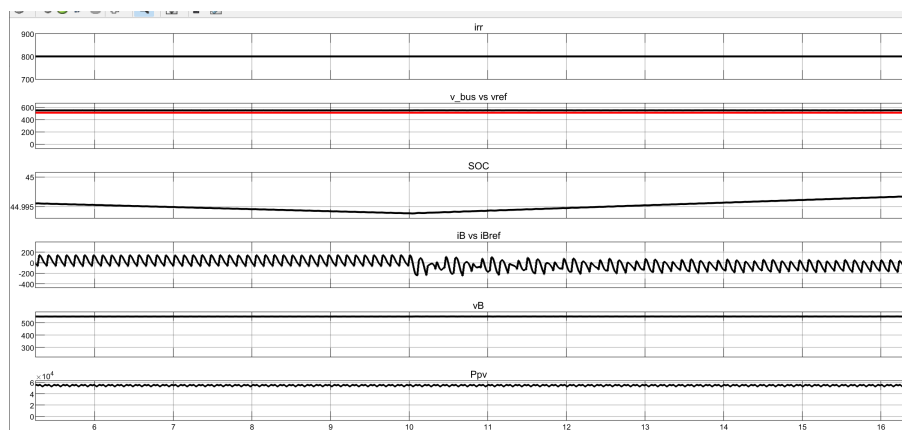
Η αλλαγή στο φορτίο γίνεται εμφανής κυρίως στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Με δεδομένο ότι η ζητούμενη ενέργεια πλέον μειώνεται ενώ την ίδια στιγμή η παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα μένει σταθερή, είναι λογικό ότι το σύστημα αποθήκευσης θα αποθηκεύσει την περισσευούμενη ενέργεια. Αυτό μάλιστα φαίνεται και από το διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 7.114), στο οποίο μετά την χρονική στιγμή της αλλαγής του φορτίου, η κλίση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας αλλάζει, πράγμα που υποδεικνύει την μετάβαση σε κατάσταση φόρ-

τισης.



Εικόνα 7.114: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας του σεναρίου B2.

Ειδικότερα, και με χρήση του zoom, διακρίνεται ότι το ρεύμα της μπαταρίας παίρνει αρνητικές τιμές μετά το χρονικό διάστημα των 10 δευτερολέπτων (Εικόνα 7.115) και ύστερα από ένα πολύ σύντομο μεταβατικό φαινόμενο.



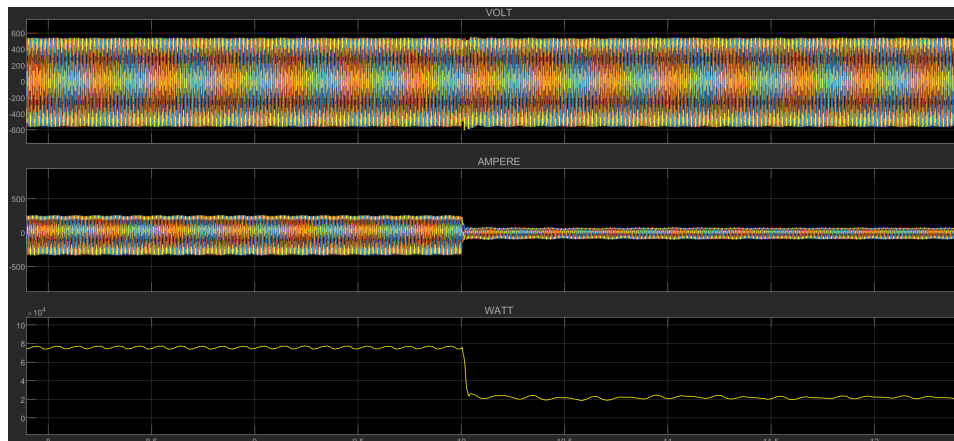
Εικόνα 7.115: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας του σεναρίου B2 (zoom).

Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μας δίνει πληροφορία για τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργεί ο αντιστροφέας (Εικόνα 7.116). Πράγματι, η ισχύς που μεταφέρεται από αυτόν είναι αρκετά χαμηλότερη μετά την αλλαγή στο φορτίο μας.



Εικόνα 7.116: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B2.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.117), διακρίνεται ότι σχεδόν όλη η ζητούμενη μείωση της παραγωγής ήρθε από την αντίστοιχη μείωση στην μεταφερόμενη ισχύ του αντιστροφέα προς το μικροδίκτυο. Αυτό έρχεται και σε συμφωνία με το διάγραμμα της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.



Εικόνα 7.117: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B2 (zoom).

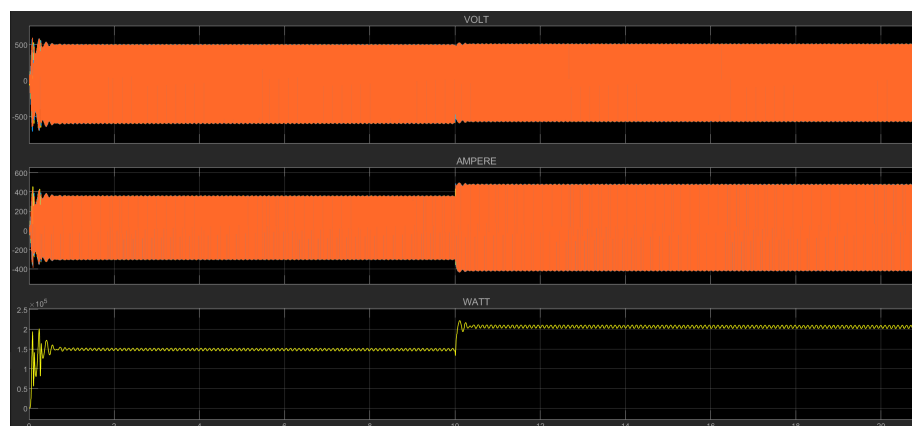
Ο ανορθωτής και σε αυτήν την περίπτωση δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές, πόσο μάλλον σε αυτό το σενάριο όπου εξετάζεται η μείωση της παραγωγής. Και πάλι, η λειτουργία του περιορίζεται στις αρχικές τιμές του χρονικού ορίζοντα του σεναρίου μας, βοηθώντας στην γρήγορη προσαρμογή του μικροδικτύου στις απαιτήσεις του φορτίου. Το διάγραμμα που παρουσιάζει την μεταφορά ενέργειας προς το σύστημα αποθήκευσης μέσω αυτού είναι το ακόλουθο (Εικόνα 7.118):



Εικόνα 7.118: Μεταφορά ισχύος μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B2.

7.11 Σενάριο B3

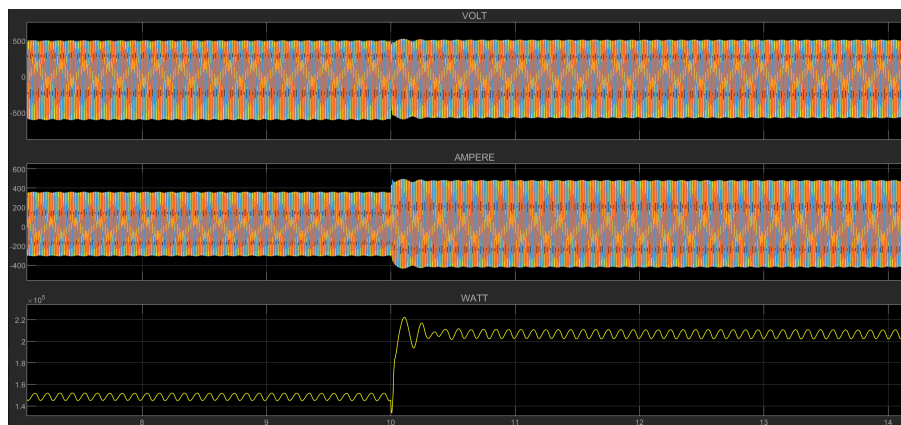
Σε αυτό το σενάριο, θα εξετασθεί η απόκριση του μικροδικτύου υπό την παρουσία των δυο ανεμογεννητριών με την ταυτόχρονη απουσία της ντιζελογεννήτριας. Πρόκειται ουσιαστικά, για ένα αρκετά φιλόδοξο σενάριο καθώς η συνολική παραγωγή βασίζεται μονάχα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το φορτίο προς κάλυψη θα είναι της τάξης των 150 kW, ενώ στην συνέχεια θα μελετηθεί τη προσαύξησή του κατά 60 kW με σκοπό να φτάσει σε συνολική προσφορά ισχύος τα 210 kW. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν σχετικά με την παραγόμενη ισχύ που μας έδωσε το σύστημα (Εικόνα 7.119) είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 7.119: Συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου B3.

Αυτό που παρατηρείται έρχεται σε συμφωνία με τα σχόλια που είχαν προηγηθεί για το αντίστοιχο σενάριο A3. Το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο που σε άλλα σενάρια είχε μεγαλύτερη διάρκεια και σημαντικά μεγαλύτερο πλάτος εδώ δεν υπάρχει. Αντί αυτού, το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο είναι μικρής διάρκειας ενώ η μικροκυμάτωση που γενικά παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις, εδώ είναι φαινομενικά μικρότερη.

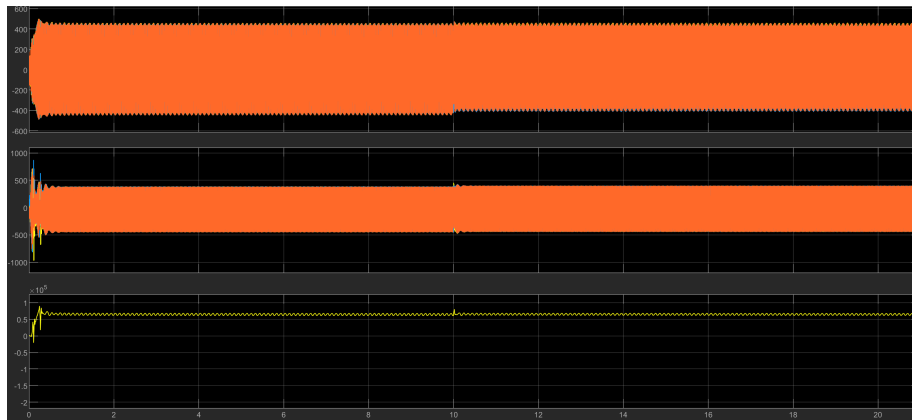
Η μετάβαση από τα 150 kW στα 210 kW είναι πολύ πιο ομαλή, ενώ η τάση και το ρεύμα συμπεριφέρονται με απόλυτη σταθερότητα. Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.120) παρατηρείται ότι η μετάβαση στην νέα ζητούμενη ισχύ είναι πολύ γρήγορη και το συνολικό σύστημα την αντιμετωπίζει χωρίς πρόβλημα.



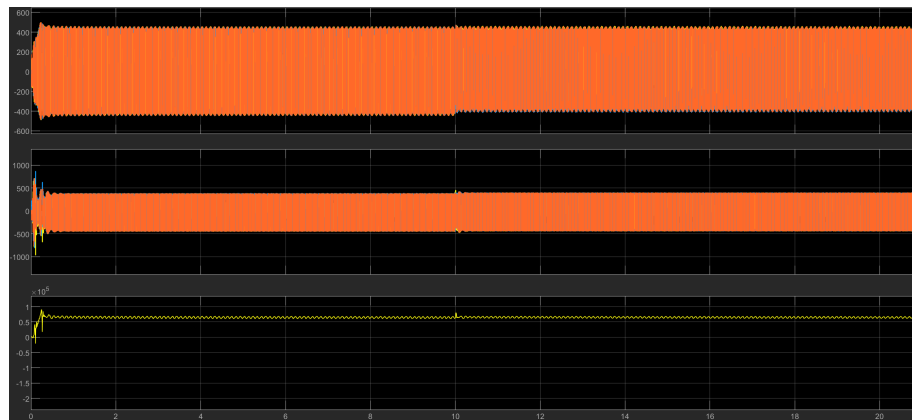
Εικόνα 7.120: Συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου B3.

Οι ανεμογεννήτριες, όπως και στα προηγούμενα σενάρια αυτής της κατηγορίας, συμπεριφέρονται με την ίδια λογική (Εικόνα 7.121-7.122). Η έλλειψη της ντιζελογεννήτριας έχει απλουστεύσει αρκετά την συνολική πολυπλοκότητα του μικροδικτύου και αυτό φαίνεται τόσο στο αρχικό μεταβατικό φαινόμενο του συνολικού συστήματος (όπως και προαναφέρθηκε), αλλά και στα μεταβατικά φαινόμενα τους που είναι αρκετά μικρότερα σε διάρκεια και σε έκταση πλάτους.

Μετά την διαταραχή, και οι δύο συνεχίζουν σχεδόν χωρίς να αντιληφθούν το παραμικρό την ομαλή τους λειτουργία.

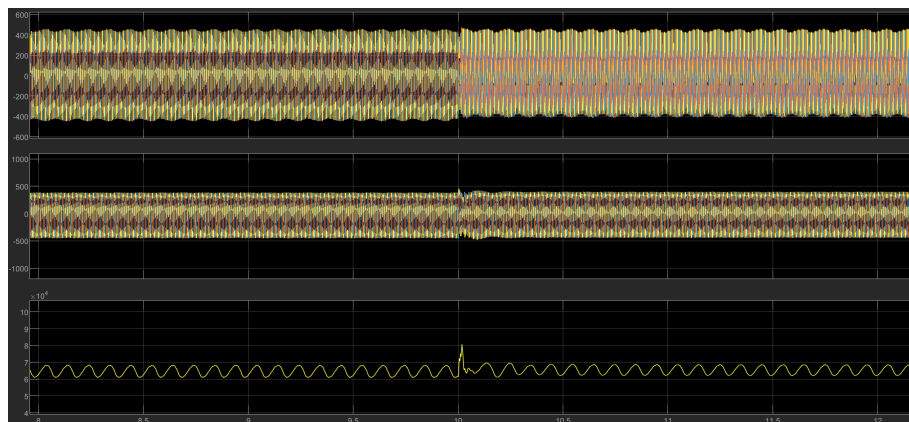


Εικόνα 7.121: Παραγωγή ισχύος από την πρώτη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B3.

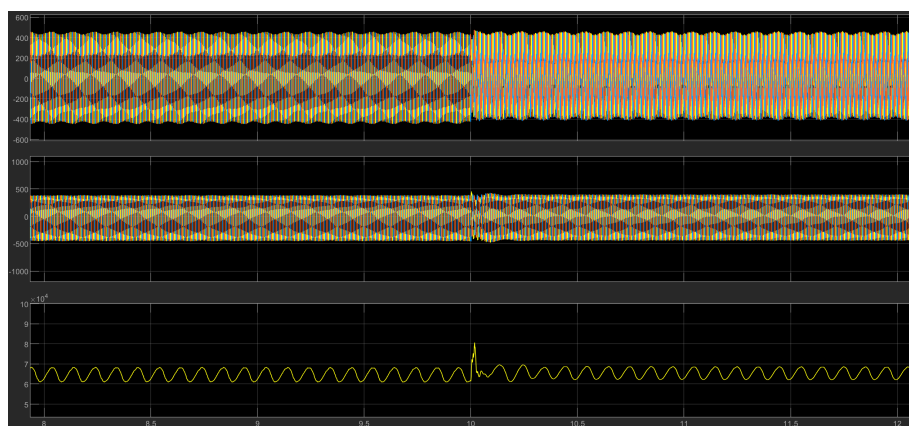


Εικόνα 7.122: Παραγωγή ισχύος από την δεύτερη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B3.

Με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.123-7.124) γίνεται κατανοητό το πόσο ομαλά επιτυγχάνεται η μετάβαση από το ένα ζητούμενο φορτίο στο άλλο, πράγμα που είχε γίνει ξανά αντιληπτό στο σενάριο A3, και έρχεται να επιβεβαιώσει την απλο-ύστευση της πολυπλοκότητας του συστήματος.

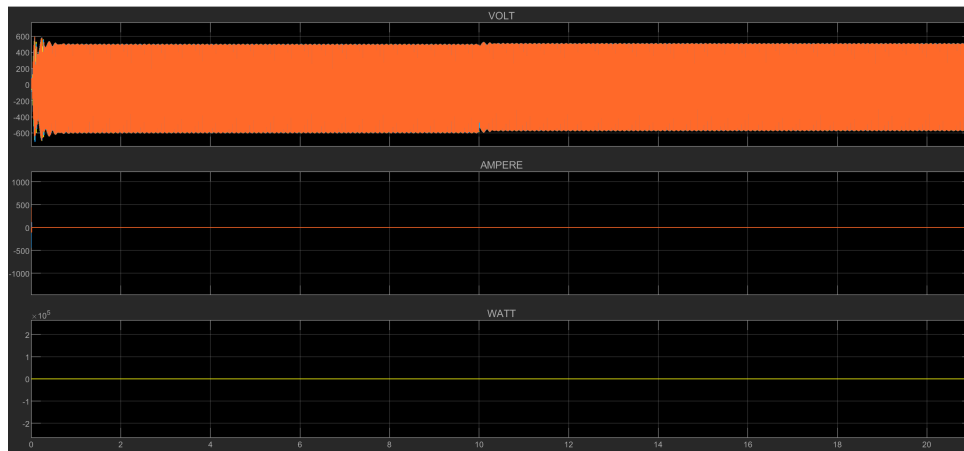


Εικόνα 7.123: Παραγωγή ισχύος από την πρώτη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B3 (zoom).



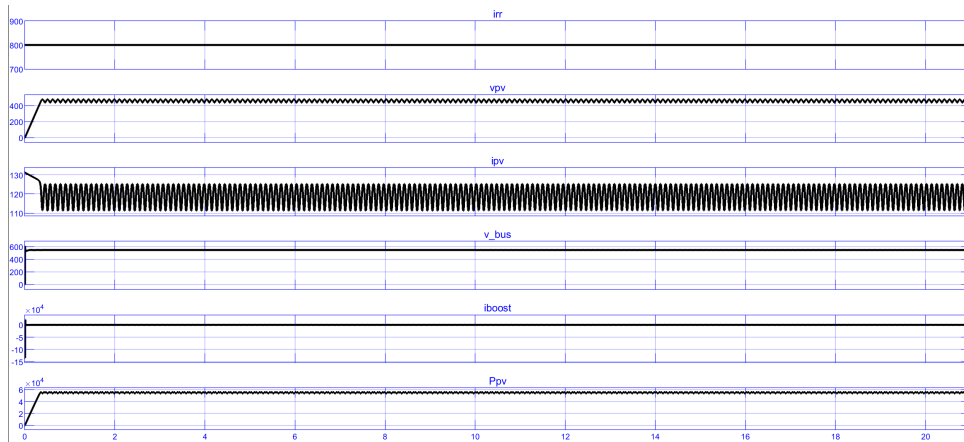
Εικόνα 7.124: Παραγωγή ισχύος από την δεύτερη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B3 (zoom).

Βασική προϋπόθεση σε αυτό το σενάριο είναι η απενεργοποίηση της ντιζελογεννήτριας από το μικροδίκτυο.



Εικόνα 7.125: Απενεργοποιημένη ντιζελογεννήτρια σεναρίου B3.

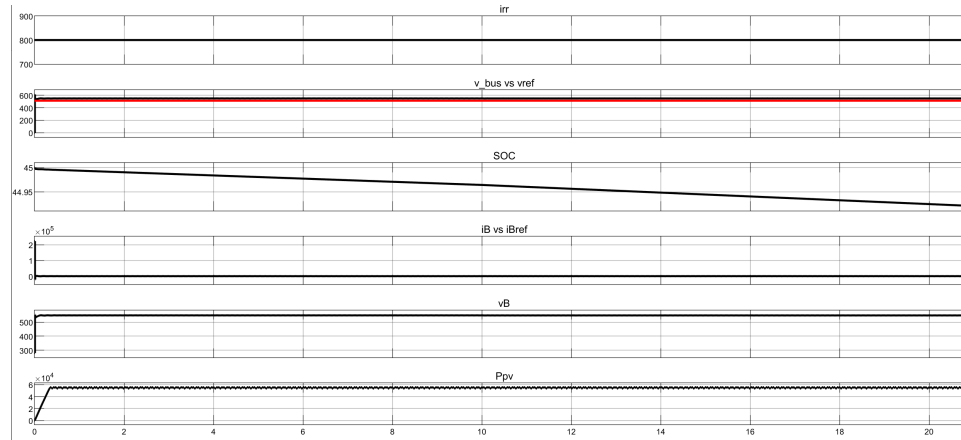
Το φωτοβολταϊκό σύστημα όπως είναι αναμενόμενο δεν επηρεάζεται ούτε από την απουσία της ντιζελογεννήτριας, αλλά ούτε από την μεταβολή του φορτίου. Εφόσον οι συνθήκες λειτουργίας του μένουν οι ίδιες δεν υπάρχει λόγος να αλλάξει η παραγωγή του (Εικόνα 7.126).



Εικόνα 7.126: Παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκού συστήματος σεναρίου B3.

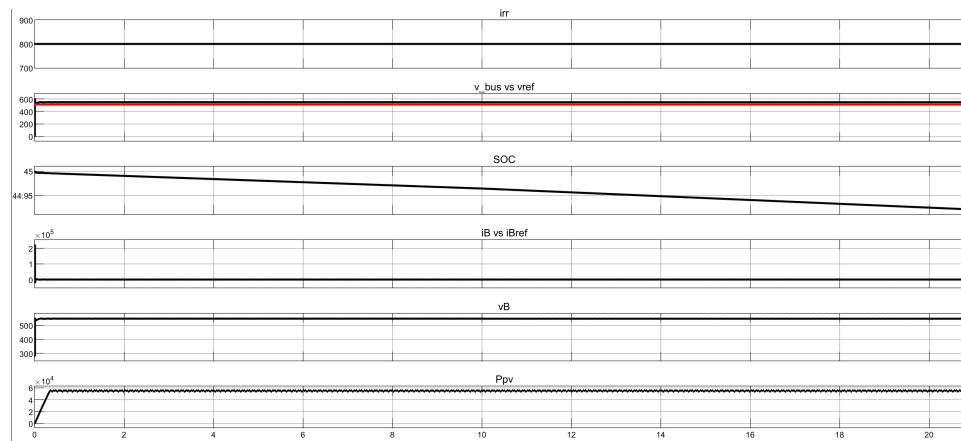
Από την άλλη, το σύστημα αποθήκευσης αντιλαμβάνεται σε μεγάλο βαθμό την απουσία της γεννήτριας, καθώς η επιπλέον κάλυψη του φορτίου οδηγεί στην επιπλέον εκφόρτισή του (Εικόνα 7.127). Να σημειωθεί η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι ήδη από την αρχή λειτουργίας του σεναρίου σε πτωτική κλίση, επειδή το κενό ισχύος που έχει αφήσει με την έξοδό της η γεννήτρια αναγκάζεται να το καλύψει η ίδια. Η περαιτέρω αύξηση του φορτίου οδηγεί σε μια εκτενέστερη

παροχή ισχύος προς το μικροδίκτυο.



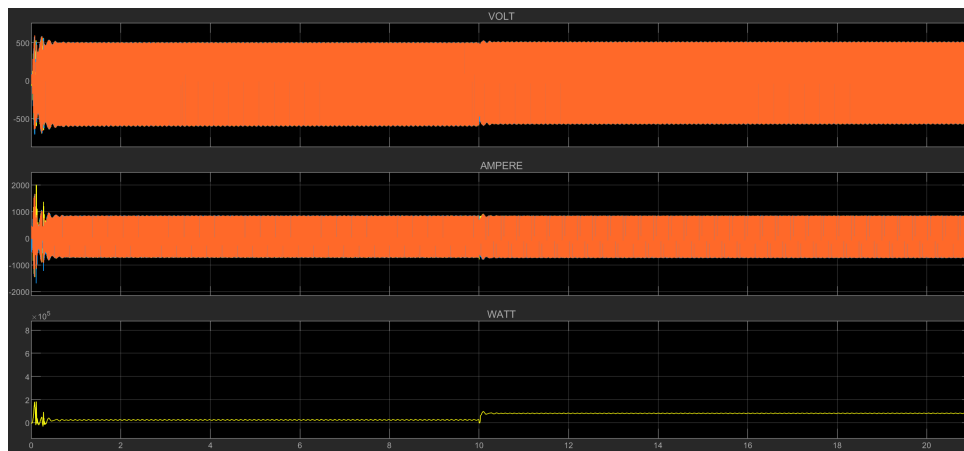
Εικόνα 7.127: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας του σεναρίου B3.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.128) παρατηρείται ότι το ρεύμα που δίνει η μπαταρία είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις προηγούμενες περιπτώσεις, επαληθεύοντας ουσιαστικά αυτό που μόλις αναλύθηκε.



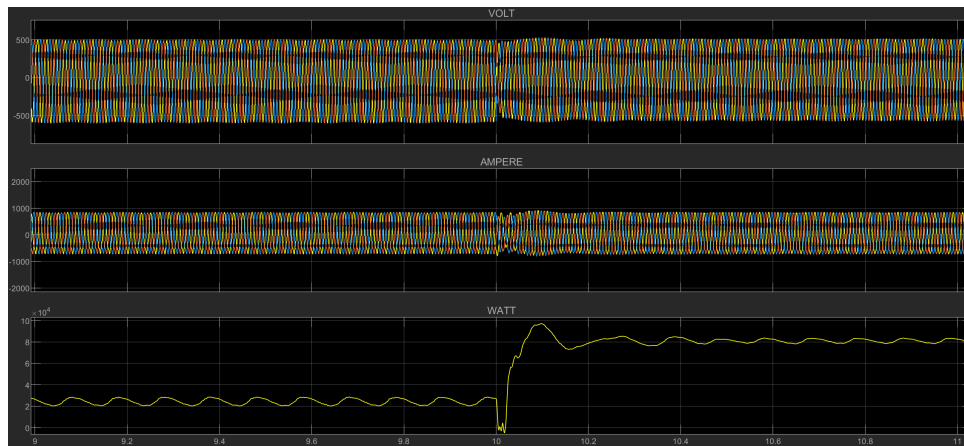
Εικόνα 7.128: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας του σεναρίου B3 (zoom).

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, καθώς η εκφόρτιση της μπαταρίας γινόταν με μεγαλύτερο ρυθμό, αναμένεται ότι η μεταφερόμενη ισχύ από τον inverter θα αυξηθεί (Εικόνα 7.129). Αυτό επιβεβαιώνεται και σε αυτήν την περίπτωση όπου υπάρχει μια πολύ ομαλή ροή ισχύος προς το μικροδίκτυο καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του. Ειδικότερα, την χρονική στιγμή της αλλαγής του φορτίου παρατηρείται ότι η μεταφερόμενη ισχύ αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό, προκειμένου να καλυφθούν οι νέες ανάγκες.



Εικόνα 7.129: Μεταφορά ισχύος από τον αντιστροφέα του σεναρίου B3.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι το γεγονός ότι η τάση και το ρεύμα φαίνονται σχεδόν να μην αλλάζουν. Στην πραγματικότητα αλλάζουν, αλλά η μεταβολή του δεν είναι εύκολα κατανοητή. Με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.130) φαίνεται ότι συμβαίνει αυτό, όπως επίσης λαμβάνεται και πληροφορία σχετικά με το ακριβές ποσό της ισχύος που μεταφέρθηκε προς το μικροδίκτυο.



Εικόνα 7.130: Μεταφορά ισχύος από τον αντιστροφέα του σεναρίου B3 (zoom).

Ο ανορθωτής όπως είναι αναμενόμενο χρησιμοποιείται ακόμη λιγότερο στο συγκεκριμένο σενάριο (Εικόνα 7.131). Αυτό επειδή, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, το μεταβατικό φαινόμενο σε σύγκριση με τα σενάρια όπου η ντιζελογεννήτρια ήταν παρούσα είναι αισθητά πιο μικρό σε ισχύ αιχμής. Ως συνέπεια αυτού, το διάγραμμα που περιγράφει το ποσό της ισχύος που μεταφέρθηκε από το μικροδίκτυο πίσω στο

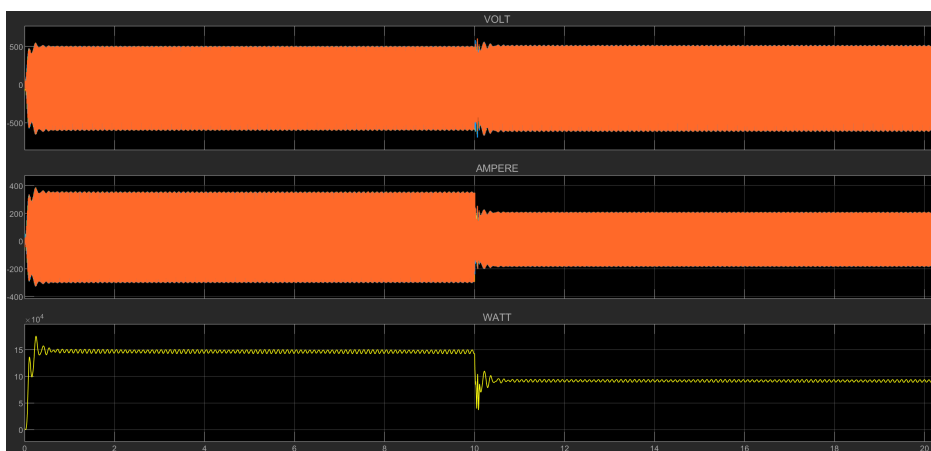
σύστημα αποθήκευσης είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 7.131: Μεταφορά ισχύος από τον ανορθωτή του σεναρίου B3.

7.12 Σενάριο B4

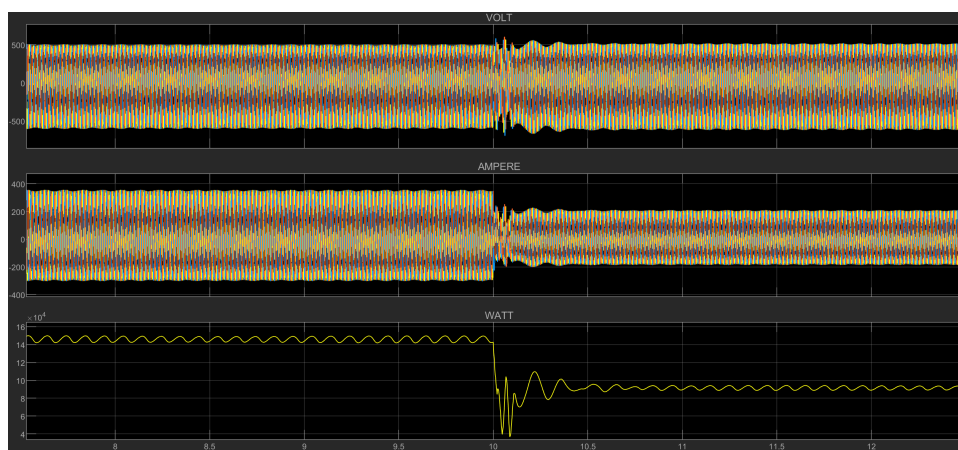
Στο συγκεκριμένο σενάριο, όμοια με το σενάριο A4, εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος στην περίπτωση όπου η ντιζελογεννήτρια βρισκόταν εκτός λειτουργίας όταν το απαιτούμενο φορτίο μειωνόταν από τα 150 kW στα μόλις 90 kW. Το σύστημα και σε αυτήν την περίπτωση ανταποκρίθηκε με μεγάλη επιτυχία και αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ισχύς του που ακολουθεί (Εικόνα 7.132):



Εικόνα 7.132: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου B4.

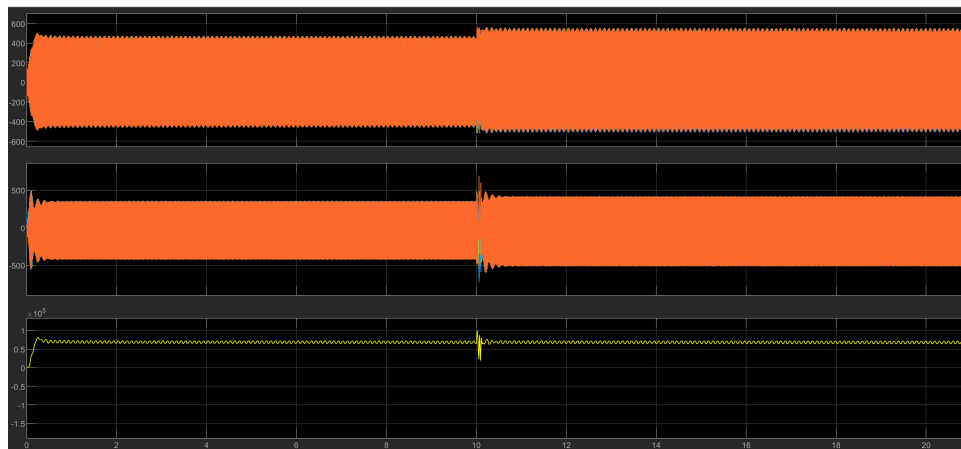
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η απουσία της ντιζελογεννήτριας διευκολύνει σχετικά το σύστημα σε ό,τι αφορά την πολυπλοκότητά του. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο θα είναι αισθητά μικρότερο σε διάρκεια και κατά πλάτος, όπως επίσης και ότι οι όποιες μεταβολές προκύψουν που θα οφείλονται στην αλλαγή του φορτίου θα επιλύονται άμεσα.

Το προηγούμενο διάγραμμα (Εικόνα 7.132) παρουσιάζεται η σταθερότητα που έχει το σύστημα και η ακρίβεια στην κάλυψη του συγκεκριμένου φορτίου κάθε χρονική στιγμή. Με τη χρήση του zoom πιο συγκεκριμένα (Εικόνα 7.133), διακρίνεται η σχετικά μικρή διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου που λαμβάνει χώρα εξαιτίας της πτώσης της ζήτησης κατά 60 kW.



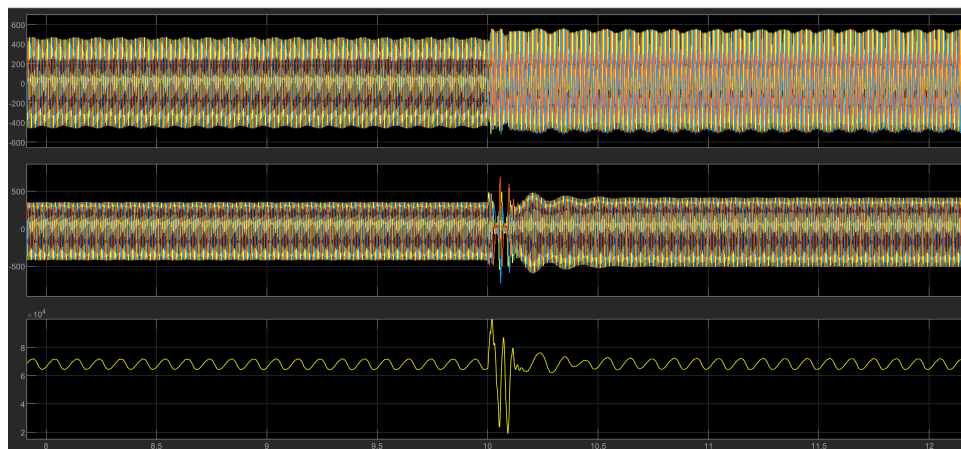
Εικόνα 7.133: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου B4 (zoom).

Οι ανεμογεννήτριες όμοια με τα προηγούμενα σενάρια είχαν παρόμοια μορφή, παρουσίασαν όμως κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (Εικόνα 7.134). Παρόλο που η συνολική ισχύς διατηρήθηκε σταθερή κατά την διάρκεια της μεταβολής, το πλάτος της τάσης και του ρεύματος έχουν αλλάξει. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό δεν είναι κάτι καινούργιο, αφού είχε παρατηρηθεί και σε προηγούμενο σενάριο ίσως όμως όχι σε τόσο έντονο βαθμό. Η αλλαγή των παθητικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις διάφορες τροποποιήσεις που συμβαίνουν στον μετασχηματιστή της εκάστοτε ανεμογεννήτριας δημιουργούν αυτά τα αποτελέσματα.



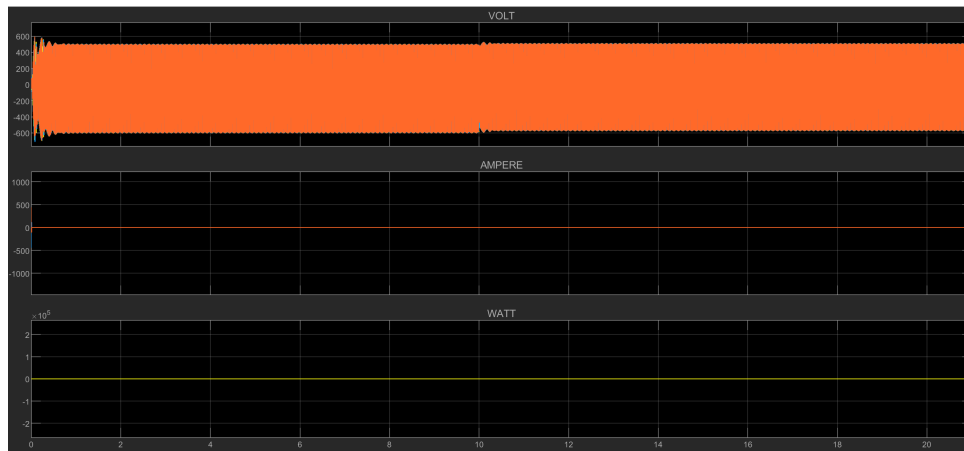
Εικόνα 7.134: Παραγόμενη ισχύς της εκάστοτε ανεμογεννήτριας σεναρίου B4.

Με την χρήση του zoom παρατηρούμε καλύτερα αυτό το φαινόμενο, όπως επίσης και το γεγονός ότι η συνολική ισχύς που αποδίδουν μένει σταθερή.



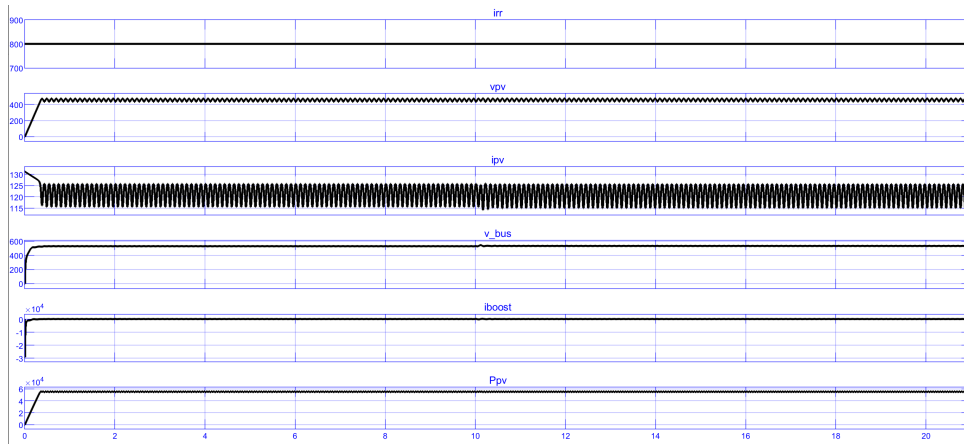
Εικόνα 7.135: Παραγόμενη ισχύς της εκάστοτε ανεμογεννήτριας σεναρίου B4 (zoom).

Όμοια με το προηγούμενο σενάριο, η παραγωγή από την ντιζελογεννήτρια είναι μηδενική.



Εικόνα 7.136: Η παραγωγή ισχύος της ντιζελογεννήτριας του σεναρίου B4.

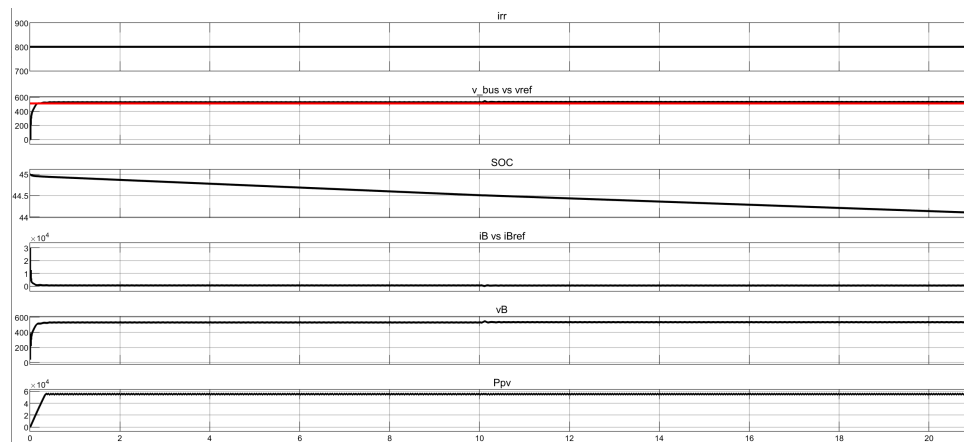
Το φωτοβολταϊκό σύστημα (Εικόνα 7.137) και σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσιάζει ευαισθησία στην αλλαγή του φορτίου, καθώς οι προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται για την ορθή λειτουργία του ισχύουν σε υψηλό βαθμό. Η μείωση του φορτίου δεν φαίνεται σε κάποιο σημείο της παραγόμενης ενέργειας.



Εικόνα 7.137: Η παραγωγή ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου B4.

Ιδιαίτερο νόημα έχει να παρατηρηθεί το διάγραμμα της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (Εικόνα 7.138). Αυτό που διακρίνεται είναι η εκφόρτιση της μπαταρίας (μέσω της απότομης κλίσης της) μέχρι της χρονική στιγμή των 10 δευτερολέπτων. Παρόλο που το φορτίο μειώνεται στα 90 μόλις kW, η αλλαγή της κλίσης είναι ναί μεν αντιληπτή, αλλά όχι τόσο μεγάλη σε σχέση τουλάχιστον με το αντίστοιχο σενάριο A4. Αυτό οφείλεται στην χρήση μη ιδανικών φίλτρων που χρησιμοποι-

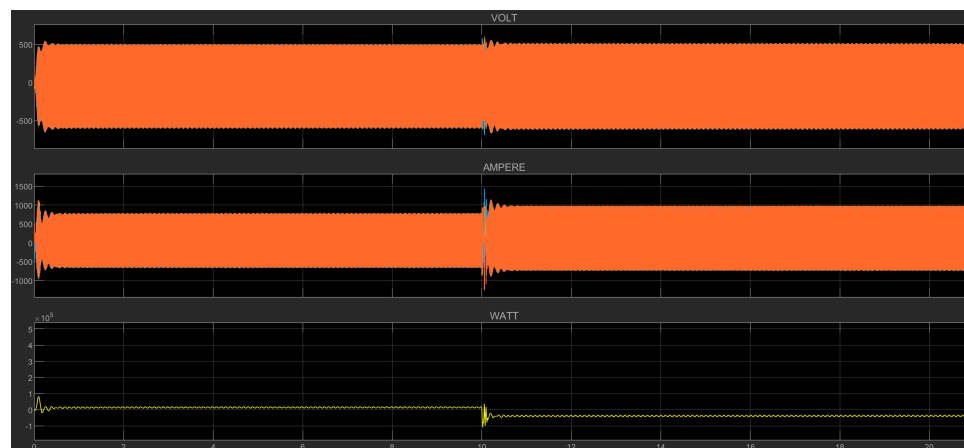
ήθηκαν προκειμένου η συνολική αποδιδόμενη ισχύς του μικροδικτύου να βρίσκεται σε θέση να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου.



Εικόνα 7.138: Η κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης του σεναρίου B4.

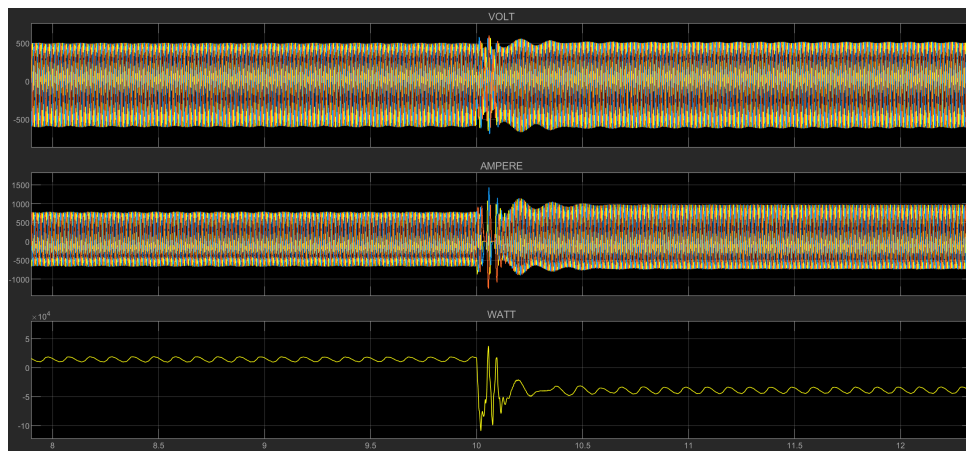
Η μείωση της παραγόμενης ισχύος έρχεται σε μεγάλο βαθμό και σε αυτό το σενάριο από την αρχή λειτουργίας του converter, ο οποίος ενσωματώνει τον inverter και τον rectifier (Εικόνα 7.139). Αυτό είναι γενικά αποδεκτό, καθώς το υποσύνολο συστήματος αποθήκευσης-φωτοβολταϊκών-converter είναι άμεσα ανταποκρινόμενο και πιο εύκολα διαχειρίσιμο από το μικροδίκτυο, μιας και δεν αλλάζουν οι παράμετροι λειτουργίας του.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, το ρεύμα μετά την αλλαγή του φορτίου δείχνει να αυξάνεται. Αυτό όμως δεν προβληματίζει, καθώς ουσιαστικά αλλάζει η φορά του, με συνέπεια να έχουμε αντίθετη ροή ισχύος αισθητά μεγαλύτερη (θα αναλυθεί σε επόμενα διαγράμματα).

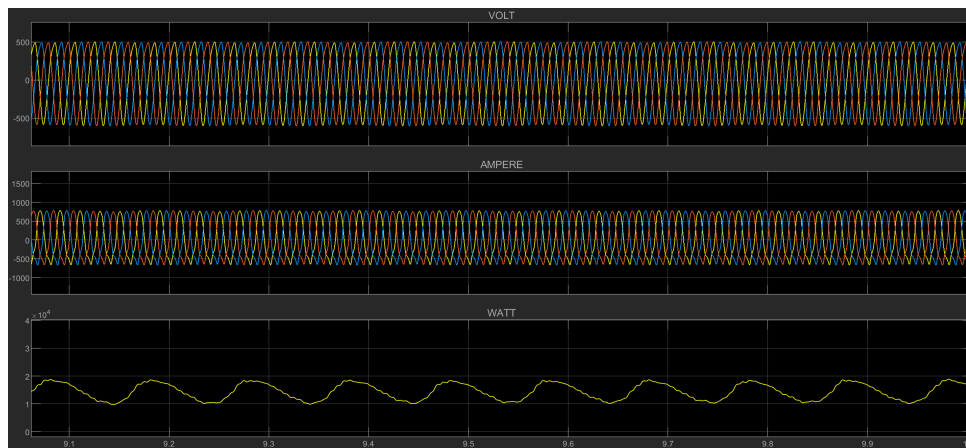


Εικόνα 7.139: Η μεταφορά ισχύος μέσω του converter του σεναρίου B4.

Με την χρήση του zoom παρατηρείται ότι σχεδόν όλη η απαιτούμενη μείωση στην παραγόμενη ισχύ ήρθε από αυτό το υποσύστημα (Εικόνα 7.140). Πριν την διαταραχή, ο converter λειτουργούσε σαν αντιστροφέας αποδίδοντας μια ισχύ της τάξης των 15 kW.



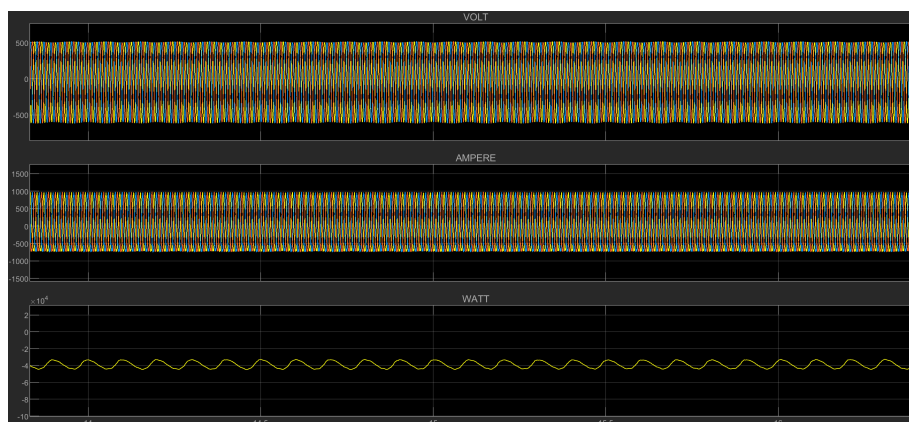
Εικόνα 7.140: Η μεταφορά ισχύος μέσω του converter του σεναρίου B4 (zoom).



Εικόνα 7.141: Η μεταφορά ισχύος μέσω του converter του σεναρίου B4 (zoom).
Λειτουργία αντιστροφέα.

Αντίστοιχα, μετά την διαταραχή υπάρχει μια αρνητική ροή ισχύος. Αυτό σημαίνει, ότι το σύστημα εκτελεί την αντιστροφή διαδικασία και αντί να τροφοδοτήσει το μικροδίκτυο με ενέργεια, μεταφέρει την περισσευούμενη ενέργεια πίσω στο σύστημα αποθήκευσης. Από τα 10 δευτερόλεπτα και μετά, ο converter λειτουργεί πλέον

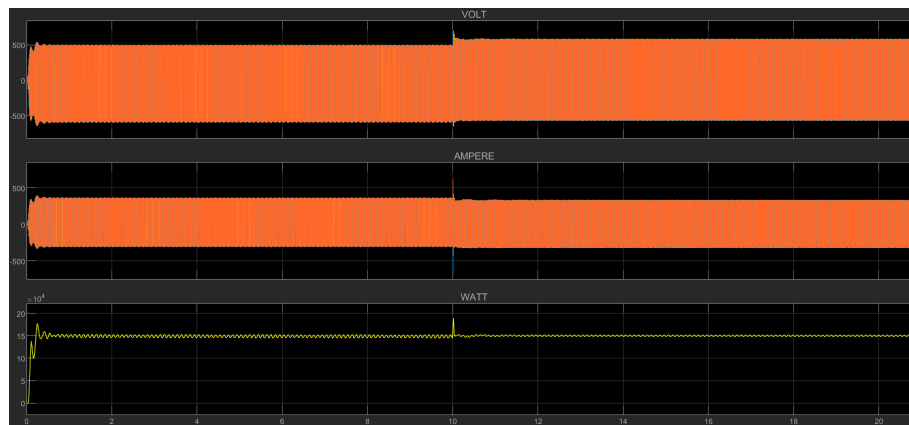
σαν ανορθωτής (Εικόνα 7.142). Το πλάτος του ρεύματος όπως προαναφέρθηκε είναι μεγαλύτερο, συγκριτικά με το πλάτος του πριν την διαταραχή. Το επόμενο διάγραμμα αιτιολογεί αυτό το φαινόμενο, αποδεικνύοντας την αυξανόμενη μεταφερόμενη ισχύ από τα 15 kW στα 40 kW (ισχύς κατά απόλυτη τιμή):



Εικόνα 7.142: Η μεταφορά ισχύος μέσω του converter του σεναρίου B4 (zoom). Λειτουργία ανορθωτή.

7.13 Σενάριο B5

Σε αυτό το σενάριο προσομοιώθηκε η εκκίνηση της ντιζελογεννήτριας όταν το μικροδίκτυο ήταν ήδη ενεργό. Για να επιτευχθεί αυτό, θεωρήθηκε σταθερό φορτίο σε όλη την διάρκεια του χρόνου ίσο με 150 kW και την γεννήτρια αρχικά εκτός λειτουργίας (Εικόνα 7.143).



Εικόνα 7.143: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου B5.

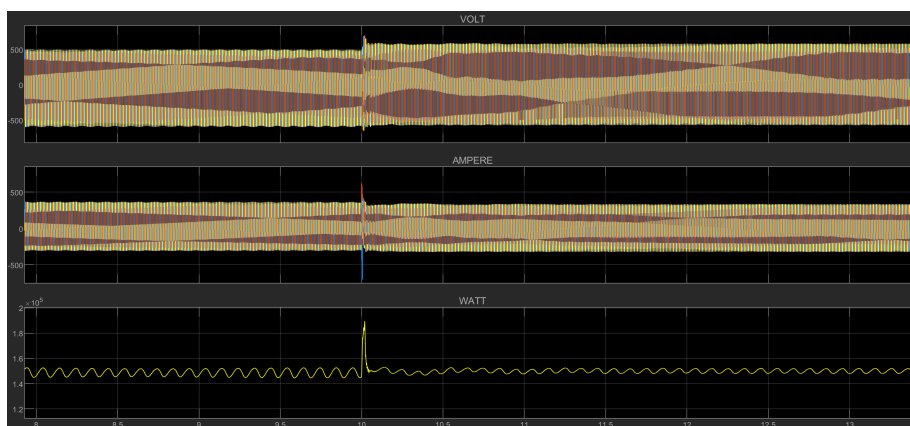
Την χρονική στιγμή 10 sec ενεργοποιήθηκε η γεννήτρια και καταγράφηκε ο τρόπος

που επηρέασε το μικροδίκτυο και τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στα εκάστοτε components και άρα και κατά συνέπεια στην αποδιδόμενη ισχύ του συστήματος.

Η στιγμή της εισαγωγής της γεννήτριας στο μικροδίκτυο που λειτουργεί ήδη προκαλεί πολλές διαταραχές στα διάφορα υποσυστήματα. Εκ πρώτης όψεως, το πιο χαρακτηριστικό είναι η αλλαγή που παρατηρείται στο πλάτος της τάσης και του ρεύματος.

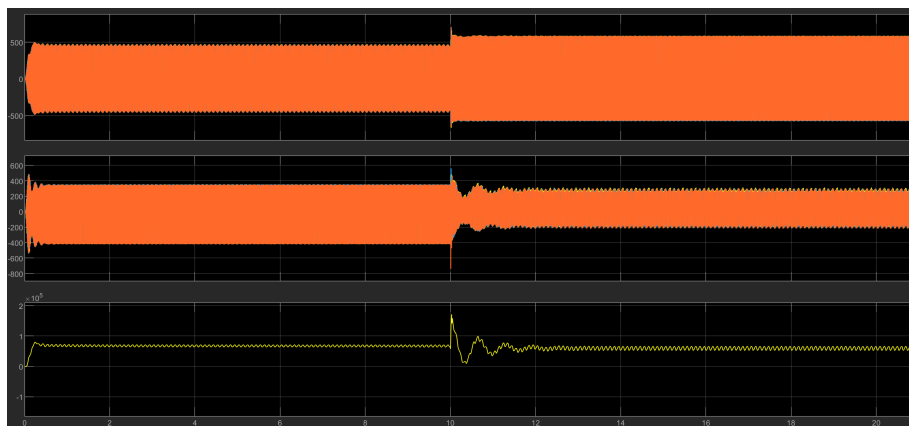
Σε κάθε περίπτωση όμως η ένταξη της γεννήτριας, που γενικά θεωρείται μια αρκετά στρεσογόνα διαδικασία για το μικροδίκτυο, επιτυγχάνεται αρκετά εύκολα, αφού το μεταβατικό φαινόμενο που αναμενόταν να δημιουργηθεί επιλύθηκε ταχύτατα. Αυτό αποδεικνύει ότι το συνολικό σύστημα είναι αρκετά στιβαρό και ευσταθές.

Το πιο ενδιαφέρον όμως είναι, ότι με την ένταξη της γεννήτριας στο σύστημα, οι μικρο-χυματώσεις που υπήρχαν είναι εμφανώς μειωμένες (Εικόνα 7.144), ενώ ταυτόχρονα η αποδιδόμενη ισχύς προς το φορτίο παραμένει σταθερή στην ορισμένη της τιμή.



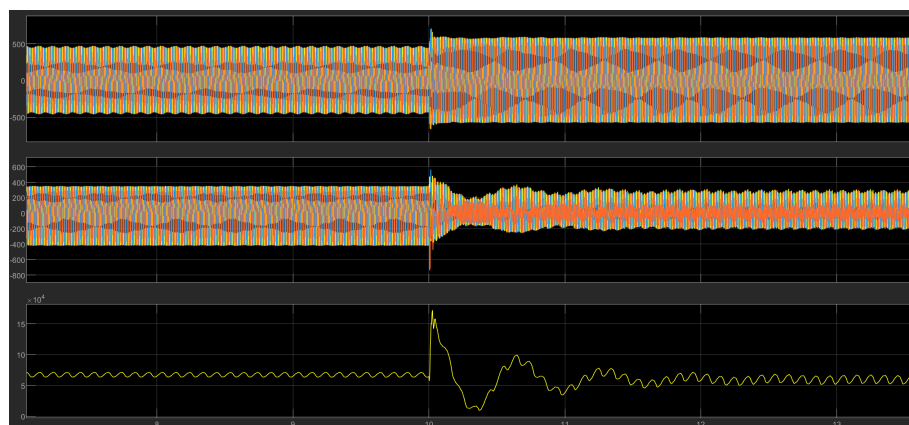
Εικόνα 7.144: Συνολική παραγόμενη ισχύς σεναρίου B5 (zoom).

Οι δύο ανεμογεννήτριες αντιλαμβάνονται σε μεγαλύτερο βαθμό την διαταραχή λόγω της διείσδυσης της γεννήτριας (Εικόνα 7.145). Το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο όπως είναι αναμενόμενο είναι σχεδόν ανύπαρκτο, ενώ δεν ισχύει το ίδιο και για την χρονική στιγμή όπου συνδέεται η γεννήτρια ντίζελ. Η είσοδος της γεννήτριας προκαλεί μεταβολές στην τάση και το ρεύμα τους με τέτοιο τρόπο όμως που η τελική παραγόμενη ισχύς να είναι και πάλι ίση με την αρχική.



Εικόνα 7.145: Παραγόμενη ισχύς της εκάστοτε ανεμογεννήτριας σεναρίου B5.

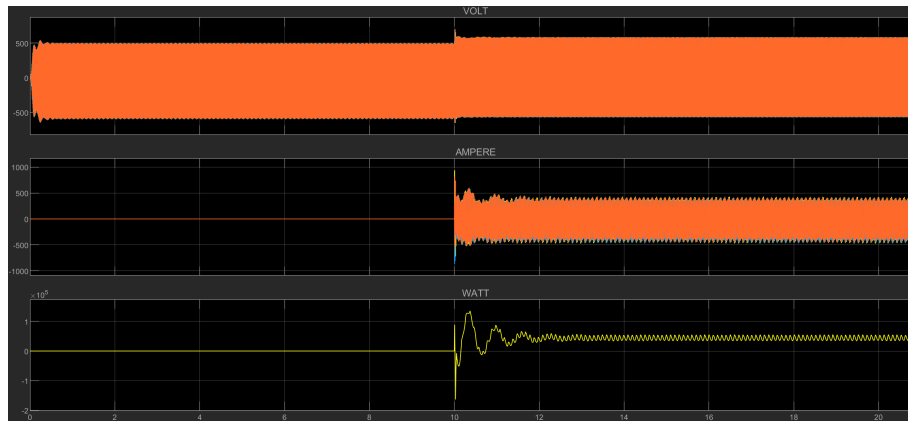
Σε αντίθεση με προηγούμενα σενάρια, οι αναταράξεις μετά τα 10 δευτερόλεπτα επιλύονται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ενώ με τη χρήση του zoom θα παρατηρηθεί ότι η παραγόμενη ισχύς τείνει να μειωθεί κατά λίγα kW (Εικόνα 7.146). Αυτό το φαινόμενο είχε παρατηρηθεί και σε προηγούμενα σενάρια, που όμως καθώς περνούσε ο χρόνος, το εξαγόμενο ποσό της ισχύος αποκαταστάθηκε στην αρχική του τιμή.



Εικόνα 7.146: Παραγόμενη ισχύς της εκάστοτε ανεμογεννήτριας σεναρίου B5 (zoom).

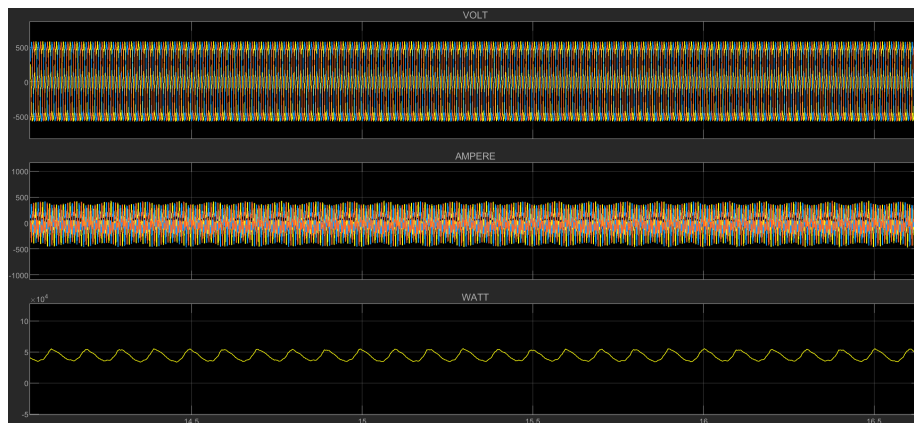
Το υποσύστημα το οποίο προκαλεί όλη την διαταραχή είναι φυσικά η ντιζελογεννήτρια. Κατά την ενεργοποίησή της, το μεταβατικό φαινόμενο που δημιουργείται γίνεται αισθητό σε σχεδόν όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα (όπως το φάνηκε και προηγουμένως στις ανεμογεννήτριες). Αυτό που παρατηρείται είναι ότι και σε αυτήν την περίπτωση η διαταραχή καθυστερεί λίγο να επιλυθεί με συνέπεια να μεταφέρεται σε όλο το σύστημα (Εικόνα 7.147).

Τελικά, μετά από χρόνο περίπου 2 δευτερολέπτων, η γεννήτρια παραγωγής βασισμένη σε τεχνολογία ντίζελ είναι πλήρως διασυνδεδεμένη και αποδίδει πλέον ισχύ πολύ κοντά στις ονομαστικές της τιμές, με μια σχετικά μικρή κυμάτωση.



Εικόνα 7.147: Παραγόμενη ισχύς της ντιζελογεννήτριας του σεναρίου B5.

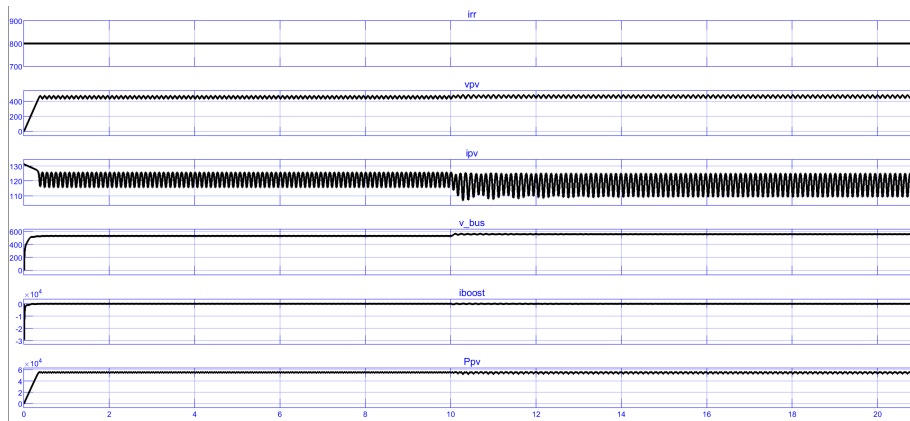
Με τη χρήση του zoom παρατηρείται το ακριβές ποσό που προσφέρει στο μικροδίκτυο (Εικόνα 7.148).



Εικόνα 7.148: Παραγόμενη ισχύς της ντιζελογεννήτριας του σεναρίου B5 (zoom).

Γενικά, η κάλυψη του φορτίου ήταν αρκετά ικανοποιητική πριν ακόμα την εισαγωγή της γεννήτριας. Το μεγαλύτερο ποσό της ισχύος προερχόταν από την παραγωγή των δυο ανεμογεννητριών και μόλις ένα μικρό μέρος το τροφοδοτούσε η μπαταρία. Με την είσοδο της ντιζελογεννήτριας στο σύστημα, ξαφνικά το μικροδίκτυο έχει ένα τεράστιο ποσό ισχύος που περισσεύει. Αυτό το ποσό της ισχύος, θα περάσει μέσω του ανορθωτή στον κοινό κόμβο του συστήματος των φωτοβολταϊκών και της μπαταρίας.

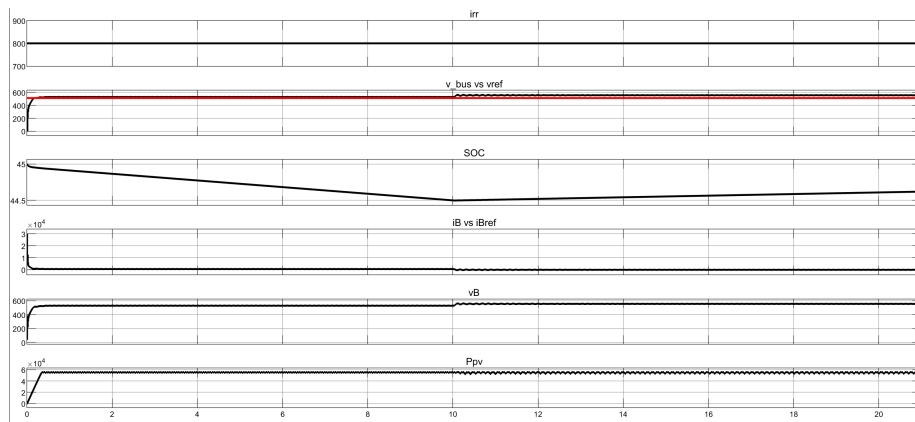
Με δεδομένο αυτό, ο DC-DC converter που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση και την μετατροπή της ζητούμενης τάσης και ρεύματος στις ονομαστικές ανάγκες της μπαταρίας επηρεάζεται σημαντικά, προκαλώντας μεταβολές στην ορθή λειτουργία του συστήματος. Και πάλι όμως, η συνολική παραγόμενη ισχύς δεν αλλάζει καθόλου, με μόνη διαφορά την ελαφρά μεγαλύτερη κυμάτωση που παρατηρείται στην παραγόμενη τάση και ρεύμα.



Εικόνα 7.149: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου B5.

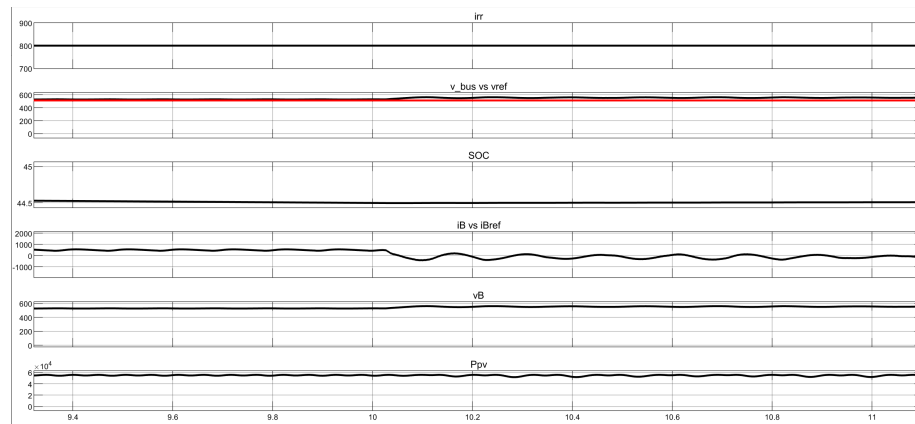
Η απόκριση του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης, παρόλο που είναι διασυνδεδεμένα στον ίδιο κόμβο (Εικόνα 7.149). Αυτό που αντιλαμβάνεται ο bidirectional converter της μπαταρίας είναι η αισθητά μεγαλύτερη τάση που υφίσταται το κοινό σημείο διασύνδεσης, με συνέπεια να οδηγείται έτσι σε κατάσταση φόρτισης.

Αυτή η συμπεριφορά είναι απολύτως σωστή και αναμενόμενη, καθώς αυτό αποδεικνύει ότι η περισσευούμενη ισχύς οδηγείται πίσω στο σύστημα αποθήκευσης. Αυτό άλλωστε φαίνεται και από το διάγραμμα της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (Εικόνα 7.150), όπου μετά την μεταβολή στην συνολική παραγωγή του μικροδικτύου (με την είσοδο της γεννήτριας), η κλίση αλλάζει.



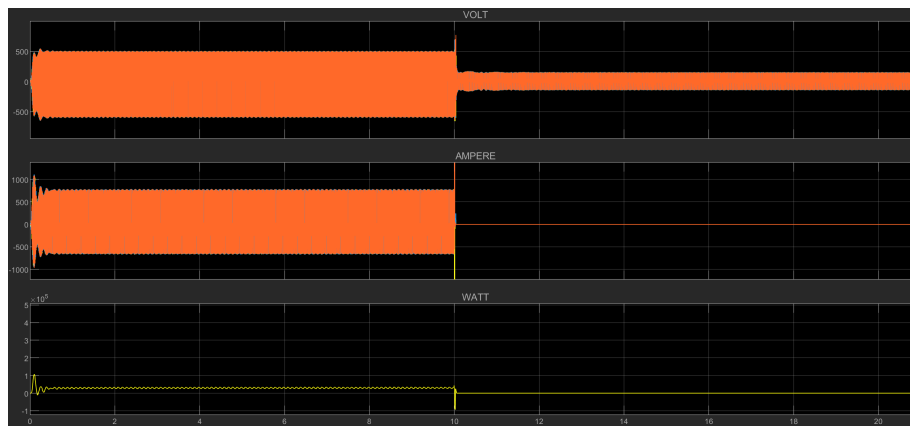
Εικόνα 7.150: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης του σεναρίου B5.

Κάνοντας χρήση του zoom (Εικόνα 7.151) παρατηρείται ότι το ρεύμα της μπαταρίας έχει πλέον αρνητική μέση τιμή, που επαληθεύει την προηγούμενη ανάλυσή μας .



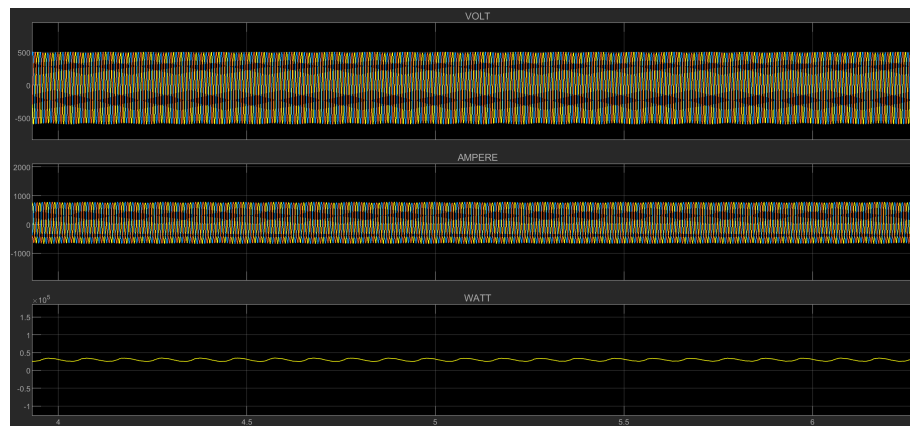
Εικόνα 7.151: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης του σεναρίου B5 (zoom).

Ο αντιστροφέας έχει την απόκριση που αναμένεται (Εικόνα 7.152). Κατά την διάρκεια που η ντιζελογεννήτρια είναι αποσυνδεδεμένη από το μικροδίκτυο, τροφοδοτεί με ισχύ που προέρχεται από το σύστημα αποθήκευσης το φορτίο. Την χρονική στιγμή όπου πλέον η γεννήτρια μπαίνει σε λειτουργία, λόγω της ύπαρξης επιπλέον παραγόμενης ισχύος του επιθυμητού φορτίου, απενεργοποιείται. Αυτή του η συμπεριφορά, έρχεται να μας επιβεβαιώσει και την αλλαγή της κλίσης στην κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης.



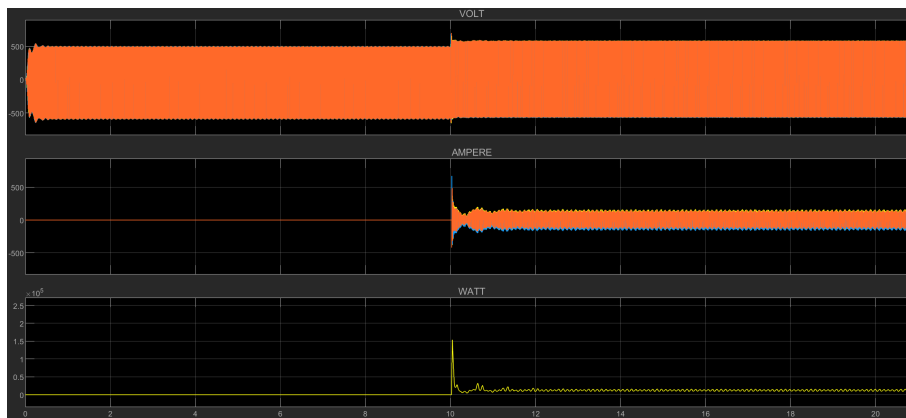
Εικόνα 7.152: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B5.

Το ακριβές ποσό που μετέφερε στο μικροδίκτυο για την κάλυψη του φορτίου φαίνεται ότι είναι αισθητά μικρότερο συγκριτικά με προηγούμενα σενάρια (Εικόνα 7.153).



Εικόνα 7.153: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B5 (zoom).

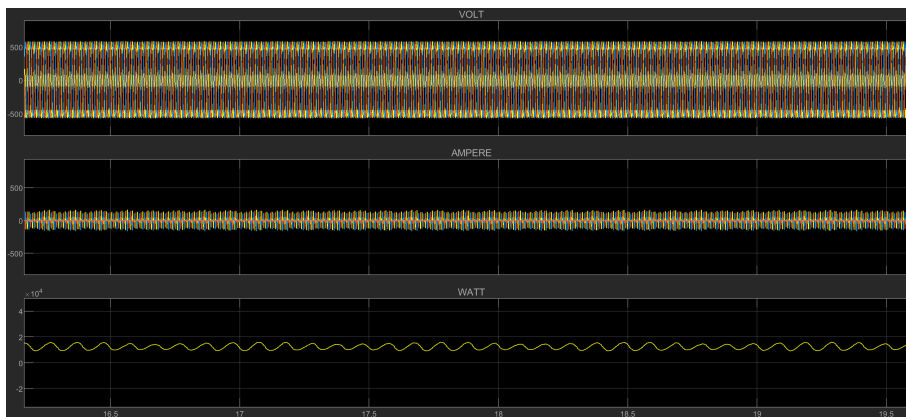
Αντίθετα θα λειτουργεί και ο ανορθωτής. Την στιγμή της έναρξης της γεννήτριας, παρατηρείται ότι τίθεται για πρώτη φορά σε λειτουργία και παραμένει ενεργοποιημένος για όλη την υπόλοιπη διάρκεια προσομοίωσης (Εικόνα 7.154). Η επιπλέον ισχύ που δημιουργεί η ένταξη της γεννήτριας οδηγείται μέσω αυτού πίσω στο σύστημα αποθήκευσης.



Εικόνα 7.154: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B5.

Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στο σύστημα αποθήκευσης είναι αρκετά σημαντικό της τάξης των 15 kW.

Ο αντιστροφέας πριν την αλλαγή παρείχε στο σύστημα περίπου 35 kW. Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν, η γεννήτρια παρήγαγε ισχύ κοντά στα ονομαστικά της μεγέθη, δηλαδή στα 50 kW. Επομένως, τα 15 kW που επιστρέφουν στο σύστημα αποθήκευσης είναι απόλυτα αναμενόμενα και λογικά.



Εικόνα 7.155: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B5 (zoom).

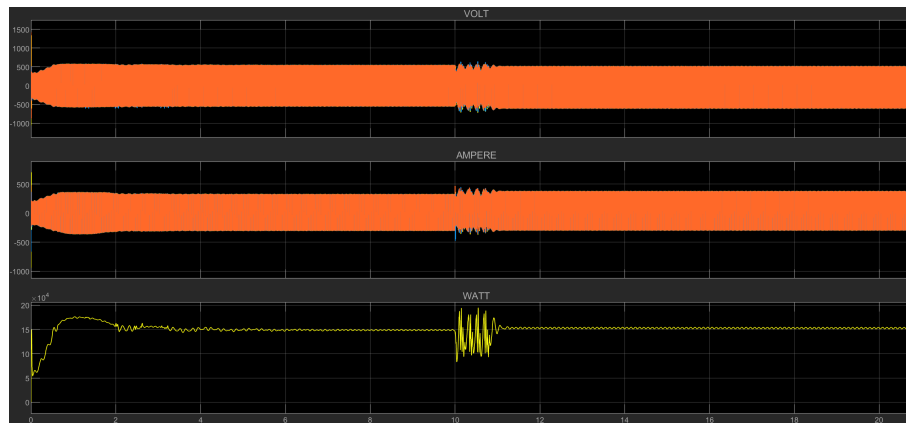
7.14 Σενάριο B6

Κατά αντιστοιχία με το σενάριο A6 όπου εξετάστηκε ο τρόπος συμπεριφοράς και αντίδρασης του συστήματος σε μια ενδεχόμενη απώλεια της ντιζελογεννήτριας, υπάρχει και αυτό το σενάριο, αυτή την φορά με την επιπλέον προσθήκη της ανεμογεννήτριας που χαρακτηρίζει όλη την κατηγορία των σεναρίων B.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος υπό σταθερό φορτίο 150 kW όταν αρχικά η γεννήτρια ήταν διασυνδεδεμένη με το μικροδίκτυο και υπό κάποια συνθήκη σφάλματος αποσυνδέθηκε (Εικόνα 7.156). Η στιγμή της αποσύνδεσης της έγινε στα 10 δευτερόλεπτα, και το μεταβατικό φαινόμενο που ακολούθησε παρουσίασε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

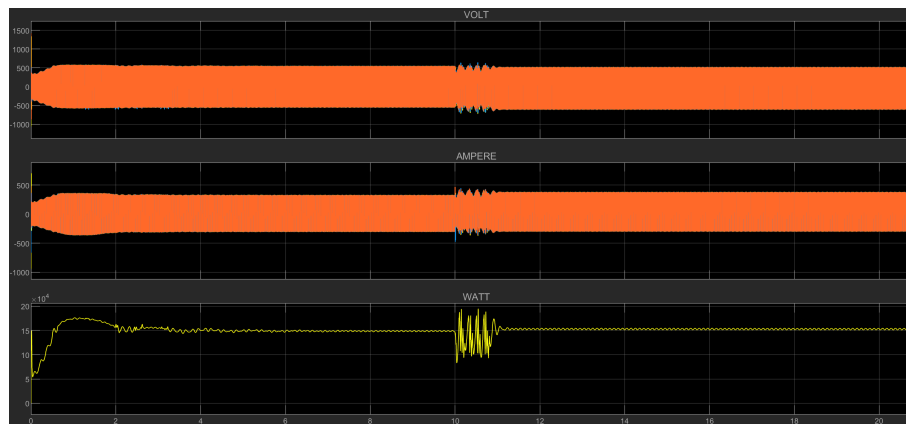
Σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα σενάρια, λόγω της πολυπλοκότητας και του μεγέθους του μικροδικτύου, το μεταβατικό φαινόμενο μετά την αποσύνδεση ήταν εκτεταμένης διάρκειας και οι συνέπειές του ήταν αρκετά αισθητές ακόμα και στην συνολική προσφερόμενη ισχύ στο φορτίο. Οι μικρο-κυματώσεις που συναντούσαμε υπό άλλες προϋποθέσεις έδωσαν τη σειρά τους σε σχετικά ισχυρές ταλαντώσεις στην παραγωγή ισχύος, ευτυχώς όμως για σύντομο χρονικό διάστημα (μόλις ενός δευτερολέπτου).

Υπό πραγματικές συνθήκες, μια τέτοια μεταβολή στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος περιμένουμε ότι θα έχει ισχυρό αντίκτυπο στα επί μέρους components και κατά συνέπεια και στην ίδια την παραγωγή. Το γεγονός ότι η τελική ισχύς που φτάνει στο φορτίο είχε αυτή την μορφή, μπορεί αρχικά να προβληματίζει, όμως παρ' όλα αυτά δεν παύει να επιλύεται ταχύτατα.



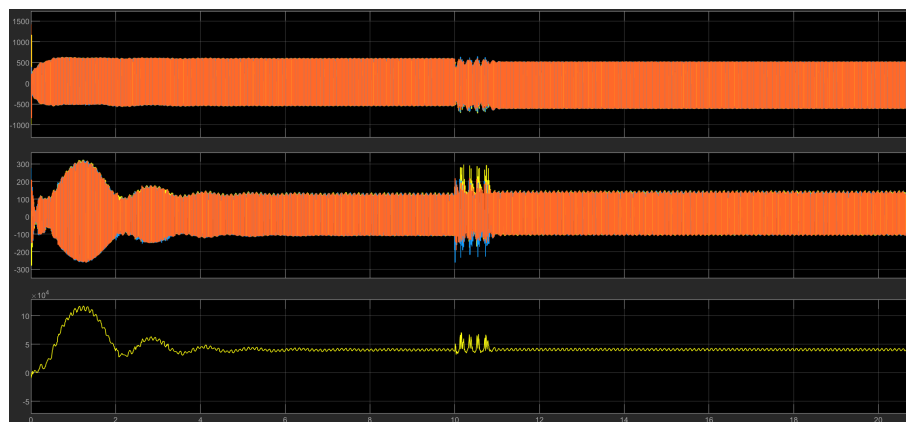
Εικόνα 7.156: Συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου B6.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.157) παρατηρείται καλύτερα η έκταση που έχει αυτό το μεταβατικό φαινόμενο. Η συνολική ισχύς και σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται αρχικά να αυξάνεται ελαφρώς μετά την διαταραχή, όμως όπως και σε προηγούμενα σενάρια επιστρέφει στις αρχικές της τιμές.

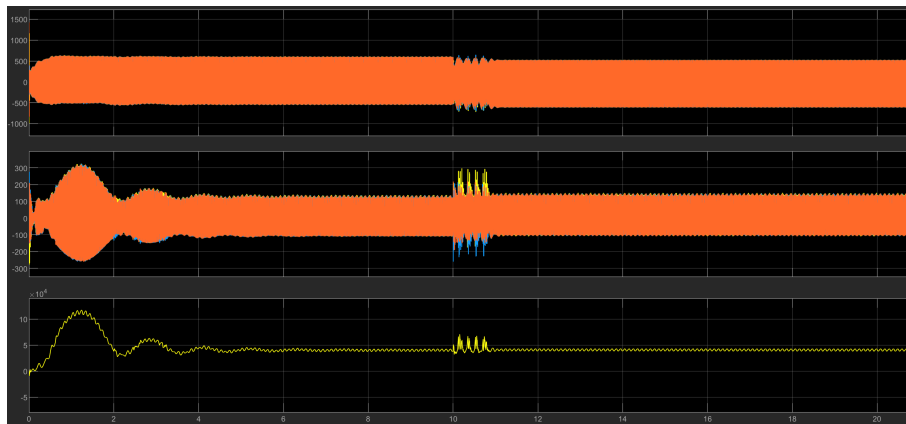


Εικόνα 7.157: Συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου B6 (zoom).

Οι δύο ανεμογεννήτριες όπως είναι αναμενόμενο επηρεάζονται από την ξαφνική αποσύνδεση της γεννήτριας (Εικόνα 7.158-7.159). Και σε αυτές είναι εμφανής η ύπαρξη ισχυρού μεταβατικού φαινομένου, που όμως επιλύεται σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές στην μετέπειτα παραγόμενη ισχύ.

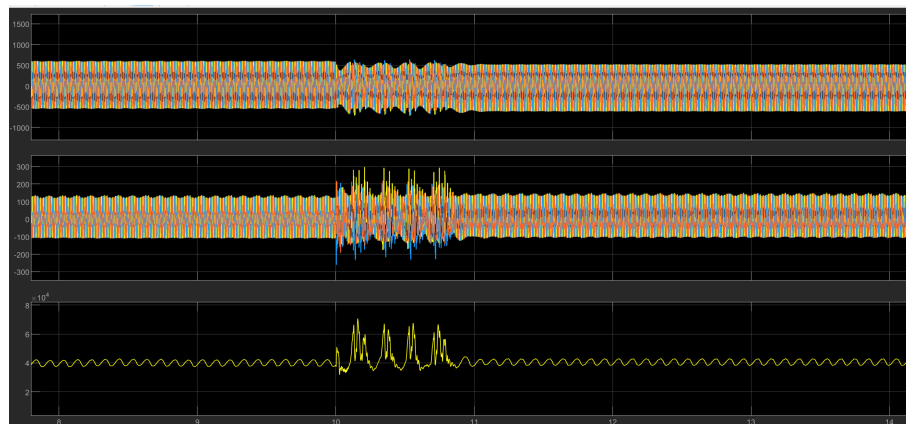


Εικόνα 7.158: Παραγόμενη ισχύς πρώτης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B6.

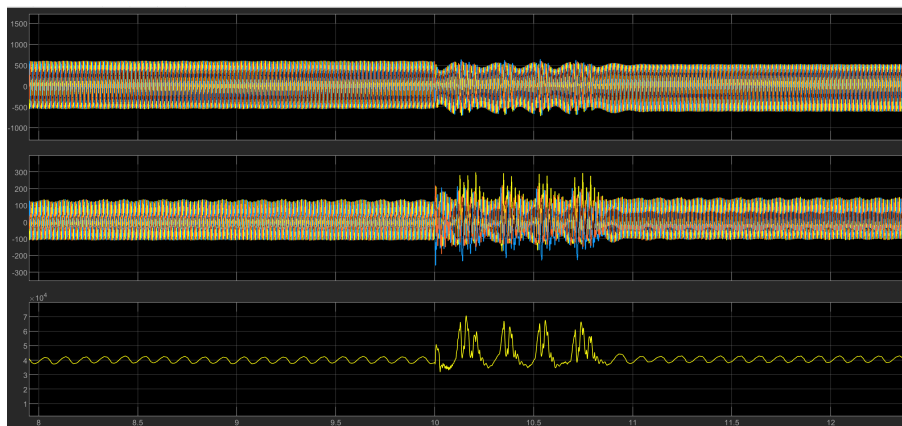


Εικόνα 7.159: Παραγόμενη ισχύς δεύτερης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B6.

Με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.160-7.161) παρατηρείται ότι σε αντίθεση με τη συνολική παραδιδόμενη ισχύ που παρουσιάζει το μικροδίκτυο, η μέγιστη διαφορά κατά πλάτος (δηλαδή το peak to peak) είναι πολύ μικρότερη, ενώ ταυτόχρονα, φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο το παραγόμενο ρεύμα.

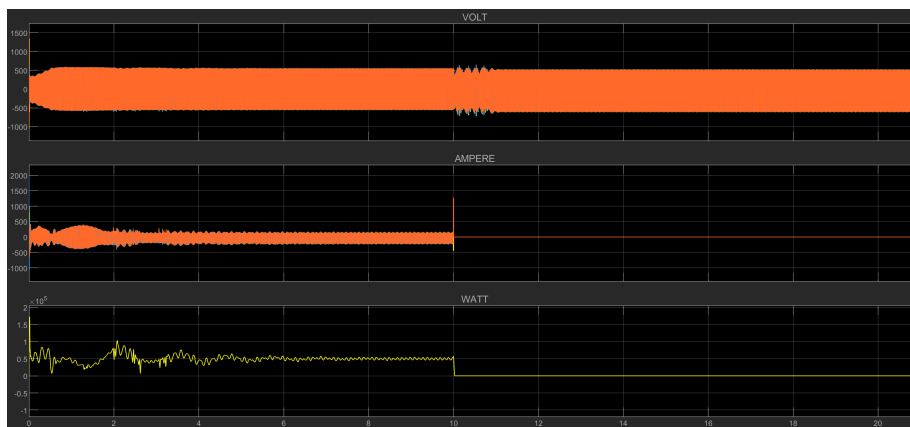


Εικόνα 7.160: Παραγόμενη ισχύς πρώτης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B6 (zoom).



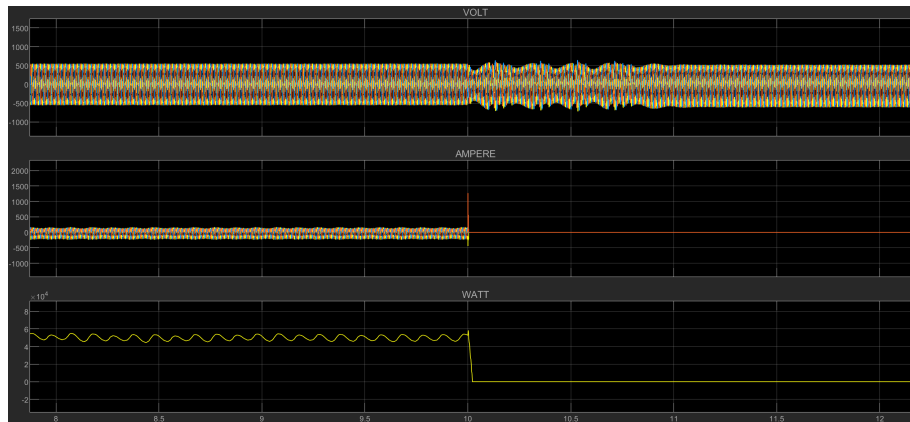
Εικόνα 7.161: Παραγόμενη ισχύς δεύτερης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B6 (zoom).

Η ντιζελογεννήτρια όπως είναι αναμενόμενο δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον κατά την χρονική στιγμή της εξόδου της. Πέρα από το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο που όπως έχει αποδειχθεί οφείλεται (στην έκτασή και στην διάρκειά του) σε αυτήν, δεν παρουσιάζει αλλαγές (Εικόνα 7.162). Η ροή της ισχύος μέχρι πριν την μεταβολή είναι σταθερή και κοντά στην ονομαστική της τιμή, ενώ μετά την μεταβολή μηδενίζεται τελείως.



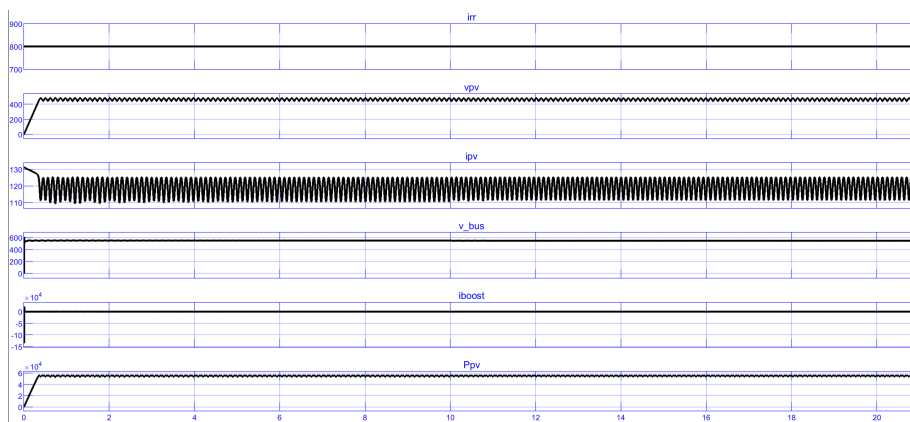
Εικόνα 7.162: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας του σεναρίου B6.

Με την χρήση του zoom (Εικόνα 7.163) παρατηρείται το πόσο ομαλά αποσυνδέεται από το μικροδίκτυο, όπως και το πόσο σταθερή παραγωγή ισχύος έχει το σύστημα πριν την διαταραχή.



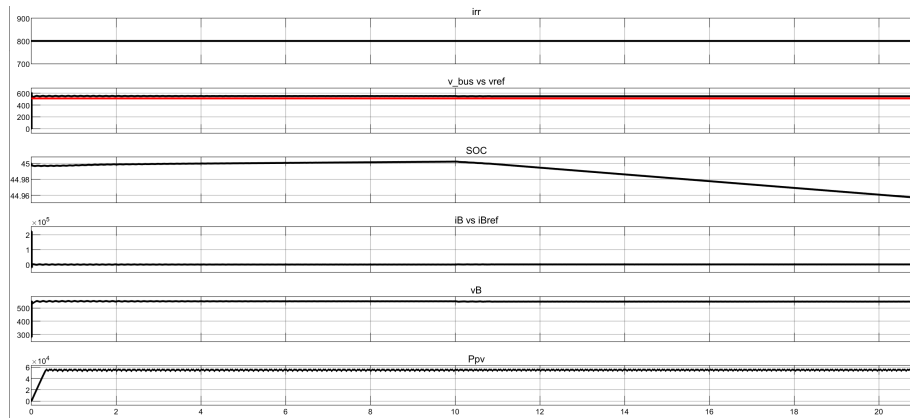
Εικόνα 7.163: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας του σεναρίου B6 (zoom).

Το φωτοβολταϊκό σύστημα μένει σχεδόν ανεπηρέαστο, όπως είχε παρατηρηθεί ήδη από το σενάριο A6, καθώς η έξοδος της γεννήτριας δεν επηρεάζει τις παραμέτρους του (Εικόνα 7.164). Έτσι, η ροή ισχύος είναι συνεχής και σταθερή σε τιμές παραγωγής κοντά στις ονομαστικές του.



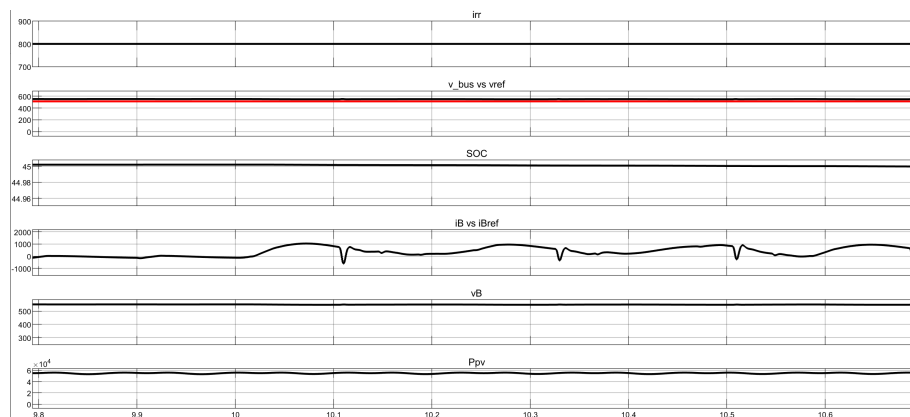
Εικόνα 7.164: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου B6.

Σε αντίθεση με το φωτοβολταϊκό σύστημα, το σύστημα αποθήκευσης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον (Εικόνα 7.165). Ενώ αρχικά υπάρχει μια κλίση στο SoC της μπαταρίας που υποδηλώνει ότι αποθηκεύει ενέργεια, την χρονική στιγμή μετά την αποσύνδεση της ντιζελογεννήτριας αυτό αλλάζει αισθητά. Από τη χρονική στιγμή όπου συμβαίνει αυτή η μεταβολή, η κλίση μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, πράγμα που αποδεικνύει ότι την ζητούμενη επιπλέον ενέργεια θα την καλύψει το υποσύστημα αυτό.



Εικόνα 7.165: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης του σεναρίου B6.

Ειδικότερα, παρατηρείται ότι μετά την διαταραχή η μέση τιμή του ρεύματος που αποδίδει η μπαταρία αλλάζει, και συγκεκριμένα αυξάνεται (Εικόνα 7.166).

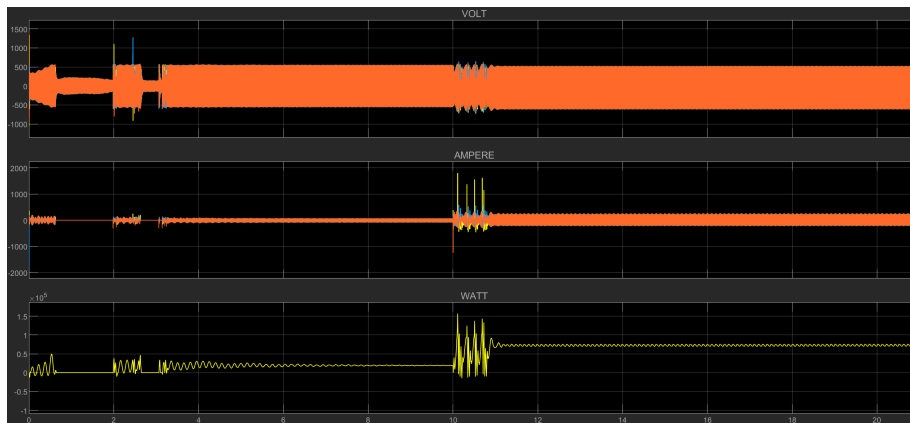


Εικόνα 7.166: Κατάσταση φόρτισης συστήματος αποθήκευσης του σεναρίου B6 (zoom).

Ο αντιστροφέας συμπεριφέρεται όπως ακριβώς αναμένεται. Σύμφωνα και με τα προηγούμενα σενάρια, αρχικά κατά την διάρκεια της εκκίνησης του μικροδικτύου σταματάει την λειτουργία του προκειμένου να σταματήσει την ροή περισσότερης ενέργειας, ενώ μετά την έξοδο της γεννήτριας προσπαθεί να καλύψει το ποσό της ισχύος που μέχρι πρότινος παρήγαγε η ίδια (Εικόνα 7.167).

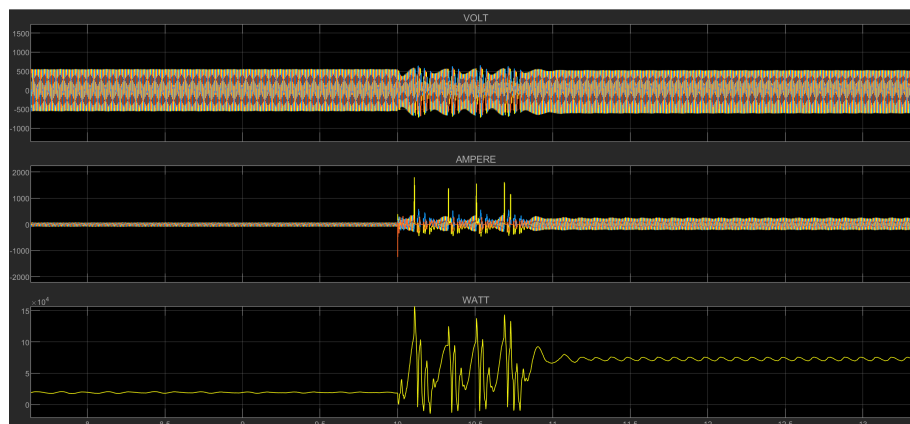
Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η στιγμή της ακριβής εξόδου της γεννήτριας. Σε εκείνο το σημείο, παρατηρείται μια τεράστια μεταβολή στην προσφερόμενη ισχύ προς το μικροδίκτυο. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα όμως, σχετίζεται με την σχεδίαση του συστήματος αντιστροφέα ανορθωτή (Εικόνα 7.168).

Με το που αντιλαμβάνεται ότι πρέπει να δώσει μια επιπλέον ισχύ ο αντιστροφέας το πράττει άμεσα, ανεβάζοντας κατά αυτό τον τρόπο την τάση σε μη επιθυμητές τιμές. Με την σειρά της αυτή η αύξηση της τάσης, ενεργοποιεί τον ανορθωτή ο οποίος προσπαθεί να μειώσει πλέον την τάση. Έπειτα, η διαδικασία ξανά επαναλαμβάνεται από την αρχή. Αυτό συνεχίζεται για αυτό το σύντομο χρονικό διάστημα, μέχρις ότου κάποια στιγμή η τάση φτάσει σε ένα σταθερό όριο που επιτρέπει το σύστημά μας να έρθει σε ισορροπία.



Εικόνα 7.167: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B6.

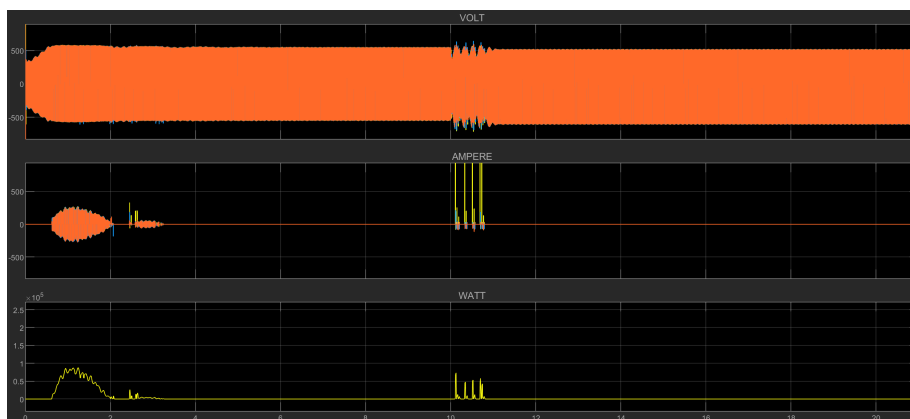
Ενώ η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μένει σταθερή, παρατηρείται κάποια μεταφορά ισχύος μέσω του inverter. Αυτό οφείλεται στην απευθείας μεταφορά ισχύος από το σύστημα των φωτοβολταϊκών.



Εικόνα 7.168: Μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B6 (zoom).

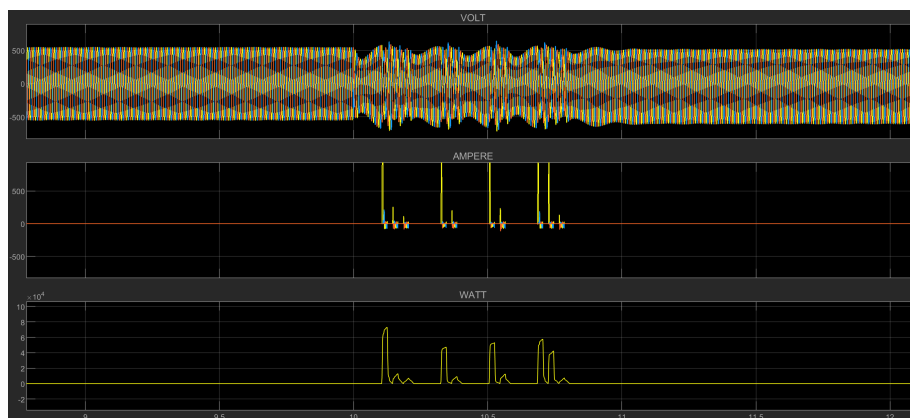
Ο ανορθωτής, όπως έχει ήδη αναφερθεί, λειτουργεί με την αντίθετη λογική του αντιστροφέα (Εικόνα 7.169). Και σε αυτό το σενάριο συμβάλει κυρίως στην μετα-

φορά της επιπλέον παραγόμενης ισχύος κατά την εκκίνηση του συστήματος, ενώ βοηθάει και στην ομαλότερη προσαρμογή του μετά την έξοδο της γεννήτριας με τον τρόπο που προαναφέραμε.



Εικόνα 7.169: Μεταφορά ισχύος μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B6.

Με τη χρήση του zoom (Εικόνα 7.170) παρατηρείται καλύτερα το φαινόμενο της προσαρμογής του συστήματος στις νέες απαιτήσεις. Πέραν αυτού όμως, αποδεικνύεται και το φαινόμενο που περιγράφηκε αναφορικά με τις διακυμάνσεις της τάσης προηγούμενως.



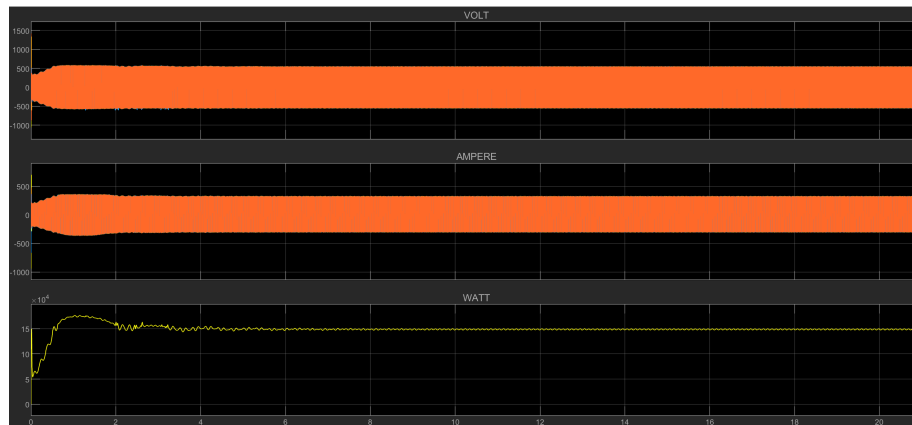
Εικόνα 7.170: Μεταφορά ισχύος μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B6 (zoom).

7.15 Σενάριο B7

Σε αυτά τα σενάρια που ακολουθούν, όμοια με τα αντίστοιχα σενάρια A7 και A8 που προηγήθηκαν, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κυρίως στην παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελετήθηκε η επίδραση που θα έχει στο σύστημά η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα 300 W/m^2 στα 800 W/m^2 , υπό σταθερό φορτίο 150 kW .

Όπως είναι αναμενόμενο, το φορτίο είναι σχετικά χαμηλό για τις παραγωγικές δυνατότητες του μικροδικτύου. Αυτό δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις για να εξεταστεί σε μεγαλύτερο βαθμό η αλληλεπίδραση μεταξύ της μεταβολής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της κατάστασης φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης.

Τα αποτελέσματα σχετικά με την συνολική παραγόμενη ισχύ είναι τα ακόλουθα:

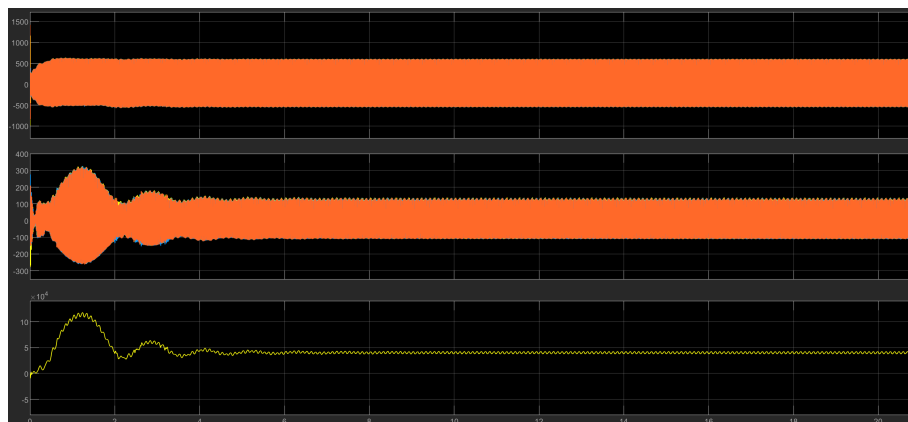


Εικόνα 7.171: Συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου B7.

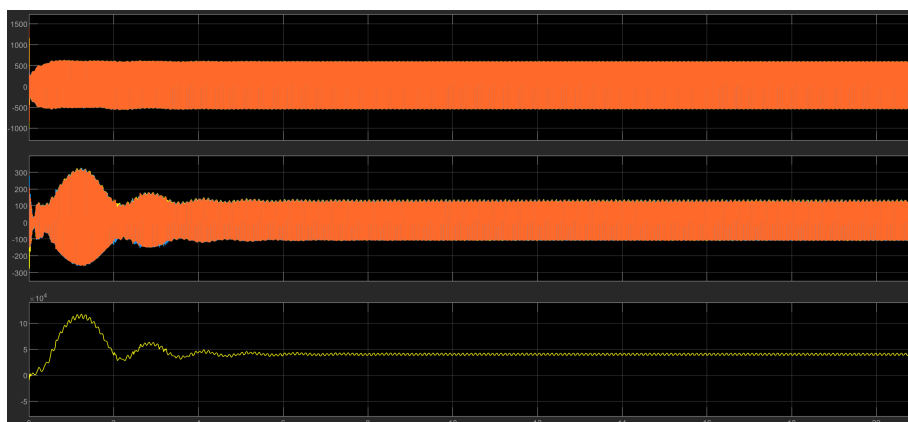
Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η προσφερόμενη ενέργεια δεν επηρεάζεται ούτε στον ελάχιστο βαθμό από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 7.171). Αυτή η παρατήρηση έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είχαμε εξάγει από το σενάριο A7.

Κατά αντιστοιχία, οι ανεμογεννήτριες επίσης δεν παρουσιάζουν αλλαγή στην παραγόμενη ισχύ τους προς το σύστημά μας, καθώς η ταχύτητα του ανέμου δεν αλλάζει (Εικόνα 7.172-7.173).

Και σε αυτό το σενάριο, η συμπεριφορά τους είναι όμοια.

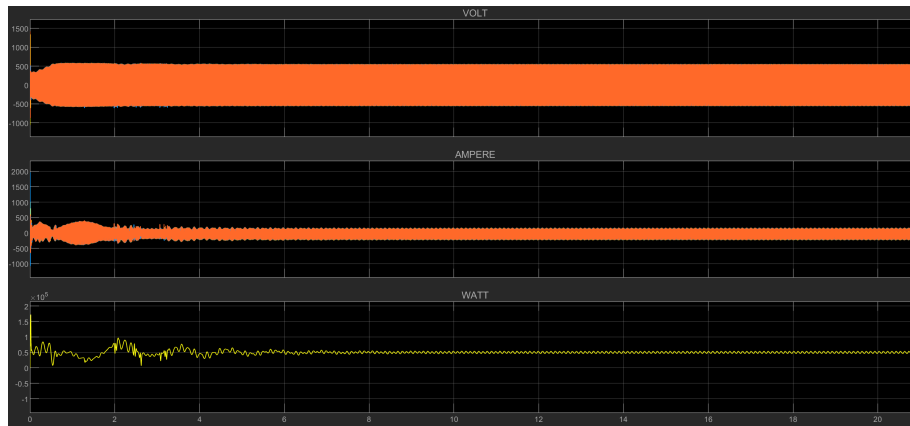


Εικόνα 7.172: Παραγόμενη ισχύς από την πρώτη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B7.



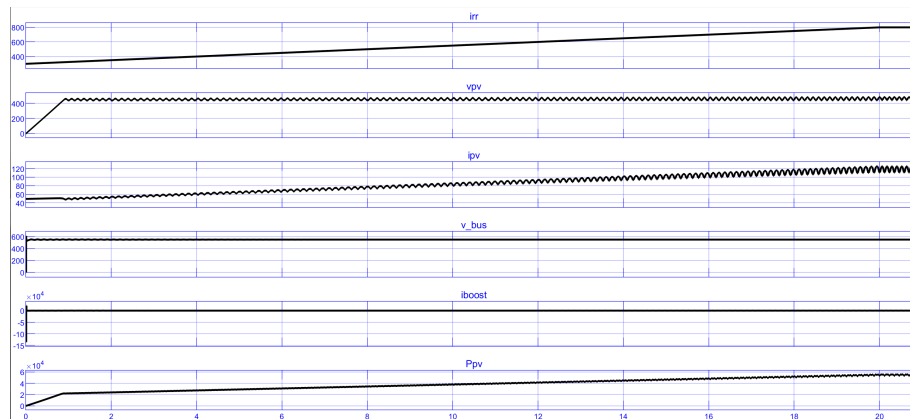
Εικόνα 7.173: Παραγόμενη ισχύς από τη δεύτερη ανεμογεννήτρια του σεναρίου B7.

Η παραγωγή της ντιζελογεννήτριας είναι σταθερή και η ίδια που είχε παρατηρηθεί και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Όπως και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών η παραγωγή ισχύος δεν επηρεάζεται από την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 7.174).



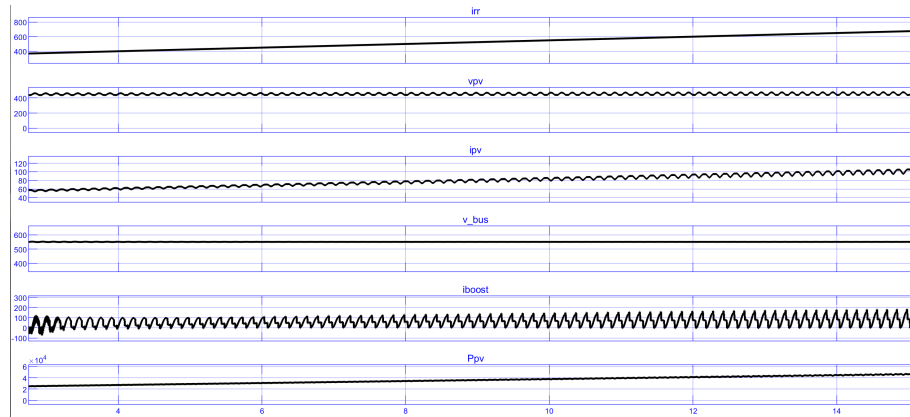
Εικόνα 7.174: Παραγωγή ισχύος από την ντιζελογεννήτρια του σεναρίου B7.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι αυτό που τραβά τα βλέμματα κυρίως σε αυτό το εξεταζόμενο σενάριο (Εικόνα 7.175). Καθώς αυξάνεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σταδιακά από τα 300 W/m^2 στα 800 W/m^2 παρατηρείται και η αντίστοιχη αύξηση του παραγόμενου ρεύματος. Με τη σειρά του, αυτό το ρεύμα συμβάλει στην δημιουργία παραγόμενης ισχύος. Σαν i_{pv} ορίζεται το ρεύμα στην έξοδο των φωτοβολταϊκών πάνελ. Συμπεραίνεται ότι σταδιακά φτάνει μέχρι την τιμή που είχε σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάσαμε.



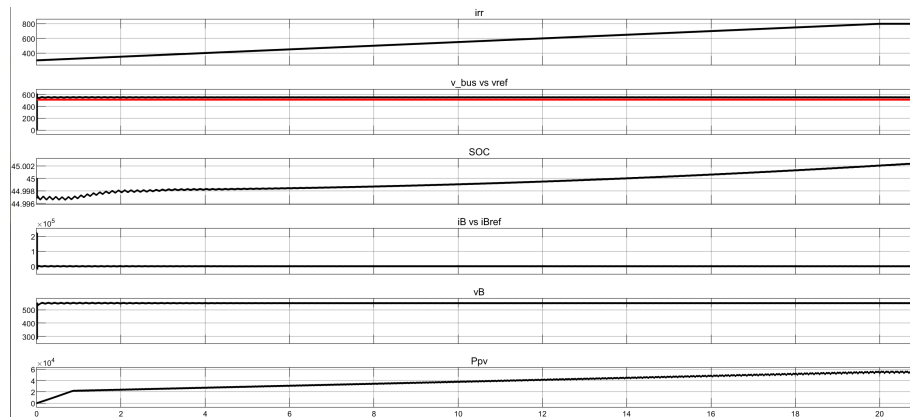
Εικόνα 7.175: Παραγωγή ισχύος από το φωτοβολταϊκό σύστημα του σεναρίου B7.

Από την άλλη, σαν i_{boost} ορίζεται το ρεύμα το οποίο ουσιαστικά μας δίνει στην έξοδο του ο DC-DC converter. Με τη χρήση του zoom παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η ακτινοβολία, αυξάνεται το παραγόμενο ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά πάνελ και κατά συνέπεια αυξάνεται και το ρεύμα στη έξοδο του μετατροπέα, με τρόπο τέτοιο ώστε η μέση τιμή του να μεταβάλλεται προς τα πάνω (Εικόνα 7.176).



Εικόνα 7.176: Παραγωγή ισχύος από το φωτοβολταϊκό σύστημα του σεναρίου B7 (zoom).

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον. Γενικά, το φορτίο είναι σχετικά μικρό για τις δυνατότητες του συστήματος, πράγμα που σημαίνει ότι δεν απαιτείται μεγάλη προσφορά ισχύος από το σύστημα αποθήκευσης. Αυτό μάλιστα γίνεται και ακόμα πιο αισθητό εάν παρατηρηθεί η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (Εικόνα 7.177).

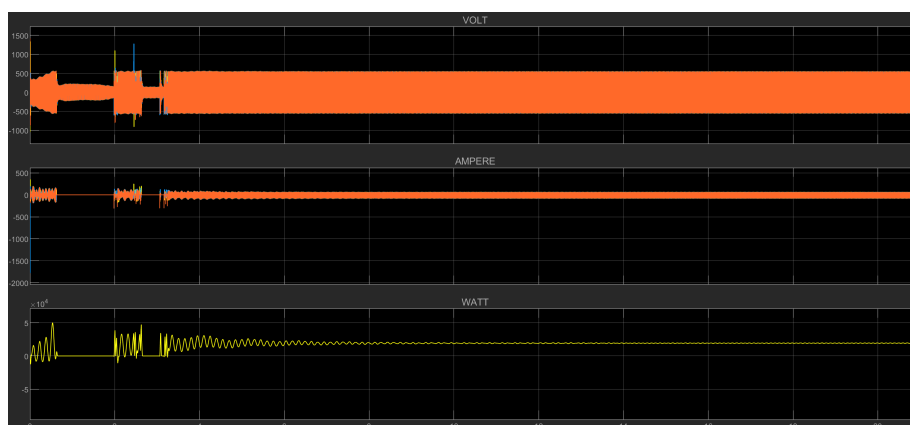


Εικόνα 7.177: Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του σεναρίου B7.

Καθώς αρχικά το μικροδίκτυο απαιτεί ενέργεια και την ίδια στιγμή το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν έχει αρκετή ισχύ να του δώσει, παρατηρείται μια σχετική πτώση του SoC. Καθώς όμως μεταβαίνει σε μια κατάσταση ισοζυγίου ισχύος, με την ταυτόχρονη αύξηση στην παραγόμενη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, παρατηρείται ότι η κλίση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας αλλάζει, υποδεικνύοντας ότι ξεκινάει να φορτίζει. Τις χρονικές τιμές ανάμεσα στο διάστημα 2 έως 4 δευτερόλε-

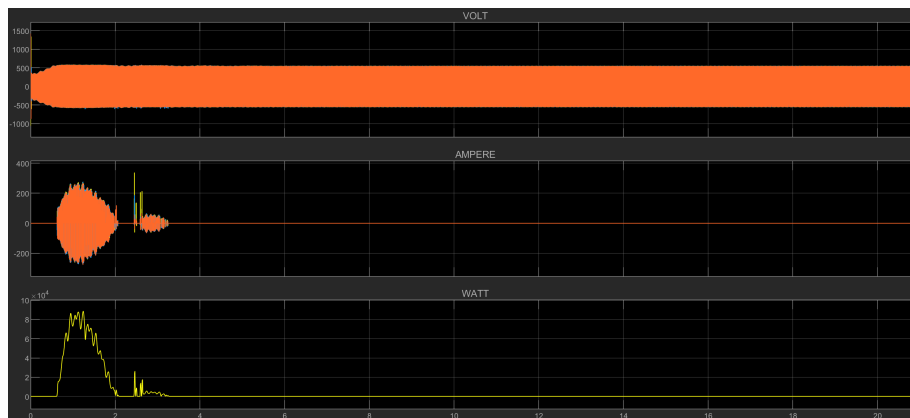
πτα η κλίση του SoC είναι σχεδόν ευθεία. Καθώς όμως η παραγωγή των φωτοβολταϊκών αυξάνεται, διακρίνεται μια ανάλογη αύξηση στο ποσοστό αποθήκευσης ενέργειας (Εικόνα 7.177).

Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι παρόλο που η μπαταρία φαίνεται να αποθηκεύει ενέργεια, υπάρχει ροή ισχύος προς το μικροδίκτυο μέσω του αντιστροφέα. Αυτό συμβαίνει, επειδή την χρονική στιγμή όπου αρχίζει να μεταφέρει ουσιαστική ισχύ (όχι δηλαδή κατά την διάρκεια του αρχικού μεταβατικού φαινομένου), το σύστημα των φωτοβολταϊκών έχει ήδη διαθέσιμο ένα ποσό ισχύος που μπορεί να διαθέσει (Εικόνα 7.178). Αυτό γίνεται ακόμα πιο κατανοητό, εάν συγκριθεί η παραγωγή του φωτοβολταϊκού κατά την χρονική περίοδο μεταξύ 2 και 4 δευτερολέπτων, που όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως η παραγόμενη ισχύς είναι τόση όση απαιτείται ώστε και να μεταφερθεί μέσω του αντιστροφέα, αλλά και να φανεί στο σύστημα αποθήκευσης ότι δεν υπάρχει ανάγκη για ροή ισχύος (ευθεία γραμμή το SoC).



Εικόνα 7.178: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B7.

Ο ανορθωτής σε αυτήν την περίπτωση δεν εκτελεί κάποια πολύ σημαντική ενέργεια και δεν ενεργοποιείται σε πολλές περιπτώσεις (Εικόνα 7.179), παρά μόνο όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Το ποσό της ισχύος που μεταφέρει κατά την διάρκεια του αρχικού μεταβατικού φαινομένου είναι αρκετά σημαντικό, και συμβάλει εν μέρει στην αύξηση της κλίσης του διαγράμματος κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας, μιας και σε εκείνο το χρονικό διάστημα η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι περιορισμένη.

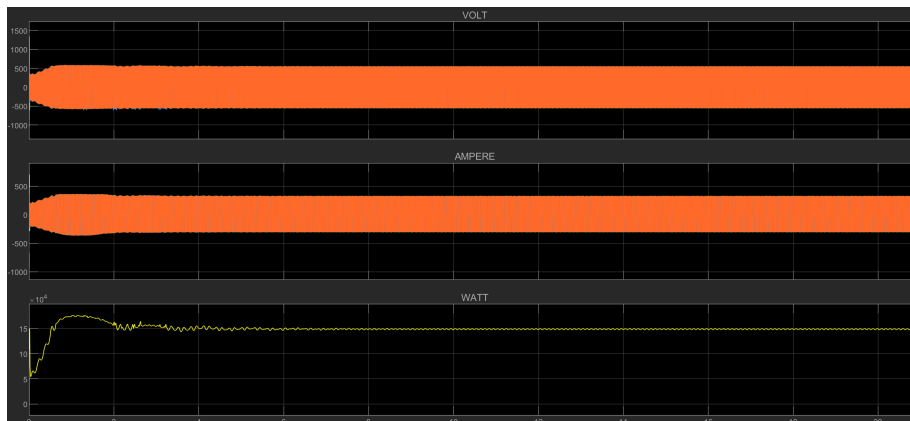


Εικόνα 7.179: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B7.

7.16 Σενάριο B8

Σε αυτό το τελευταίο σενάριο εξετάστηκε η απόκριση του συστήματός μας καθώς η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεταβαλλόταν από τα 800 W/m^2 στα 300 W/m^2 . Κατά αντιστοιχία με τα σενάρια A8 και B7 που προηγήθηκαν, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην παραγόμενη ισχύς του συστήματος των φωτοβολταϊκών και στον τρόπο που επηρεάζει την κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης.

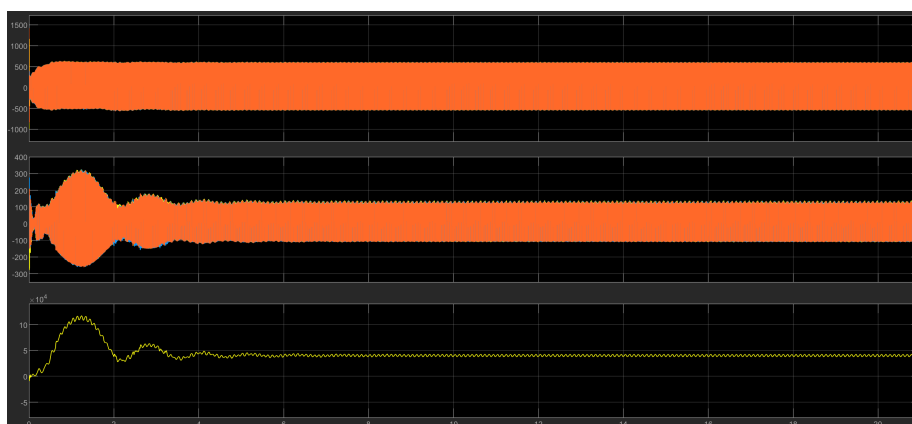
Η συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου είναι η ακόλουθη (Εικόνα 7.180):



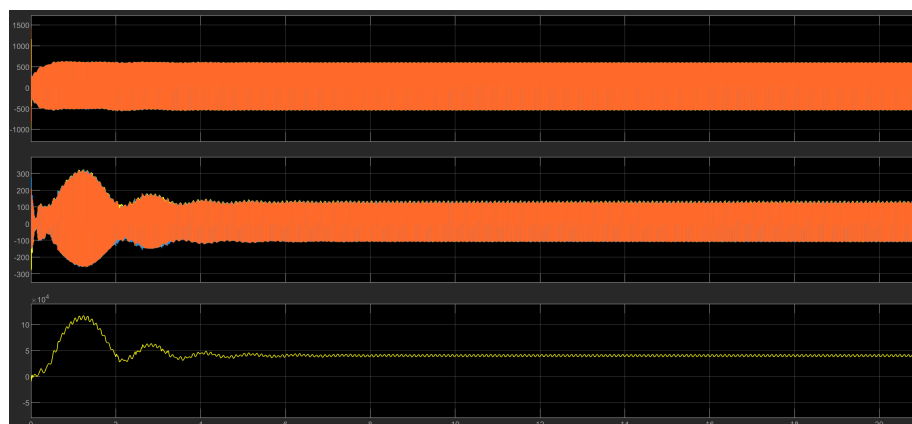
Εικόνα 7.180: Συνολική παραγόμενη ισχύς του σεναρίου B8.

Η συνολική αποδιδόμενη ισχύς δεν αλλάζει καθ' όλη την διάρκεια των μεταβολών που συμβαίνουν στην ηλιακή ακτινοβολία. Όπως ακριβώς και στο σενάριο B7 που εξετάστηκε νωρίτερα, η αποδιδόμενη ισχύς έπειτα από ένα σύντομο μεταβατικό φαινόμενο διατηρείται σταθερή.

Στο ίδιο μήκος κύματος και η παραγωγή από τις δύο ανεμογεννήτριες (Εικόνα 7.181-7.182). Όπως είναι αναμενόμενο, δεν αλλάζει κάτι στις παραμέτρους λειτουργίας τους (όπως για παράδειγμα η ταχύτητα του ανέμου) και επομένως η παραγόμενη ισχύς παραμένει αμετάβλητη.

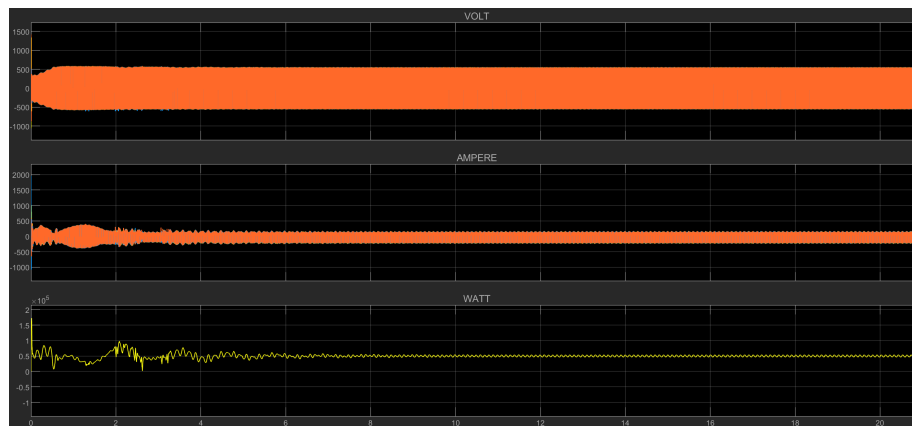


Εικόνα 7.181: Παραγόμενη ισχύς της πρώτης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B8.



Εικόνα 7.182: Παραγόμενη ισχύς της δεύτερης ανεμογεννήτριας του σεναρίου B8.

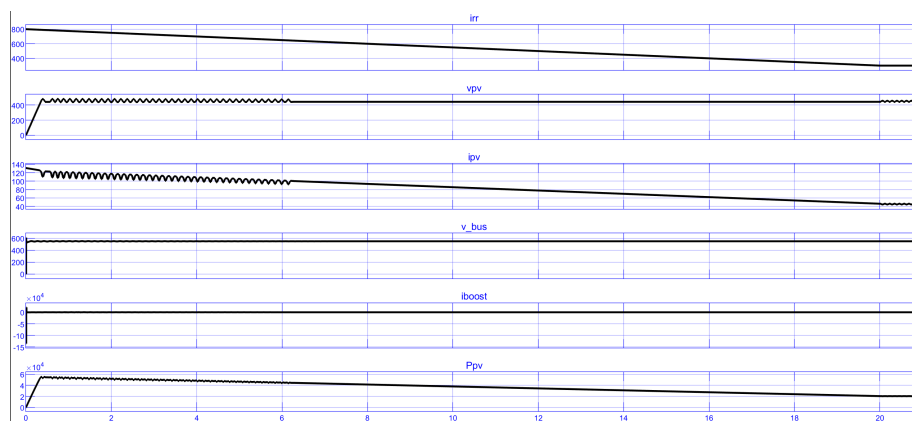
Σύμφωνα και με τα σενάρια που προηγήθηκαν και εξετάζαν την συμπεριφορά του συστήματος σε μεταβολές που αφορούσαν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η παραγόμενη ισχύς της ντιζελογεννήτριας και εδώ δεν επηρεάζεται (Εικόνα 7.183). Το μεταβατικό φαινόμενο που παρουσιάζεται σε όλα τα σενάρια κάνει την εμφάνισή του και εδώ, και μορφή του είναι ίδια με αυτή που παρατηρήθηκε και στο προηγούμενο υπό εξέταση σενάριο.



Εικόνα 7.183: Παραγόμενη ισχύς ντιζελογεννήτριας του σεναρίου B8.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα όπως είναι αναμενόμενο έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον μιας και επηρεάζεται άμεσα από τις αλλαγές που συμβαίνουν κατά την διάρκεια αυτού του σεναρίου (Εικόνα 7.184). Προφανώς, καθώς μειώνεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία η παραγόμενη ισχύ του θα μειώνεται με ανάλογο τρόπο λόγω και της αντίστοιχης μείωσης του παραγόμενου ρεύματος i_{pv} .

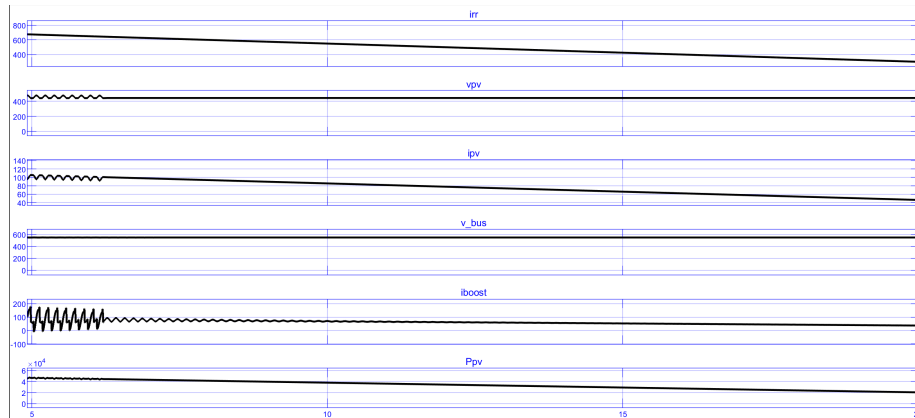
Αυτό που παρατηρείται, είναι ότι μέχρι την χρονική στιγμή 6 sec υπάρχουν μικρές κυματίσεις, ενώ μετά από αυτό το σημείο εξαφανίζονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο DC-DC converter που χρησιμοποιείται δεν είναι ιδανικά φτιαγμένος, με συνέπεια για πολύ υψηλές τιμές της τάσης και του ρεύματος να παρατηρούνται αυτά τα φαινόμενα. Καθώς το ρεύμα μειώνεται λόγω και την μείωσης της ακτινοβολίας, το σύστημα μπορεί να διαχειριστεί ευκολότερα τα παραγόμενα ποσά ισχύος.



Εικόνα 7.184: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου B8.

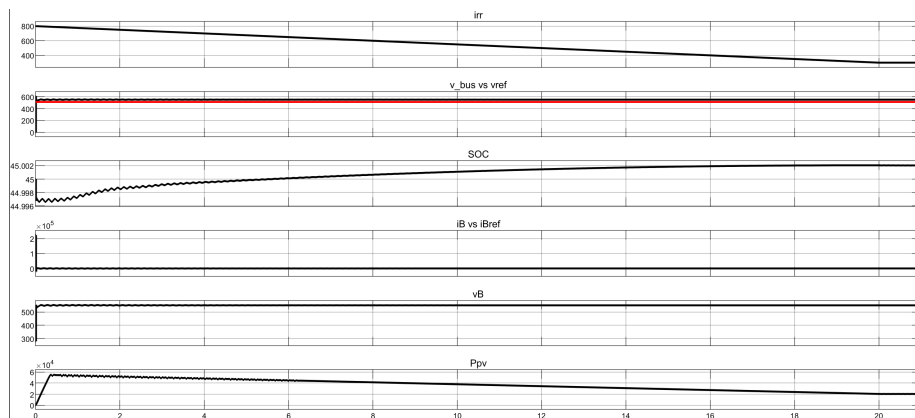
Με τη χρήση του zoom παρατηρείται ότι το ρεύμα που παράγεται στη έξοδο του

μετατροπέα, δηλαδή το iboost, μειώνεται αισθητά καθώς μειώνεται και το ρεύμα εισόδου του λόγω της αλλαγής της ακτινοβολίας (Εικόνα 7.185).



Εικόνα 7.185: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος του σεναρίου B8 (zoom).

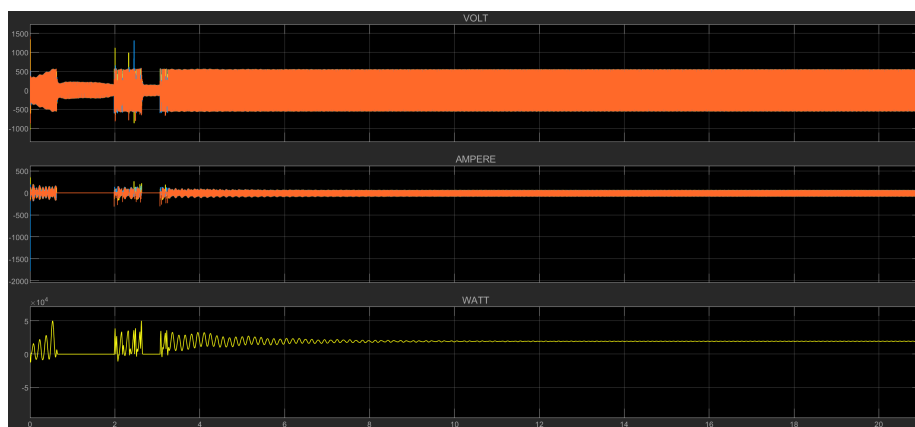
Το σύστημα αποθήκευσης επίσης συμπεριφέρεται όπως αναμένεται. Η αρχική μεγάλη προσφερόμενη ισχύ προερχόμενη από το φωτοβολταϊκό σύστημα σε συνδυασμό με την σχετικά εύκολη κάλυψη του φορτίου από τα υπόλοιπα components του συστήματος, συμβάλουν στην ακόλουθη μορφή του διαγράμματος της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (Εικόνα 7.186).



Εικόνα 7.186: Κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης του σεναρίου B8.

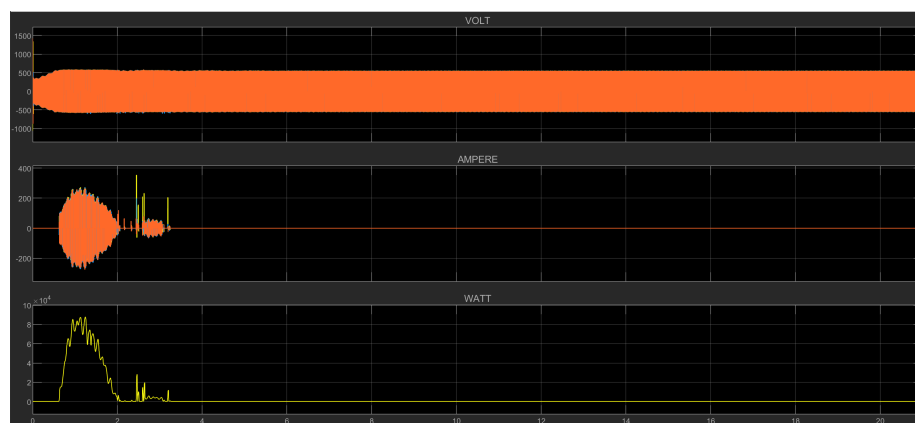
Η κλίση του SoC είναι αρχικά απότομη και ανηφορική, πράγμα που υποδηλώνει ότι το σύστημα φορτίζεται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Καθώς η ακτινοβολία όμως μειώνεται, παρατηρείται ότι και η κλίση της κατάστασης φόρτισης μεταβάλλεται. Και υπό αυτές τις συνθήκες υπάρχει πάλι κατάσταση φόρτισης, αλλά τώρα με φανερά μικρότερο ρυθμό. Από την χρονική στιγμή των 18 δευτερολέπτων, παρα-

τηρείται ότι η κλίση έχει γίνει σχεδόν οριζόντια, δηλαδή το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση ισορροπίας. Αυτό σημαίνει, ότι όση ισχύ παράγεται από το φωτοβολταϊκό, τόση ισχύ μεταφέρεται μέσω του αντιστροφέα και στο μικροδίκτυο. Αυτό φαίνεται ακόμα και στο διάγραμμα λειτουργίας του αντιστροφέα (Εικόνα 7.187). Γενικά, ο αντιστροφέας, όπως και στο προηγούμενο σενάριο λειτουργίας, δεν μεταφέρει πολύ μεγάλο ποσό ισχύος για την κάλυψη του φορτίου. Το διάγραμμα του επιβεβαιώνει το προηγούμενο διάγραμμα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Μέσω αυτού, διακρίνουμε ότι μεταφέρει στο σύστημα περίπου στα 20 kW, όση είναι και η παραγωγή του φωτοβολταϊκού μεταξύ του διαστήματος 18 και 20 δευτερολέπτων.



Εικόνα 7.187: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του αντιστροφέα του σεναρίου B8.

Ο ανορθωτής λειτουργεί με παρόμοια λογική όπως και στο προηγούμενο σενάριο (Εικόνα 7.188).



Εικόνα 7.188: Μεταφερόμενη ισχύς μέσω του ανορθωτή του σεναρίου B8.

Το αρχικό ποσό της ισχύος που μεταφέρει προς το σύστημα αποθήκευσης είναι αρκετό, ώστε να δημιουργηθεί η απότομη αλλαγή της κλίσης στο διάγραμμα της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Η χρονική περίοδος όπου συμβαίνει αυτό, δηλαδή από το 1 sec μέχρι και το 2 sec είναι το ποσό της ισχύος του αρχικού μεταβατικού φαινομένου που ουσιαστικά ξεπερνά το ζητούμενο φορτίο.

Η λειτουργία του συνεχίζεται και πέρα από αυτό το σημείο σε στιγμές όπου απαιτείται, προκειμένου να υπάρξει η όσο το δυνατόν γρηγορότερη μετάβαση σε μια κατάσταση ισορροπίας (όπως και επιτυγχάνεται δηλαδή μετά τη χρονική στιγμή των 4 δευτερολέπτων).

8 Συμπεράσματα

Τα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν παρουσίασαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα που είτε σχετίζονται με την ίδια την Simulink, είτε με τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την ανάλυση των δεδομένων τους.

Συγκεκριμένα για την Simulink προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα, που όμως θα μπορούσαν να είχαν και τη μορφή των προβλημάτων που προέκυψαν καθ'όλη την υλοποίηση της εργασίας:

- Η Simulink φαίνεται να μην μπορεί να λάβει σωστές αποφάσεις σε περιπτώσεις όπου το αποτέλεσμα μιας συνθήκης κρίνεται με βάση τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Αυτό σημαίνει, ότι για κάποιο μοντέλο το οποίο προσομοιώνεται σε διακριτό χρόνο και το βήμα του δεν προκύψει κοντά στην τιμή του χρόνου που υπάρχει η συνθήκη ελέγχου, είναι πολύ πιθανό να μην μπορεί να το αντιληφθεί.
- Τα διάφορα components που χρησιμοποιήθηκαν δεν συμβάδιζαν σε πολλές περιπτώσεις με τις τιμές που είχαν θεωρητικά υπολογιστεί και θα έπρεπε να αποδίδουν συγκεκριμένα αποτελέσματα. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα των διάφορων φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν, όπου με βάση την βιβλιογραφία θα έπρεπε να λειτουργούν σωστά και παρόλα αυτά χρειάστηκε πειραματική προσέγγιση για την σωστή εφαρμογή τους στο εκάστοτε σενάριο.
- Σε πολλές περιπτώσεις η Simulink παρουσίαζε φαινόμενα τα οποία δεν μπορούσαν να εξηγηθούν από τις συναρτήσεις εισόδου, ή ακόμα και αδυνατούσε να εκτελέσει κάποιους υπολογισμούς πιθανώς λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων που είχε να επεξεργαστεί. Ανάλογα με το σενάριο ακόμα, δεν μπορούσε καν να ξεκινήσει την εκτέλεση του προγράμματος ή απαιτούνταν κάποια μικρο-αλλαγή σε κάποιο δεδομένο της εκτέλεσης, όπως είναι για παράδειγμα ο χρόνος της συνολικής εκτέλεσης του ή το κλείσιμο ενός παραθύρου του συστήματος που περιείχε κάποιο διάγραμμα από προηγούμενη εκτέλεση.
- Ενώ σε γενικές γραμμές υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των διαφορετικών βιβλιοθηκών της Simulink, σε πολλές περιπτώσεις δεν ήταν δυνατή η διασύνδεση των εκάστοτε component. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα, η ασυμβατότητα προέκυψε σε δεύτερη φάση και όχι κατά την αρχική διαμόρφωση-ενοποίηση.
- Μεγάλο μέρος των component που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίαζαν περιορισμούς σε θέματα που αφορούσαν την συμβατότητά τους κατά την εκτέλεση σε διακριτό χρόνο. Αυτό σημαίνει, ότι κάποιες φορές δεν υπήρχε η αντίστοιχη υλοποίηση του μοντέλου που θα προσομοίωνε το σύστημα σε χρονικό ορίζοντα διακριτού χρόνου, και είτε έπρεπε να δημιουργηθεί από την αρχή (συχνότερα) είτε να προσαρμοστεί κατάλληλα (σπάνια).

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των σεναρίων αυτά συνοψίζονται ως εξής:

- Η κάλυψη του φορτίου επιτυγχάνεται σε ένα τεράστιο ποσοστό, πράγμα που αποδεικνύει την βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος και σε πραγματικές συνθήκες όταν θεωρούνται components σχετιζόμενα με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν.
- Η ευστάθεια του συστήματος επίσης είναι πολύ ικανοποιητική, αφού όλες οι διαταραχές, ανεξάρτητα από την πληθώρα των υποσυστημάτων που είχαν, επιλύονταν με γρήγορο ρυθμό. Αξίζει να σημειωθεί δε, ότι σε κάθε σενάριο η εκκίνηση γίνεται από μηδενικές αρχικές συνθήκες και η μετάβαση από την μεταβατική περιοχή στην περιοχή μόνιμης κατάστασης λειτουργίας είναι ταχύτατη.
- Η μεγαλύτερη ροή ισχύος επιτυγχάνεται μέσω του αντιστροφέα, αφού και έχει μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ από τα περισσότερα components αλλά και είναι υπεύθυνος για την επιπλέον κάλυψη των αναγκών όταν οι συνθήκες παραμένουν οι ίδιες. Το αντίστροφο ισχύει και στην περίπτωση της περίσσειας ισχύος, με την διαφορά ότι εκεί υπάρχει ο ανορθωτής.
- Όπως έχει ήδη γίνει κατανοητό και μέσα από τα αποτελέσματα που σχολιάστηκαν, η γεννήτρια ντίζελ προσθέτει επιπλέον πολυπλοκότητα κυρίως κατά την εκκίνησή της. Επιπρόσθετα, οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται σε όλες τις περιπτώσεις, εμφανίζονται ελαφρώς μεγαλύτερες κατά πλάτος στα σενάρια όπου η ντιζελογεννήτρια συνεισφέρει στην κάλυψη του φορτίου.
- Η συνδεσμολογία που έχει γίνει μεταξύ συστήματος αποθήκευσης, φωτοβολταϊκού συστήματος και αντιστροφέα φαίνεται να είναι αρκετά αποδοτική, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει ελάχιστο ποσό απωλειών ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η σωστή και ασταμάτητη τροφοδοσία του φορτίου (ή της αντίστοιχης φόρτισης μπαταρίας σε διαφορετική περίπτωση).
- Το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα και του ανορθωτή βασισμένο στον υπολογισμό της μέγιστης τάσης του φορτίου αποτελεί αποτέλεσμα της συγκεκριμένης εργασίας, όπως άλλωστε και η συνάρτηση που υπολογίζει την μέγιστη τάση στο φορτίο κάθε στιγμή, και φαίνεται να ανταποκρίνεται πολύ σωστά στις απαιτήσεις που προκύπτουν. Επιπλέον, το συνολικό σύστημα είναι σε θέση να απορρίψει κάποιες τιμές της τάσης που αφορούν στιγμιαία μεταβατικά φαινόμενα προκειμένου να επιτευχθεί μετέπειτα πιο γρήγορα και εύκολα ομαλότητα ανάμεσα στην λειτουργία του inverter και του rectifier.
- Κατά την υλοποίηση του DC-DC converter παρατηρήθηκαν διάφορα φαινόμενα μη τήρησης της ορθής λειτουργίας του, που σχετίζονται και με τις διαφορές στα πηνία και τους πυκνωτές μεταξύ θεωρητικών υπολογισμών και προσομοιώσής τους στην Simulink (κατά αντίστοιχο τρόπο με τα φίλτρα που προαναφέρθηκε). Επιπλέον, παρατηρήθηκε και το φαινόμενο της μέγιστης δυνατής μετατροπής τάσης, καθώς σε ξεχωριστές δοκιμές που διενεργήθηκαν, δεν μπορούσαν να επιτευχθούν μεγάλες μετατροπές μεταξύ των τάσεων.

Είναι αναμενόμενο ότι μια τέτοια μελέτη επιδέχεται πολλές προεκτάσεις, προκειμένου να φτάσει σε ένα σημείο πλήρως λειτουργικό και αντιπροσωπευτικό του

τρόπου λειτουργίας ενός πραγματικού συστήματος διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια μελλοντική υλοποίηση, θα μπορούσε να προσομοιωθεί η λειτουργία του μικροδικτύου κατά την εισαγωγή ακόμα περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ή ακόμα και χρήση έξυπνων φορτίων. Η ενδιαφέρουσα ανάπτυξη των συστημάτων αποθήκευσης εισάγει νέες προοπτικές στην περαιτέρω ανάλυση του τρόπου με τον οποίο θα μπορούσε να γίνει ακόμα πιο αποδοτικό. Ακόμα, ενδιαφέρον θα είχε και η διασύνδεση του με ένα πραγματικό δίκτυο προκειμένου να αναλυθούν σε αυτήν την περίπτωση τα διάφορα ποσά ανταλλαγής ισχύος, κάλυψης της ζήτησης και ευστάθειας του. Τέλος, θα είχε εξίσου νόημα να γίνει και μια ανάλυση σφαλμάτων σε κομβικά σημεία του συστήματος ώστε να καταγραφούν και να αναλυθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν τόσο στο ίδιο, όσο ίσως και στο κυρίως διασυνδεδεμένο δίκτυο.

9 Βιβλιογραφία

- 1) Έκθεση της επιτροπής προς το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο και το συμβούλιο : Αξιολόγηση του 2017 σχετικά με την πρόοδο που σημείωσαν τα κράτη μέλη προς την επίτευξη των εθνικών στόχων ενεργειακής απόδοσης για το 2020 και την εφαρμογή της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση.
- 2) Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας - Γ.Γιαννακόπουλος & Ν.Βοβός.
- 3) Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας - Γ.Γιαννακόπουλος & Ν.Βοβός.
- 4) Ανάλυση συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας- Γ.Γιαννακόπουλος & Ν.Βοβός.
- 5) Ανάλυση συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας- J.J.Grainger & W.D. Stevenson, Jr.
- 6) Design and Simulation of 100KW Grid Connected PV/Wind Hybrid/ Standalone system Using MATLAB/SIMULINK-Baijnath& Tudu Mohammed Iftekharuz Zaman& Dibya Darshan Dash& Hruskikesh Panda.
- 7) Performance parameters of a standalone PV plant-Amine El Fathi & Lahcen Nkhaili & Amin Bennouna & Abdelkader Outzourhit.
- 8) Stand-alone photovoltaic systems - Salas Charles, University of Madrid.
- 9) Single Phase Bidirectional PWM Converter for Microgrid System - C.Kalavalli, K.ParkaviKathirvelu, R.Balasubramanian.
- 10) Simscape Electrical - User's Guide.
- 11) Comprehensive Renewable Energy, Vol 2 - Sayigh A, Elsevier.
- 12) Modeling and Operation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Energy Conversion System Connected with Grid - Mohammed M.Soliman & Hamdy Ziedan & Gaber El Saady.
- 13) Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control - Chia-Nan Wang, Wen-Chang Lin, and Xuan-Khoa Le.
- 14) Dynamic Modeling of Diesel Generator Based on Electrical and Mechanical Aspects-S. Benhamed & H. Ibrahim & K. Belmokhtar & H. Hosni & A. Ilincă & D. Rousse & A. Chandra & D. Ramdenee.
- 15) Διπλωματική εργασία : Διάταξη μέτρησης χαρακτηριστικών φόρτισης μπαταρίας ιόντων λιθίου - Κουρτίδης Βασίλης & Χουρτιρούδης Γιώργος.

- 16) Διπλωματική εργασία : Μοντελοποίηση, έλεγχος και προσομοίωση αιολικού συστήματος με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη-Κωνσταντίνος Μπιμπισίδης.
- 17) Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά φίλτρα - Κ. Ψυχάλινος, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- 18) Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας : Αιολική Ενέργεια - Γεώργιος Μαρνέλλος, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
- 19) Τεχνολογίες Ελέγχου στα Αιολικά Συστήματα - Αντώνιος Αλεξανδρίδης.
- 20) Πανεπιστημιακές παραδόσεις του μαθήματος : Μοντελοποίηση/έλεγχος μεμονωμένων και υβριδικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής-Αθανάσιος Δ. Καρλής.
- 21) Πανεπιστημιακές παραδόσεις του μαθήματος : Ηλεκτρονικά ισχύος - Φ.Κανέλλος.