ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνοοικονομική Μελέτη του Έλεγχου Ταχείας Συχνότητας Δικτύου μέσω Οχημάτων Κυψελών Καυσίμου σε Μη Διασυνδεδεμένο Νησί

ΤΖΙΩΤΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΑΜ: ΤΗ20040

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ Γεώργιος Ορφανουδάκης
Συνεπιβλέπων: : Δρ. Πομποδάκης Ευάγγελος

Ηράκλειο, Ιούνιος 2026

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
ENERGY SYSTEMS SECTOR

DIPLOMA THESIS

Techno-

Economic Feasibility of Fuel Cell Vehicle-to-Grid

Fast Frequency Control in Non-Interconnected Islands

Student: TZIOTAS XRISTOS
Registration number: TH20040

Supervisor: Dr Georgios Orfanoudakis
Co-supervisor: Dr Pompodakis Evangelos

Heraklion, June 2026

Copyright© Χρήστος Τζιώτας 2026

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται κάθε χρήση για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του ΕΛΜΕΠΑ.

Ευχαριστιες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου του 2025-2026 στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Ιδιαίτερες και βαθύτατες ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή μου, κύριο Ευάγγελο Πομποδάκη. Η συμβολή του ήταν καταλυτική, με βοήθησε με τις γνώσεις του και την μεταδοτικότητά του. Τον ευχαριστώ για την άψογη συνεργασία, τον χρόνο του αλλά και τις υποδείξεις του που εξασφάλισαν το επιστημονικό επίπεδο αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Ορθανουδάκη, για την πολύτιμη συνδρομή του, τις επιστημονικές συμβουλές και την άριστη συνεργασία για όλη την διάρκεια της μελέτης.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου. Η ανιδιοτελής αγάπη, υπομονή και η συνεχής τους στήριξη ήταν το θεμέλιο για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας αλλά και όλης της φοιτητικής μου πορείας.

Contents

Περίληψη 6
Abstract 8
Ορολογία 10
Συντομογραφίες 10
Μεταβλητές 11
1 Εισαγωγή 12
1.1. Προκλήσεις των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών και Διείσδυση ΑΠΕ 12
1.2 Η Τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G) και τα Ηλεκτρικά Οχήματα 13
1.3 Πλεονεκτήματα των FCEVs έναντι των BEVs 13
2 Ταχύς έλεγχος συχνότητας μέσω Κυψέλες καυσίμου 16
2.1 Λειτουργία Αυτόνομων Νησιωτικών Συστημάτων 16
2.2 Αρχιτεκτονική Διασύνδεσης FCEV-to-Grid 17
2.3 Περιγραφή του αλγορίθμου ελέγχου συχνότητας στα FCEVs 18
3 Δομή και λειτουργία του Αεριοστροβίλου 24
3.1 Πρωτογενής Ρύθμιση Συχνότητας (Droop Control), δευτεροβάθμιος Έλεγχος και Επαναφορά Συστήματος (PI Control) 24
3.2 Παράμετροι Δικτύου και Εξωτερικές Διαταραχές 24
3.3 Πρόκληση των Συστημάτων Βασισμένων σε Αντιστροφείς 24
3.4 Μοντελοποίηση των FCEVs 25
4 Μελέτη Περίπτωσης 26
4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη δικτύου 26
4.2 Παραμετροποίηση Αδράνειας και Φορτίου 27
4.3 Διαχωρισμός σεναρίων 28
4.3.1 Πρώτο σενάριο (Ξαφνική πτώση αιολικής ισχύος κατά 30 MW, τρεις αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία) 28
4.3.2 Δεύτερο σενάριο (Ξαφνική πτώση της αιολικής ισχύος κατά 30 MW, δύο αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία) 29
4.3.3 Τρίτο σενάριο (Απότομη αύξηση ζήτησης με σταθερή αιολική παραγωγή) 29
4.3.4 Τέταρτο σενάριο (Αύξηση ζήτησης σε συνδυασμό ταυτοχρόνως με ξαφνική Απώλεια της Μεγαλύτερης Μονάδας Παραγωγής) 29
5 Παρουσίαση μοντέλων προσομοίωσης 31
5.1 Περιγραφή Μοντέλου προσομοίωσης 31
5.1.1 Μονάδες παραγωγής και Έλεγχος 32
5.1.2 Μοντέλο σεναρίου 1 (Ξαφνική πτώση αιολικής ισχύος κατά 30 MW, τρεις αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία) 37

5.1.3 Μοντέλο σεναρίου 2 (Ξαφνική πτώση της αιολικής ισχύος κατά 30 MW, δύο αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία) ... 38
5.1.4 Μοντέλο σεναρίου 3 (Απότομη αύξηση ζήτησης με σταθερή αιολική παραγωγή) 40
5.1.5 Μοντέλο σεναρίου 4 (Αύξηση ζήτησης σε συνδυασμό ταυτοχρόνως με ξαφνική Απώλεια της Μεγαλύτερης Μονάδας Παραγωγής) ... 42
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης πρώτου σεναρίου ... 44
5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης δεύτερου σεναρίου ... 49
5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης τρίτου σεναρίου ... 55
5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης τέταρτου σεναρίου ... 58
5.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων ... 62
6 Συμπεράσματα ... 67
7 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα ... 69
Αναφορές ... 71

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εστιάζει σε μια καινοτόμα προσέγγιση για τη παροχή ταχείας απόκρισης συχνότητας (Fast Frequency Response) σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της χρήσης ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων κυψέλης καυσίμου (FCEVs). Μεγάλη έμφαση δίνεται σε οχήματα βαρείας χρήσης, καθώς εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου και της ικανότητας τους παροχής ισχύος, έχουν τη δυνατότητα αποτελεσματικής συμβολής στην εξισορρόπηση του συστήματος. Η δυνατότητα τους να μεταβάλλουν ταχύτητα την ισχύ των κυψελών τους επιτρέπει την παροχή εικονικής αδράνειας (Virtual Inertia), παρέχοντας στο σύστημα την κρίσιμη στήριξη κατά τη διάρκεια διαταραχών, ιδιαίτερα σε απομονωμένα συστήματα.

Η υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας γίνεται μέσω αμφίδρομων μετατροπέων (inverters), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) της ηλεκτροχημικής αντίδρασης σε εναλλασσόμενο (AC), εναρμονισμένο με τις προδιαγραφές του δικτύου. Μέσω της μεθόδου droop control γίνεται η ρύθμιση της ισχύος, όπου η έγχυση ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη μεταβολή της συχνότητας, με σκοπό την εξασφάλιση των κρίσιμων πρωτευουσών εφεδρειών.

Από προσομοιώσεις σε ένα μοντέλο αυτόνομου νησιωτικού δικτύου, εξετάζονται διάφορα σενάρια απόκρισης. Μέσω των σεναρίων σταθεροποίησης καταδείχτηκε ότι η ταχεία απόκριση των οχημάτων περιορίζει τις διακυμάνσεις της συχνότητας σε περιπτώσεις αιχμής φορτίου, αποφεύγοντας την ενεργοποίηση των συστημάτων απόρριψης φορτίων.

Στο πιο κρίσιμο σενάριο διαταραχής εξετάστηκε η λειτουργία ενός στόλου 250 μονάδων, σε ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου και απώλειας της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας (20 MW). Παρά το γεγονός ότι οι αεριοστρόβιλοι έφτασαν στα μέγιστα όρια ισχύος τους, ο στόλος των οχημάτων απέτρεψε το blackout. Η συχνότητα του δικτύου επανήλθε στα φυσιολογικά επίπεδα σταδιακά και με αργό ρυθμό καθώς βασίστηκε αποκλειστικά στους ήδη επιβαρυμένους αεριοστροβίλους. Η παραπάνω ανάλυση απέδειξε τη σημασία του στρατηγικού σχεδιασμού των πόρων και του συντονισμού μεταξύ των οχημάτων και των θερμικών μονάδων.

Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση τονίζει την υψηλή βιωσιμότητα της λύσης. Για ένα δίκτυο 100 MW ένας στόλος 100 οχημάτων κρίθηκε επαρκής. Με τη κατανάλωση να

ανέρχεται σε 0,3 kg υδρογόνου ανά όχημα και συνολικό κόστος 150 ευρώ, η λύση είναι εξαιρετικά σημαντική, με το κόστος να είναι τρεις φορές μικρότερο συγκριτικά έναντι των κλασικών μπαταριών. Στην περίπτωση της αύξησης του φορτίου ταυτοχρόνως με την απώλεια της μεγαλύτερης γεννήτριας (20 MW), η ανάγκη για ισχύ αυξήθηκε σημαντικά, με την απαίτηση συμβολής 250 φορτηγών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναδειχτεί ένας κρίσιμος περιορισμό, ενώ τα FCEVs αποτρέπουν το άμεσο blackout προσφέροντας εικονική αδράνεια, η πλήρη ανάκαμψη της συχνότητας καθυστερεί. Αυτό γίνεται διότι οι αεριοστρόβιλοι που απομένουν, λειτουργούν στο μέγιστο της ισχύς τους. Αδυνατούν να καλύψουν το ενεργειακό έλλειμα μόλις εξαντληθεί το διαθέσιμο υδρογόνο των οχημάτων.

Μέσω της μελέτης συμπεραίνεται ότι ένας στόλος 100 οχημάτων αποτελούν τη βάση για την οικονομικά αποδοτική παροχή επικουρικών υπηρεσιών, αλλά για σοβαρές βλάβες απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων και χρειάζεται συντονισμός των αποθεμάτων υδρογόνου. Χωρίς την άμεση παρέμβαση των οχημάτων, το σύστημα καταλήγει σε κατάρρευση πριν προλάβουν οι θερμικές μονάδες να αντιδράσουν.

Η παρούσα μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αποτελούν προϊόν πρωτότυπης έρευνας του γράφοντος σε συνεργασία με τους Ε. Πομποδάκη και Γ.Ορφανουδάκη, η οποία δημοσιεύθηκε στο διεθνές περιοδικό Hydrogen (MDPI), έχοντας περάσει από τη διαδικασία επιστημονικής αξιολόγησης.

Λέξεις-Κλειδιά: Τεχνοοικονομική βιωσιμότητα, εικονική αδράνεια, ταχεία απόκριση συχνότητας, μη διασυνδεμένα νησιά, οχήματα κυψελών καυσίμου (FCVEs), τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G), Matlab/Simulink

Abstract

This study focuses on an innovative approach for providing Fast Frequency Response (FFR) in power systems by leveraging a fleet of Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs). Significant emphasis is placed on heavy-duty vehicles, which, due to the high energy density of hydrogen and their substantial power injection capability, can effectively contribute to system balancing. Their ability to rapidly modulate the output power of their fuel cells enables the provision of Virtual Inertia, offering critical support to the grid during disturbances, particularly in isolated systems.

The implementation of this process is achieved through bidirectional inverters, which are responsible for converting the Direct Current (DC) produced by the electrochemical reaction into Alternating Current (AC), fully synchronized with grid specifications. Power regulation is managed via the droop control method, where power injection is inversely proportional to the frequency deviation, aiming to secure essential primary reserves.

Various response scenarios were examined through simulations on an autonomous island grid model. The stabilization scenarios demonstrated that the rapid response of the vehicles limits frequency fluctuations during peak load conditions, preventing the activation of Under-Frequency Load Shedding (UFLS) systems. In the most critical disturbance scenario, the operation of a 250-unit fleet was tested under a simultaneous load increase and the loss of the largest thermal unit (20 MW). Despite the marginal state of the gas turbines, the FCEV fleet prevented a blackout; however, frequency recovery was gradual due to limited hydrogen reserves. This analysis proved the importance of strategic resource planning and coordination between vehicles and thermal units.

The techno-economic evaluation highlights the high viability of the solution. For a 100 MW grid, a fleet of 100 vehicles was deemed sufficient for standard operations. With consumption amounting to 0.3 kg of hydrogen per vehicle and a total daily cost of 150 euros, the solution is highly significant, with costs being three times lower than those of conventional battery storage. In the event of a simultaneous load increase and the loss of the largest generator (20 MW), power demand increased significantly, requiring the contribution of 250 trucks. At this point, a critical limitation must be highlighted:

while FCEVs prevent an immediate blackout by providing virtual inertia, full frequency recovery is delayed because the remaining gas turbines operate at maximum capacity. They are unable to cover the energy deficit once the vehicles' available hydrogen is exhausted.

The study concludes that a fleet of 100 vehicles forms the basis for economically efficient ancillary services, but severe contingencies require a larger number of vehicles and meticulous coordination of hydrogen reserves. Without the immediate intervention of the vehicles, the system would collapse before thermal units could react.

The methodology and results of this study are the product of original research by the author in collaboration with E. Pompodakis and G. Orfanoudakis, published in the international journal Hydrogen (MDPI) following a peer-review process.

Keywords: Techno-economic viability, virtual inertia, fast frequency response, non-interconnected islands, fuel cell electric vehicle (FCEVs), Vehicle-to-Grid technology, Matlab/Simulink

Ορολογία

Συντομογραφίες

FCEV	Ηλεκτρικά οχήματα κυψέλων καυσίμου
FC	Κυψέλες καυσίμου
DC	Συνεχές ρεύμα
NII	Μη διασυνδεμένα νησιά
BESS	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών
RES	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
AC	Εναλλασσόμενο ρεύμα
ESS	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας
EV	Ηλεκτρικά οχήματα
V2G	Σύνδεση οχήματος με δίκτυο
BEV	Ηλεκτρικά οχήματα μπαταριών
PV	Φωτοβολταϊκό
FCEV2G	Σύνδεση ηλεκτρικού οχημάτων κυψέλης καυσίμου με δίκτυο
CSO	Αλγόριθμος ανταγωνιστικής βελτιστοποίησης σμήνους
ICA	Αλγόριθμος Ιμπεριαλιστικού Ανταγωνισμού
BEV2G	Σύνδεση ηλεκτρικού οχημάτων μπαταριών με δίκτυο
G2V	Σύνδεση δικτύου με όχημα
VI	Εικονική αδράνεια
IBDG	Διεσπαρμένη Παραγωγή βασισμένη σε Μετατροπέα
ROCOF	Ρυθμός μεταβολής της συχνότητας
CAPEX	Ετησιοποιημένο κεφαλαιουχικό κόστος

Μεταβλητές

P_{fcev}	Συνολική ενεργός ισχύ εξόδου FCEV
$P_{fcev,vi}$	Συνιστώσα εικονικής αδράνειας της ενεργού ισχύος εξόδου των FCEV
$P_{fcev,droop}$	Συνιστώσα ελέγχου στατιστικής (droop control) της ενεργού ισχύος εξόδου
$T_r(s)$	Συνάρτηση ρυθμού ανόδου ισχύος (power ramp-up function)
H_{eq}	Ισοδύναμη αδράνεια του νησιωτικού συστήματος
S_{base}	Βασική ισχύς συστήματος (συνολική ισχύς θερμικών μονάδων παραγωγής)
ΔP_{wind}	Μεταβολή αιολικής ισχύος
ΔP_L	Μεταβολές φορτίου
T_d	Καθυστέρηση εκκίνησης

1 Εισαγωγή

1.1. Προκλήσεις των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών και Διείσδυση ΑΠΕ

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μια ιδιαίτερα βιώσιμη και υποσχόμενη λύση για τα αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα. Η ενσωμάτωση τους περιορίζει δραστικά το λειτουργικό κόστος παραγωγής, μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και ελαχιστοποιεί τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO2) [1, 2]. Παρά τα οφέλη αυτά, η βασική πρόκληση που αντιμετωπίζουν τα συγκεκριμένα συστήματα εντοπίζεται στη χαμηλή εγγενή τους αδράνεια και στο μικρό μέγεθός τους, παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα και θέτουν σε κίνδυνο την ευστάθεια της συχνότητας.

Εξαιτίας των παραπάνω περιορισμών, οι διαχειριστές των μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ) έχουν ορίσει αυστηρά όρια διείσδυσης των ΑΠΕ, θεσπίζοντας περιορισμούς στη στιγμιαία ισχύ που αυτές προσφέρουν με την συνολική ζήτηση του συστήματος [3,4]. Σημαντικά παραδείγματα αποτελούν η Ελλάδα και η Γαλλία [5], όπου το προαναφερόμενο όριο έχει οριστεί στο 30%. Η αυστηρή τήρηση αυτής της πολιτικής είναι αναγκαία για την προστασία του συστήματος και για να αποφευχθούν φαινόμενα πλεονάζουσας παραγωγής, όμως η προσέγγιση αυτή δρα ανασταλτικά στην πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού και των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι τεχνολογίες ΑΠΕ.

Για την αντιμετώπιση του περιορισμού αξιοποίησης των ΑΠΕ και των προβλημάτων ευστάθειας συχνότητας, προτάθηκε και αναλύθηκε ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών λύσεων. Μια κύρια προσέγγιση περιλαμβάνει τον έλεγχο της πλευράς της ζήτησης, καθώς και την παροχή προσομοιωμένης αδράνειας. Όμως, οι προτάσεις αυτές συχνά κρίνονται μη επαρκείς σε συστήματα υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών, καθώς αδυνατούν να εγγυηθούν την απαιτούμενη δυναμική απόδοση του ελέγχου [8]. Οι μέθοδοι αυτές οδηγούν σε αναποτελεσματική εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού, καθώς οι πηγές ΑΠΕ υποχρεώνονται να λειτουργούν σε σημείο λειτουργίας κάτω από τη μέγιστη ισχύ με σκοπό τη διατήρηση επαρκών εφεδρείων για την κάλυψη πιθανών ελλειμμάτων ισχύος.

Εναλλακτικά προτάθηκε η ενσωμάτωση ταχέων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές [9]. Σύγχρονες μελέτες επικεντρώνονται σε διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης, τονίζοντας τη δυνατότητά τους να παρέχουν κρίσιμη υποστήριξη στα ηλεκτρικά δίκτυα. Παρά τις προοπτικές τους, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από σημαντικούς περιορισμούς, όπως η ταχεία λειτουργική υποβάθμιση λόγω των συνεχόμενων κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης [10], αλλά και το υψηλό κόστος κεφαλαιουχικής επένδυσης σε μεγάλη κλίμακα. Τα παραπάνω στοιχεία δυσχεραίνουν την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων BESS ως αυτόνομων λύσεων για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών.

1.2 Η Τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G) και τα Ηλεκτρικά Οχήματα

Η ραγδαία διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων δημιουργεί νέες προοπτικές για οικιακές και βιομηχανικές ενεργειακές εφαρμογές. Δεδομένου ότι τα οχήματα αυτά θα παραμένουν σταθμευμένα κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας [13], αναδεικνύεται η δυνατότητα αξιοποίησης τους για την παροχή κρίσιμων ενεργειακών υπηρεσιών κατά τη διάρκεια της περιόδου αδράνειας τους.

Η τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G) δίνει τη δυνατότητα στα ηλεκτρικά οχήματα να δρουν ως συμπληρωματικοί, δυναμικοί πόροι ισχύος κατά τη διάρκεια της σύνδεσης τους με το δίκτυο, καθιστώντας ευκολότερη τόσο τη διαθεσιμότητα τους όσο και την παροχή της αποθηκευμένης ενέργειας [14]. Η αμφίδρομη ροή ενέργειας, καθιστά δυνατή την έγχυση ισχύος από τα ηλεκτρικά οχήματα προς το ηλεκτρικό δίκτυο, ενισχύοντας την επιχειρησιακή ευελιξία, τη λειτουργική απόδοση και τη συνολική ευστάθεια του δικτύου. Επομένως, η τεχνολογία V2G καθιερώνεται ως μια πρωτοποριακή λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και τη διασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος μέσω προηγμένων μηχανισμών συναλλαγής ενέργειας [16].

1.3 Πλεονεκτήματα των FCEVs έναντι των BEVs

Ιστορικά, έρευνες σχετικά με τα συστήματα Vehicle-to-Grid (V2G) εστίαζαν στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στα ηλεκτρικά οχήματα συσσωρευτών (BEVs) [17,18], καθώς τα οχήματα κυψέλης καυσίμου (FCEVs) ταξινομούνται ως μια ξεχωριστή

κατηγορία με πιο αργή διείσδυση στην αγορά. Η κατάσταση αυτή έχει αλλάξει σημαντικά, με ορισμένες από τις μεγαλύτερες αυτοκινητοβιομηχανίες (όπως οι Hyundai, Toyota, Honda και Mercedes-Benz) να προσφέρουν πλέον εμπορικά μοντέλα όπως τα Hyundai Nexo [19] και Toyota Mirai [20]. Η αξία του υδρογόνου αναδεικνύεται με την ενσωμάτωση του πρώτου λεωφορείου υδρογόνου, που εισάχθηκε στον στόλο της Αθήνας [23]. Επιπλέον σχετική έκθεση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [24] το χαρακτηρίζει ως σημαντικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα των μεταφορών. Συγκρίνοντας τα FCEVs με τα BEVs, τα πρώτα συνιστούν μια ανταγωνιστική λύση καθώς υπερτερούν σε ταχύτητα ανεφοδιασμού και σε αυτονομία.

Ως ηλεκτρικά οχήματα, τα FCEVs έχουν τη δυνατότητα να ενταχθούν σε συστήματα V2G, αναλαμβάνοντας τη λειτουργία καινοτόμων μονάδων παραγωγής ισχύος. Η βιβλιογραφία που αναφέρεται στην χρήση τους σε εφαρμογές V2G συνεχίζει να είναι περιορισμένη. Οι πρώτες μελέτες εστίασαν σε θεωρητικά πλαίσια, με τα FCEVs να εξετάζονται ως κατανεμημένες γεννήτριες και αξιολογήθηκε η οικονομική τους σκοπιμότητα σε διάφορες αγορές ενέργειας [25-29]. Συγχρόνως, έρευνες επικεντρώθηκαν στην εξισορρόπηση φορτίων σε κτηριακό επίπεδο ή επίπεδο κοινότητας, παρέμειναν όμως σε επίπεδο θεωρητικής μοντελοποίησης [30-35].

Σε δεδομένα που λήφθηκαν από πρόσφατες έρευνες τονίζεται ότι η διασύνδεση των FCEVs με το δίκτυο μπορεί να προσφέρει μείωση του κόστους για τους καταναλωτές αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Χαρακτηριστικά, ο Inci [36] προχώρησε στην ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης συστήματος FCEVs-to-Grid, το οποίο πλαισιώνεται από φωτοβολταϊκά. Ενώ σε άλλες μελέτες έγινε χρήση προσομοίωσης Monte Carlo και γενετικούς αλγορίθμους [37] ή υβριδικά μοντέλα βελτιστοποίησης [38], επισημαίνοντας σημαντικό αναπτυξιακό δυναμικό και οικονομικά οφέλη. Επιπλέον για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών προτάθηκαν αποδοτικές διεπαφές μετατροπέων [39-41]. Οι Olderbroek κ.α. [42] σε πειραματικό επίπεδο χρησιμοποίησαν ένα τροποποιημένο Hyundai ix35, αποδεικνύοντας ότι τα FCEVs διαθέτουν ταχύτερους χρόνους απόκρισης σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες ταχείας αντίδρασης, με το παραπάνω να τα καθιστά ιδανικά για να ελεγχθεί η συχνότητα και η απόσβεση των διακυμάνσεων που προκαλεί η στοχαστικότητα των ΑΠΕ.

Μολαταύτα, παρά την υπάρχουσα βιβλιογραφία [25-41], δεν έχει ερευνηθεί πλήρως, η δυνατότητα των FCEVs για ταχύ έλεγχο συχνότητας. Μολονότι σε αναφορές [42] εξετάζεται ο χρόνος εκκίνησης (ramp-up και start-up), απουσίαζαν από την ανάλυση οι κρίσιμες δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των FCEVs και άλλων στοιχείων του δικτύου (θερμικές μονάδες, ΑΠΕ, φορτία) όσο διαρκούν οι διαταραχές του ισοζυγίου. Μεγάλης σημασίας αποτελεί η κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων για την αξιολόγηση της συνολικής ευστάθειας.

Συμπληρωματικά λόγω θεμελιωδών διαφορών οι γνώσεις από την τεχνολογία BEV2G δεν μπορούν να μεταφερθούν άμεσα στα FCEVs. Τα FCEVs διαθέτουν υψηλότερη ενεργειακή χωρητικότητα, μεγαλύτερους χρόνους εκκίνησης και δεν έχουν την δυνατότητα άμεσης απορρόφησης ισχύος από το δίκτυο. Η παρούσα εργασία έχει σκοπό καλύψει αυτό το ερευνητικό κενό, παρέχοντας ανάλυση τεχνικής σκοπιμότητας των FCEVs για την παροχή εικονικής αδράνειας και πρωτευουσών εφεδρειών σε δίκτυα μη διασυνδεμένων νησιών. Η έρευνα επικεντρώνεται στις παραμέτρους της χρονικής υστέρησης και του ρυθμού απόκρισης, εκτιμώντας το ελάχιστο μέγεθος στόλου για την σταθεροποίηση της συχνότητας, ενώ συγχρόνως αξιολογείται η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος βάσει της κατανάλωσης υδρογόνου που έχει εκτιμηθεί.

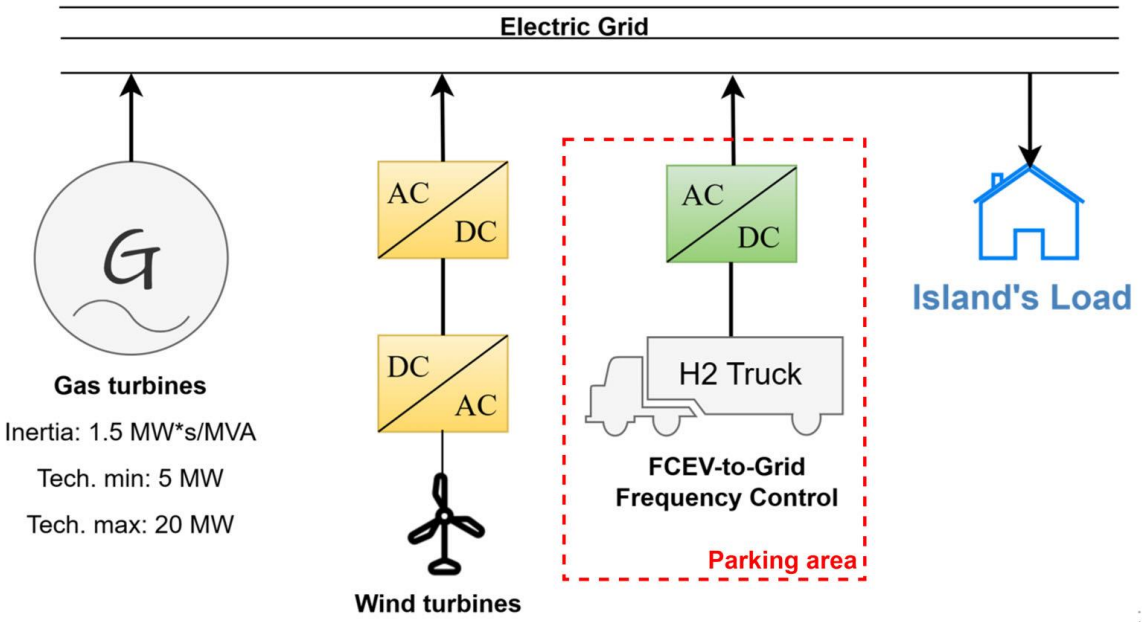
2 Ταχύς έλεγχος συχνότητας μέσω Κυψέλες καυσίμου

2.1 Λειτουργία Αυτόνομων Νησιωτικών Συστημάτων

Τα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα των μη διασυνδεμένων νησιών (ΜΔΝ) αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την διαχείριση των ισοζυγίων ισχύος και την διασφάλιση της ποιότητας ισχύος. Η απουσία της διασύνδεσης με το ηπειρωτικό σύστημα μεταφοράς αναδεικνύει τα δίκτυα αυτά σε ευάλωτα στις απότομες μεταβολές παραγωγής και ζήτησης. Η κάλυψη του φορτίου και η ρύθμιση της συχνότητας σε αυτά τα συστήματα , βασίζονται αποκλειστικά σε θερμικές μονάδες, που περιλαμβάνουν ατμοστροβίλους, αεριοστροβίλους και πετρελαιοκινητήρες.

Εμβαθύνοντας στο ζήτημα, οι μονάδες πετρελαίου χαρακτηρίζονται από υψηλή αξιοπιστία και λειτουργική ευελιξία, έχοντας όμως σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα στο περιβάλλον και υψηλό λειτουργικό κόστος. Οι ατμοστρόβιλοι, παρά τον σημαντικό τους ρόλο στη βασική παραγωγή, παρουσιάζουν υψηλή θερμική αδράνεια και κατά συνέπεια αργή απόκριση στις μεταβολές του φορτίου. Σε αντίθεση, οι αεριοστρόβιλοι διακρίνονται για την ταχύτητα απόκρισης του, λειτουργώντας ως κύριο μέσο αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της συχνότητας.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1(α), από την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως αιολικών και φωτοβολταϊκών σταθμών, συντελεί στον περιορισμό χρήσης ορυκτών καυσίμων. Όμως, από την στοχαστική φύση των ΑΠΕ εισάγεται έντονη μεταβλητότητα στο σύστημα, καθιστώντας επιτακτική την υιοθέτηση καινοτόμων και ευέλικτων λύσεων για να διατηρηθεί η δυναμική ευστάθεια της συχνότητας, ειδικά σε καταστάσεις όπου οι αεριοστρόβιλοι αδυνατούν να καλύψουν το έλλειμμα ισχύος.



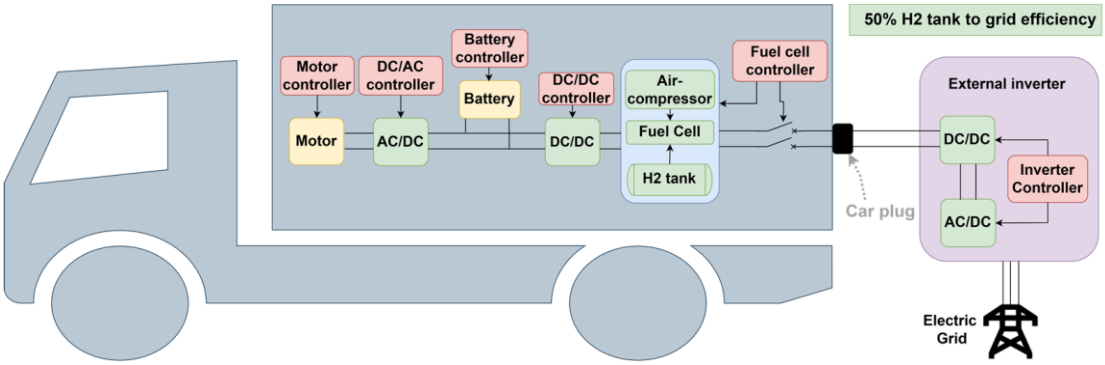
Σχήμα 1(α), Σχηματική απεικόνιση συστήματος ταχείας ρύθμισης συχνότητας μέσω FCEV

2.2 Αρχιτεκτονική Διασύνδεσης FCEV-to-Grid

Για την ενίσχυση της ευστάθειας των νησιωτικών συστημάτων, μια νέα προσέγγιση αποτελεί η χρήση οχημάτων κυψέλης καυσίμου (FCEVs) μέσω της τεχνολογίας Vehicle-to-Grid (V2G). Τα οχήματα αυτά έχουν τη λειτουργία κατανεμημένων, κινητών μονάδων παροχής ενέργειας, όπου η κυψέλη καυσίμου επιτυγχάνει την μετατροπή του αποθηκευμένου υδρογόνου σε συνεχή ηλεκτρική ισχύ (DC). Όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα 1(β), η διασύνδεση των FCEVs με το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ειδικά διαμορφωμένες υποδομές στάθμευσης μέσω εξωτερικών αμφίδρομων αντιστροφέων (inverters). Ο αντιστροφέας έχει διπλό ρόλο λειτουργίας, πρωτίστως μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της κυψέλης σε εναλλασσόμενο (AC), εξασφαλίζοντας τον πλήρη συγχρονισμό με τις παραμέτρους του δικτύου, μεταγενέστερα επεξεργάζεται δεδομένα συχνότητας σε πραγματικό χρόνο για τον ακριβή έλεγχο της παρεχόμενης ισχύος.

Στους αντιστροφείς ο έλεγχος στηρίζεται σε δύο μηχανισμούς που αλληλοσυμπληρώνονται, θωρακίζοντας το σύστημα σε διάφορα στάδια διαταραχής. Αρχικά μέσω της εικονικής αδράνειας (Virtual Inertia) και της παραγωγικής συνιστώσας του ελέγχου, η δυναμική συμπεριφορά των περιστρεφόμενων μαζών των συμβατικών γεννητριών προσομοιώνεται από τον αντιστροφέα. Κατά την εμφάνιση

υψηλού ρυθμού μεταβολής της συχνότητας (ROCOF), το σύστημα ανταποκρίνεται ακαριαία, παρέχοντας στιγμιαία ισχύ για να αναχαιτιστεί η αρχική ολίσθηση της συχνότητας. Συγχρόνως, ο μηχανισμός στατικής κλίσης επιτρέπει στον αντιστροφέα να αντιδρά στην ολική απόκλιση της συχνότητας, με τη παρεχόμενη ισχύ να αυξάνεται αναλογικά όταν η τιμή της συχνότητας υποχωρεί κάτω από το ονομαστικό όριο των 50 Hz. Συνδυάζοντας την ακαριαία απόκριση αδράνειας με την αναλογική ρύθμιση της στατικής κλίσης μετατρέπει τα FCEVs σε μια δυναμική εφεδρεία υψηλής αξιοπιστίας, με τη δυνατότητα να οδηγεί το ηλεκτρικό σύστημα σε ένα νέο σταθερό σημείο ισορροπίας και να ενισχύει τη λειτουργική ευρωστία των αυτόνομων νησιωτικών δικτύων έναντι των διαταραχών ισοζυγίου.



Σχήμα 1(β), Διάγραμμα ηλεκτρικής διασύνδεσης και ροής ισχύος FCEV

2.3 Περιγραφή του αλγορίθμου ελέγχου συχνότητας στα FCEVs

Ο μηχανισμός ελέγχου στατικής κλίσης (Droop control) αποτελεί τη βάση για την αυτοματοποίηση της πρωτογενούς ρύθμισης συχνότητας στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω της αξιοποίησης της τεχνολογίας V2G, τα οχήματα FCEVs λειτουργούν ως διασυνδεμένες κατανεμημένες πηγές, με τις κυψέλες καυσίμου να ρυθμίζουν τη παραγωγή τους, για να εξασφαλιστεί η απαραίτητη αντιστάθμιση των συχνοτικών αποκλίσεων.

Η λειτουργία του ελέγχου droop βασίζεται σε μια γραμμική σχέση αναλογίας ανάμεσα στην απόκλιση συχνότητας (Δ_f) και της αντίστοιχης μεταβολής της παρεχόμενης ισχύος (Δ_P). Καθοριστικής σημασίας είναι η μαθηματική συσχέτιση για την αποκατάσταση του ενεργειακού ισοζυγίου σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα,

σε περιπτώσεις ανισορροπίας ισχύος όπως κατά τη διάρκεια απώλειας κάποιας συμβατικής μονάδας βάσης ή κατά τη διάρκεια μιας αιφνίδιας αύξησης του φορτίου, η συχνότητα του συστήματος υποχωρεί.

Ο αλγόριθμος droop που είναι ενσωματωμένος στον εξωτερικό αντιστροφέα λαμβάνει σήμα ενεργοποίησης από αυτή τη πτώση. Ο αντιστροφέας εκτελεί μετρήσεις υψηλής δειγματοληψίας στο σημείο κοινής σύνδεσης, με ακρίβεια γίνεται η ανίχνευση της απόκλισης από την ονομαστική τιμή των 50 Hz. Μόλις ανιχνευτεί υποσυχνότητα, το σύστημα ελέγχου δίνει εντολή στις κυψέλες καυσίμου για να αυξηθεί η ηλεκτροχημική παραγωγή. Μέσω του συντελεστή στατισμού (R) προσδιορίζεται το μέγεθος της πρόσθετης ισχύος, καθορίζοντας την ευαισθησία και ένταση της απόκρισης του συστήματος στη διαταραχή.

$$\Delta P = -\frac{1}{R} * \Delta_f \qquad (1)$$

Το αρνητικό πρόσημο της μαθηματικής σχέσης εκφράζει την αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε συνάρτηση με τη μείωση της συχνότητας, με τον μηχανισμό να λειτουργεί αντισταθμίζοντας το έλλειμμα ισχύος. Η ταχύτητα με την οποία τα οχήματα FCEV που είναι σταθμευμένα παρέχουν ισχύ στο δίκτυο περιορίζει το εύρος της πτώσης της συχνότητας, διατηρώντας την εντός των ορίων ευστάθειας. Σε αντίθεση με τις θερμικές μονάδες, που παρουσιάζουν χρονικές υστερήσεις λόγω της δυναμικής τροφοδοσίας καυσίμου και της θερμικής αδράνειας, οι κυψέλες καυσίμου έχουν τη δυνατότητα μεταβολής της ισχύος εξόδου τους με σχεδόν στιγμιαίο ρυθμό απόκρισης.

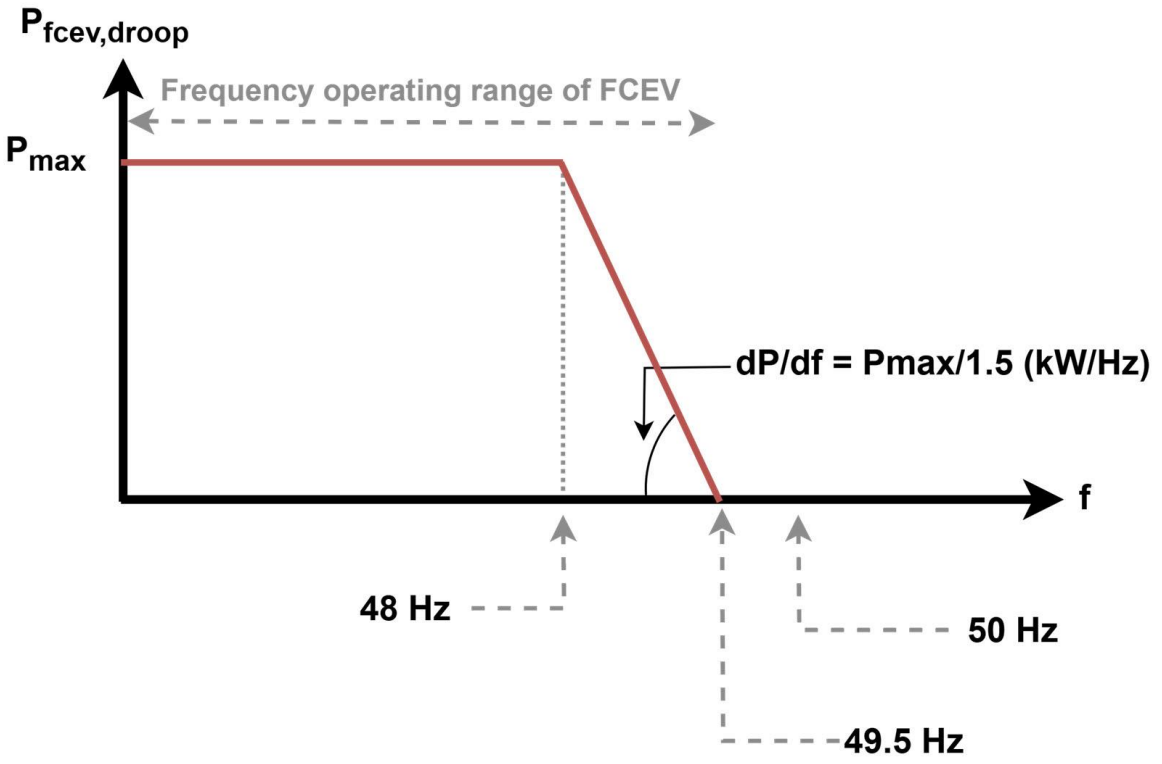
Κύριος στόχος αυτής της κατανεμημένης απόκρισης είναι η αποτροπή ενεργοποίησης των προστατευτικών διατάξεων και των συστημάτων απόρριψης φορτίου. Μέσω της αξιοποίησης του ελέγχου droop, τα FCEVs αποτελούν μια κλιμακωτή και αξιόπιστη λύση για να ενισχυθεί η λειτουργική ανθεκτικότητα των ευάλωτων νησιωτικών δικτύων. Συγχρόνως, γίνεται διασφάλιση της ομαλής μετάβασης του συστήματος σε μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας, καθιστώντας εφικτό τον έλεγχο των μεταβατικών φαινομένων με αποτελεσματικό και ελεγχόμενο τρόπο.

$$P_{fcev,droop} = \begin{cases} 0 \ \varepsilon\alpha\nu \ f > 49{,}5 \ Hz \\ K_{droop} * (48{,}5 - f) \ \varepsilon\alpha\nu \ 48 \ Hz < f < 49{,}5 \ Hz \\ P_{max} \ \varepsilon\alpha\nu \ f < 48 \ Hz \end{cases} \quad (2)$$

Ο μηχανισμός ελέγχου σχεδιάστηκε με γνώμονα τη λειτουργία εντός των διακριτών ορίων ενεργοποίησης, εξασφαλίζοντας την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα του συστήματος. Με την προσέγγιση αυτή αποτρέπεται η άσκοπη καταπόνηση των κυψελών καυσίμου, παρατείνοντας τον κύκλο ζωής τους. Η δυναμική απόκριση του συστήματος χωρίζεται σε τρεις διακριτές ζώνες λειτουργίας, όπου κάθε ζώνη επιτελεί ένα συγκεκριμένο ρόλο για τη διατήρηση της ευστάθειας.

Για τον περιορισμό των διακυμάνσεων συχνότητας και συγκεκριμένα για αποκλίσεις μικρότερες των 0,5 Hz, το σύστημα θα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής. Εντός αυτής της περιοχής, οι αεριοστρόβιλοι είναι αποκλειστικά υπεύθυνοι για τη σταθεροποίηση του δικτύου. Η ενεργοποίηση των FCEVs πραγματοποιείται μόνο όταν η συχνότητα υποχωρήσει κάτω από την τιμή των 49,5 Hz, με τον αποκλεισμό την άσκοπης δέσμευσης πόρων οχημάτων σε διαταραχές μικρής κλίμακας όπου η συμβολή τους δεν είναι απαραίτητη.

Μέσω κατάλληλης παραμετροποίησης, FCEVs αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ που διαθέτουν (P_{max}) στην σημαντική περιοχή των 48 Hz, τιμή που ορίζεται ως το καταληκτικό όριο ευστάθειας για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Στα αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα, οι έντονες διακυμάνσεις αποτελούν συνηθισμένο φαινόμενο που οφείλονται στην περιορισμένη αδράνεια. Συνεπώς, η συγκεκριμένη ζώνη αποτελεί το τελευταίο μηχανισμό ρύθμισης για να διασφαλιστεί η ευστάθεια και να αποτραπεί ο κίνδυνος ολικής κατάρρευσης του συστήματος.



Σχήμα 2: Έλεγχος droop συχνότητας για τα FCEVs

Το σύστημα χαρακτηρίζεται ως πλήρως αυτοματοποιημένο, όταν η δευτερογενής ρύθμιση των θερμικών μονάδων επαναφέρει τη συχνότητα σε τιμές πάνω από 49,5 Hz, η ισχύ που παρέχεται από τα FCEVs διακόπτεται. Η παύση αυτή δίνει τη δυνατότητα στο δίκτυο να επιστρέψει σε κατάσταση ηρεμίας, παρέχοντας το αναγκαίο περιθώριο στους κεντρικούς ελεγκτές για την επαναφορά και τη διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή των 50 Hz. Όμως για τη σχεδίαση μιας ταχύτατης και ολοκληρωμένης πρωτογενούς απόκρισης, η απλή αναλογική ρύθμιση δεν είναι επαρκής. Η προσομοίωση της φυσικής αδράνειας των περιστρεφόμενων μαζών των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών καθίσταται αναγκαία, με αυτήν να αντιστέκεται ακαριαία σε οποιαδήποτε αλλαγή της συχνότητας. Μέσω του όρου της Εικονικής Αδράνειας (Virtual Inertia) υλοποιείται στον αλγόριθμο του αντιστροφέα η λειτουργία αυτή. Στην περίπτωση αυτή, η παρεχόμενη ισχύς των FCEVs υπολογίζεται ως συνάρτηση της παραγώγου της συχνότητας ως προς τον χρόνο (d_f/d_t), συνδυαστικά με την σταθερή αδράνεια (H). Η παραγωγική αυτή συνιστώσα επιτρέπει στο σύστημα να αντιδράσει σύμφωνα με τον ρυθμό μεταβολής της διαταραχής, παρέχοντας την απαραίτητη δυναμική αντίδραση κατά τη διάρκεια των πρώτων χιλιοστών του δευτερολέπτου.

$$P_{fcev,vi} = -K_{vi} \times \frac{df}{dt} \quad (3)$$

Ο θετικός συντελεστής κέρδους K_{in}, όπως ορίζεται από την εξίσωση (3), μέσω του οποίου τα οχήματα έχουν την δυνατότητα να ανταποκριθούν δυναμικά στον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (ROCOF). Από την παραπάνω λειτουργία, τα οχήματα FCEVs παρέχουν τεχνική αδράνεια, καλύπτοντας το έλλειμα της απόκρισης αδράνειας που παρατηρείται σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Η παρέμβαση αυτή είναι μεγάλης σημασίας για τα πρώτα χιλιοστά του δευτερολέπτου έπειτα από μια διαταραχή, για να μετριάσει την απότομη κλίση της πτώσης της συχνότητας.

Η αρχιτεκτονική που προτείνεται αποτελείται από δύο μηχανισμούς, διασφαλίζοντας ένα πλαίσιο για την αντιμετώπιση των διαταραχών ισχύος. Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση (3) είναι θεμελιώδες για την σταθερότητα του βρόχου ανάδρασης. Διασφαλίζεται ότι σε περιπτώσεις πτώσης της συχνότητας, με τον ρυθμό μεταβολής να είναι αρνητικός ($^{df}/_{dt} < 0$), η ισχύ της εικονικής αδράνειας που παρέχεται (P_{in}) λαμβάνει θετική τιμή. Κατά συνέπεια, η ισχύ εγχέεται στο δίκτυο την στιγμή που εντοπίζεται έλλειμα παραγωγής.

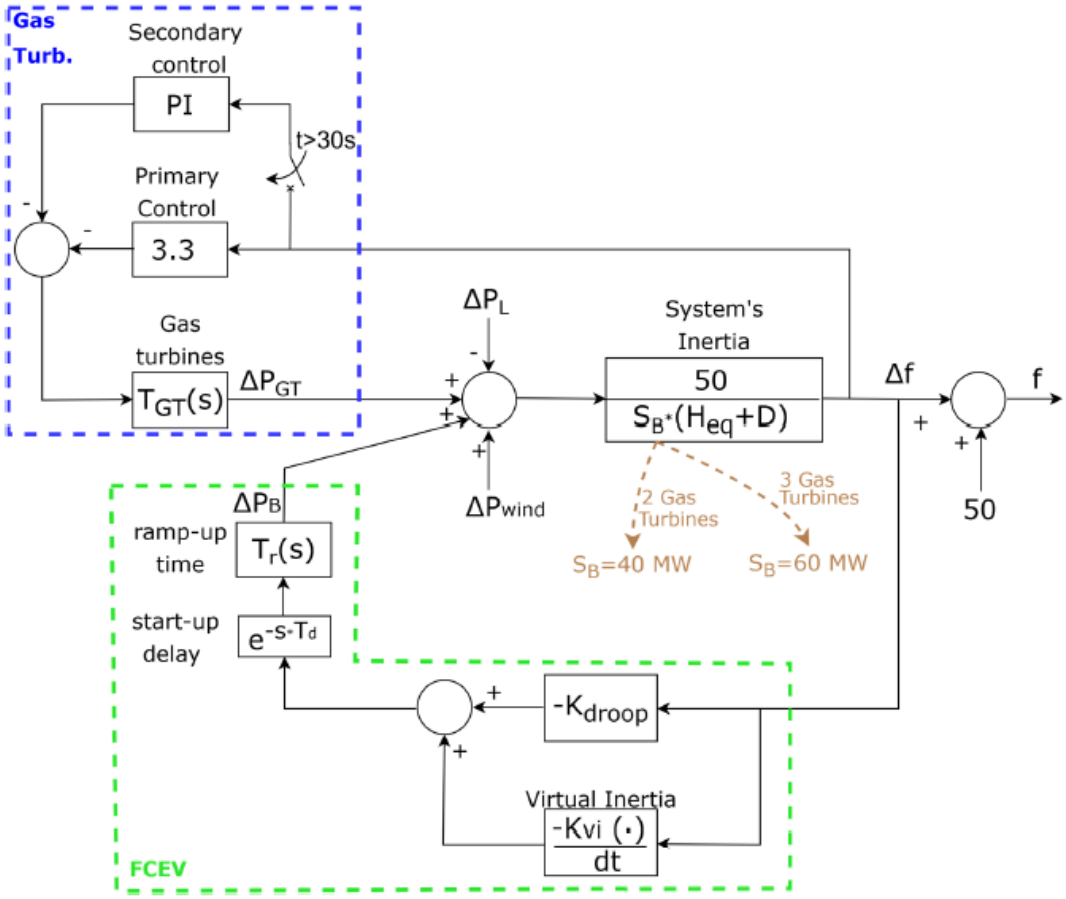
Η συνολική ισχύς που παρέχεται από τα FCEVs (P_{fcev}) προκύπτει από την υπέρθεση των δύο μηχανισμών ελέγχου (droop και virtual inertia). Από την εξίσωση (4), μέσω του συνδυασμού αυτού εξασφαλίζεται μια απόκριση από δύο διαφορετικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, ο έλεγχος της εικονικής αδράνειας έχει ακαριαία αντίδραση στον ρυθμό ολίσθησης της συχνότητας. Στόχος είναι ο περιορισμός της αρχικής κλίσης της διαταραχής, παρέχοντας στον δίκτυο τον χρόνο που απαιτείται για να ενεργοποιηθούν οι υπόλοιποι ρυθμιστικοί μηχανισμοί. Στο δεύτερο στάδιο, ο έλεγχος droop ανταποκρίνεται στο μέγεθος της απόκλισης συχνότητας (Δ_f). Με σκοπό την σταθεροποίηση της συχνότητας σε ένα νέο σημείο ισορροπίας και την διατήρηση εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας.

Από την ολοκληρωμένη αυτή στρατηγική, τα FCEVs είναι σε θέση να προσφέρουν μια αξιόπιστη πρωτογενή ρύθμιση. Με την ικανότητα προσομοίωσης των περιστρεφόμενων μαζών και η λειτουργία τους ως ταχύς εφεδρείες ισχύος, αναδεικνύονται ως ιδανικοί πόροι για την υποστήριξη της ευστάθειας αυτόνομων νησιωτικών δικτύων. Ενώ για την επιτυχημένη διαχείριση των διαταραχών και την

αποφυγή φαινομένων ολικής κατάρρευσης του συστήματος, η ταχύτητα και η ακρίβεια της απόκρισης είναι βασικές προϋποθέσεις.

$$P_{fcev} = P_{fcev,droop} + P_{fcev,vi} \quad (4)$$

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος που μελετάται, μοντελοποιείται εξ ολοκλήρου στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας Laplace (s). Η προσέγγιση αυτή κρίνεται θεμελιώδης, καθώς επιτρέπει τον ακριβή σχεδιασμό των παραμέτρων των ελεγκτών και τη λεπτομερή ανάλυση της μεταβατικής απόκρισης του νησιωτικού δικτύου υπό συνθήκες διαταραχής. Μέσω συναρτήσεων μεταφοράς, καθίσταται εφικτή η μελέτη της ευστάθειας του συστήματος και ο προσδιορισμός της επίδρασης των FCEVs στον περιορισμό των διακυμάνσεων της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 3: Διάγραμμα βαθμίδων μελέτης

3 Δομή και λειτουργία του Αεριοστροβίλου

Ο αεριοστρόβιλος αποτελεί την κύρια μονάδα ρύθμισης, η οποία μέσω ενός κλειστού βρόχου ανατροφοδότησης της απόκλισης συχνότητας αλληλεπιδρά με το σύστημα, με την λειτουργία του να διακρίνεται σε δύο στάδια.

3.1 Πρωτογενής Ρύθμιση Συχνότητας (Droop Control), δευτεροβάθμιος Έλεγχος και Επαναφορά Συστήματος (PI Control)

Κατά την πρωτογενή ρύθμιση, ο αεριοστρόβιλος προσφέρει ακαριαία απόκριση στις μεταβολές της συχνότητας, παρέχοντας εφεδρείες ισχύος με συντελεστή στατισμού 3,3 MW/Hz. Ο συντελεστής αυτός αποτελεί κέρδος της μονάδας, σύμφωνα με του οποίου γίνεται ο προσδιορισμός της πρόσθετης ισχύος εξόδου για κάθε μονάδα απόκλισης από την ονομαστική τιμή συχνότητας. Η ενεργοποίηση της δευτερογενούς ρύθμισης πραγματοποιείται ύστερα από 30 δευτερόλεπτα. Η υλοποίηση της διαδικασίας γίνεται μέσω ενός PI ελεγκτή, που στόχος του είναι να επιτύχει τη πλήρη εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος (steady state error) και στην επαναφορά της συχνότητας του συστήματος στην ονομαστική τιμή των 50 Hz.

3.2 Παράμετροι Δικτύου και Εξωτερικές Διαταραχές

Στο μοντέλο γίνεται εισαγωγή των τυχαίων διακυμάνσεων του φορτίου (ΔP_L) και η μεταβλητότητα στη παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΔP_{RES}) ως ανεξάρτητες μεταβλητές διαταραχής. Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν τη κύρια πηγή των αποκλίσεων ισορροπίας, καθιστώντας αναγκαία την άμεση ενεργοποίηση των μηχανισμών ελέγχου. Η ικανότητα του δικτύου να αντιστέκεται σε απότομες μεταβολές μοντελοποιείται μέσω ονομαστικής ισχύος βάσης (S_{base}) και της ισοδύναμης σταθεράς αδράνειας (H_{eq}). Θεμελιώδους σημασίας είναι η παράμετρος H, καθώς γίνεται η περιγραφή της κινητικής ενέργειας των περιστρεφόμενων μαζών των συμβατικών μονάδων, αποτελώντας την πρώτη γραμμή άμυνας απέναντι σε κάθε διαταραχή.

3.3 Πρόκληση των Συστημάτων Βασισμένων σε Αντιστροφείς

Μια κρίσιμη παράμετρος της μελέτης είναι η έλλειψη της εγγενούς αδράνειας των σταθμών ΑΠΕ, λόγω της διασύνδεσης τους μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Καθώς η διείσδυση των ΑΠΕ αυξάνεται, οι παραδοσιακές στρεφόμενες γεννήτριες, που αποτελούν τη φυσική πηγή κινητικής ενέργειας του συστήματος, αποσύρονται με

αποτέλεσμα τη μείωση της αδράνειας. Η εξέλιξη αυτή οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς μεταβολής της συχνότητας (ROCOF) και βαθύτερες πτώσεις συχνότητας, αυξάνοντας σημαντικά τον κίνδυνο ενεργοποίησης των προστατευτικών διατάξεων και της ακούσιας απόρριψης φορτίου.

3.4 Μοντελοποίηση των FCEVs

Στο πλαίσιο αυτό, επιτακτική καθίσταται η παρέμβαση των FCEVs. Αντιθέτως με τις συμβατικές ΑΠΕ, που παρουσιάζουν στοχαστική παραγωγή και έλλειψη φυσικής αδράνειας λόγω της σύνδεσής τους μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, τα FCEVs προσφέρουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν ενεργά στον μοντέλο ελέγχου ενισχύοντας τη δυναμική ευστάθεια. Έχουν λάβει τη λειτουργία ταχέων εφεδρειών ισχύος μέσω των μηχανισμών εικονικής αδράνειας και στατικής κλίσης (droop), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3. Για να πραγματοποιηθεί μια ρεαλιστική αξιολόγηση, κατά τη μοντελοποίηση των κυψελών καυσίμου λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι του χρόνου καθυστέρησης (Dead time) και του χρόνου ανόδου (Rise time). Πιο αναλυτικά ο χρόνος καθυστέρησης μοντελοποιείται στο πεδίο Laplace με τον εκθετικό όρο e^{-sT_d}, που το T_d εκφράζει το κρίσιμο διάστημα από την ανίχνευση της διαταραχής έως την έναρξη της ηλεκτροχημικής απόκρισης, ενσωματώνοντας την υστέρηση στη ροή των αντιδρώντων αερίων μέσω των βαλβίδων. Επιπλέον μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς πρώτης τάξης $\frac{1}{1+s*T_{fc}}$ γίνεται η περιγραφή αυτής της δυναμικής, η οποία ενσωματώνει τις σταθερές χρόνου του συστήματος παροχής καυσίμου και της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Η ακριβής μαθηματική αναπαράσταση αυτών των υστερήσεων είναι αναγκαία για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της προσομοίωσης, καθορίζεται η ικανότητα των FCEVs να παρέχουν υπηρεσίες σταθεροποίησης σε πραγματικό χρόνο κάτω από φυσικές προκλήσεις των υλικών συστημάτων.

4 Μελέτη Περίπτωσης

Η τεχνική ανάλυση και η δυναμική προσομοίωση του προτεινόμενου μοντέλου υλοποιήθηκαν στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB/Simulink (συγκεκριμένα η έκδοση 2020a). Αναγκαία κρίθηκε η επιλογή του συγκεκριμένου λογισμικού, καθώς δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης υψηλής πιστότητας στο πεδίο του χρόνου (time domain simulation), η οποία είναι απαραίτητη για τη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων μικρής διάρκειας. Η αρχιτεκτονική του συστήματος είναι βασισμένη στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 3, όπου απεικονίζονται οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μονάδων παραγωγής και των συστημάτων ελέγχου.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τεχνικές προδιαγραφές, συντελεστές χρόνου και οι σταθερές χρόνου που τροφοδοτούν το μοντέλο, διασφαλίζοντας την επαναληψιμότητα της μελέτης και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη δικτύου

Το δίκτυο της μελέτης αποτελεί μια ρεαλιστική αναπαράσταση ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Το ενεργειακό μείγμα του συστήματος αποτελείται από δύο πρωτεύουσες πηγές. Αφενός οι αιολικοί σταθμοί μοντελοποιούνται ως μεταβλητές πηγές ισχύος, με σκοπό να αποτυπωθεί η στοχαστικότητα των ανανεώσιμων πόρων. Αφετέρου, οι αεριοστρόβιλοι συνιστούν τον βασικό μηχανισμό ρύθμισης συχνότητας. Η επιλογή των αεριοστροβίλων βασίστηκε στον υψηλό ρυθμό απόκρισής τους, χαρακτηριστικό που τους καθιστά ιδανικούς για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των διακυμάνσεων που παρουσιάζονται στα απομονωμένα δίκτυα. Ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο, το δίκτυο θα έχει την υποστήριξη από δύο έως τρεις ενεργούς αεριοστρόβιλους. Το τεχνικό ελάχιστο (το κατώτερο όριο ισχύος στο οποίο μπορεί να υπάρχει συνεχή λειτουργία με ασφάλεια) η κάθε μονάδας έχει οριστεί 3 MW, γεγονός που εισάγει σημαντικούς περιορισμούς ευστάθειας του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, περιορίζοντας το περιθώριο ρύθμισης.

4.2 Παραμετροποίηση Αδράνειας και Φορτίου

Πίνακας 1: Παράμετροι δικτύου και προσομοίωσης

Block	Παράμετροι	Τιμές
Αεριοστρόβιλος	$A, c, b, X, Y, T_{CR}, T_F, T_{CD}$	Σχήμα 4 από [51]
	Τεχνικό ελάχιστο - μέγιστο	5-20 MW
	Έλεγχος droop	3.3 MW / Hz
	Δευτερεύον Έλεγχος	Ενεργοποίηση στα 30 sec
Ηλεκτρικό δίκτυο	Ονομαστική ισχύ	100 MW (νησί μεγέθους με Ρόδο, Ελλάδα)
	H_{eq}	$1.5\ \frac{MW*s}{MVA}$ [7,48,49], ($\Sigma\chi\acute{\eta}\mu\alpha$ 8 [49])
	D	0.05 [51]
	S_B	40MVA (2 αεριοστρόβιλους) 60 MVA (3 αεριοστρόβιλους)
FCEV	Καθυστέρηση εκκίνησης	100 msec
	Χρόνος ανόδου	2 sec [47,50,52,53]
	P_{max}	200 kW (ανά όχημα) [50,54]
	K_{droop}	200 kW / 1.5 Hz
	K_{vi}	0.0001
	Απόδοση	50 % [50,54]
Φορτίο	ΔP_L	0
ΑΠΕ	ΔP_{wind}	Σενάριο 1: $\frac{\Delta P_{wind}}{\Delta t} = \frac{-27}{2}\left(\frac{MW}{s}\right)$ Σενάριο 2: $\frac{\Delta P_{wind}}{\Delta t} = \frac{-27}{2}\left(\frac{MW}{s}\right)$ Σενάριο 3: $\Delta P_{wind} = -20\ MW$

Το μοντέλο δέχεται ως μεταβλητές εισόδου φορτίο και την αιολική παραγωγή σε πραγματικό χρόνο, τα οποία προσαρμόζονται ανά σενάριο. Οι παράμετροι ορίστηκαν με σκοπό να γίνει η αποτύπωση της αδρανειακής απόκρισης του συστήματος με ακρίβεια, λειτουργώντας ανασταλτικά στις μεταβολές της συχνότητας. Συγκεκριμένα η ισοδύναμη σταθερά αδράνειας (H_{eq}) ορίστηκε στα 5 δευτερόλεπτα,

τιμή αντιπροσωπευτική για συστήματα αεριοστρόβιλων σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Παράλληλα, ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών μονάδων (δύο ή τριών), η συνολική εγκαταστημένη ισχύς (S_{base}) διαμορφώνεται στα 20 MVA ή 30 MVA, καθορίζοντας άμεσα την δυναμική απόκριση και τα επίπεδα ευστάθειας του συστήματος.

Η καινοτομία της παρούσας μελέτης εστιάζει στην ενσωμάτωση των FCEVs για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Κάθε όχημα χαρακτηρίζεται από πραγματικά τεχνικά χαρακτηριστικά, διαθέτοντας τη δυνατότητα παροχής ακαριαίας ισχύος έως 200 kW. Μέσω αυτής της λεπτομερούς μοντελοποίησης η εργασία έχει την δυνατότητα να εκτιμήσει με ακρίβεια το συνολικό απόθεμα εφεδρικής ισχύος ενός στόλου οχημάτων, έχοντας τη λειτουργία ενός κρίσιμου μηχανισμού αποτροπής κατάρρευσης του νησιωτικού δικτύου σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως σε περιπτώσεις σοβαρής απώλειας παραγωγής που υπερβαίνει την εφεδρεία των θερμικών μονάδων της μελέτης.

4.3 Διαχωρισμός σεναρίων

Για την αποτελεσματική αξιολόγηση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου των FCEVs, έγινε σχεδιασμός τεσσάρων διακριτών σεναρίων διαταραχής, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών προκλήσεων του νησιωτικού δικτύου.

4.3.1 Πρώτο σενάριο (Ξαφνική πτώση αιολικής ισχύος κατά 30 MW, τρεις αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία)

Στο πρώτο σενάριο το δίκτυο της μελέτης λειτουργεί με τρεις ενεργούς αεριοστρόβιλους, διασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή αδράνεια που επιτρέπουν οι προδιαγραφές του συστήματος. Η διαταραχή της προσομοίωσης αφορά μια ταχεία αλλά προοδευτική μείωση της παραγωγής των αιολικών κατά 27 MW, που εξελίσσεται εντός ενός χρονικού διαστήματος 2 δευτερολέπτων. Το φαινόμενο αυτό αποδίδει ρεαλιστικά μια ξαφνική διακύμανση των μετεωρολογικών συνθηκών, με κλιμακωτή μείωση της ταχύτητας του ανέμου από τα 13 m/s στα 9 m/s. Βασικός στόχος είναι η αξιολόγηση της ικανότητας των FCEVs να περιορίσουν τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (ROCOF) και να διασφαλιστεί η αρμονική συνεργασία με τις μονάδες βάσης για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος.

4.3.2 Δεύτερο σενάριο (Ξαφνική πτώση της αιολικής ισχύος κατά 30 MW, δύο αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία)

Το δεύτερο σενάριο διατηρεί το μέγεθος της διαταραχής 27 MW, με τη λειτουργία του συστήματος να περιορίζεται μόνο σε δύο αεριοστρόβιλους με συνολική ισχύ 20 MVA. Το δίκτυο τίθεται σε μια εξαιρετική ευάλωτη κατάσταση λειτουργίας, όπου λόγω της περιορισμένης ικανότητας απόσβεσης των διαταραχών, αναμένεται υψηλότερος ROCOF και βαθύτερες πτώσεις συχνότητας. Στόχος της προσομοίωσης αυτής είναι η ανάδειξη της στρατηγικής σημασίας του στόλου των FCEVs, ο οποίος καλείται να αναλάβει την λειτουργία του βασικού παράγοντα σταθεροποίησης, στις περιπτώσεις αδυναμίας των συμβατικών μονάδων να καλύψουν το έλλειμα ισχύος αποτρέποντας τη κατάρρευση του συστήματος.

4.3.3 Τρίτο σενάριο (Απότομη αύξηση ζήτησης με σταθερή αιολική παραγωγή)

Κατά το τρίτο σενάριο, η διαμόρφωση του δικτύου αποτελείται από τρεις αεριοστρόβιλους, αντιμετωπίζοντας όμως μια βίαιη διαταραχή. Η απώλεια ισχύος μοντελοποιείται ως μια βηματική συνάρτηση, αναπαριστώντας την ξαφνική αποσύνδεση ενός αιολικού πάρκου ισχύος 20 MW λόγω τεχνικού σφάλματος. Λόγω της ακαριαίας φύσης της διαταραχής ασκείται μέγιστη πίεση στο σύστημα, παρόλο που το απόλυτο μέγεθος της είναι μικρότερο από τα προηγούμενα σενάρια. Κύριος στόχος είναι η ανάλυση της ταχύτητας απόκρισης των FCEVs σε κλάσματα δευτερολέπτου, προκειμένου να δοθεί η απαραίτητη εικονική αδράνεια για να συγκρατηθεί η συχνότητα εντός των αυστηρών ορίων ασφαλείας.

4.3.4 Τέταρτο σενάριο (Αύξηση ζήτησης σε συνδυασμό ταυτοχρόνως με ξαφνική Απώλεια της Μεγαλύτερης Μονάδας Παραγωγής)

Στο τέταρτο σενάριο γίνεται η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του συστήματος σε καταστάσεις μεγάλης καταπόνησης, επιστρατεύοντας ένα στόλο 250 οχημάτων κυψελών καυσίμου για την υποστήριξη του δικτύου. Η δομή του συστήματος περιλαμβάνει δύο αεριοστρόβιλους και ένα αιολικό πάρκο, ενώ η διαταραχή που εξετάζεται συνδυάζει την αιφνίδια αύξηση του φορτίου, ταυτοχρόνως με απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας παραγωγής με ισχύ 20 MW.

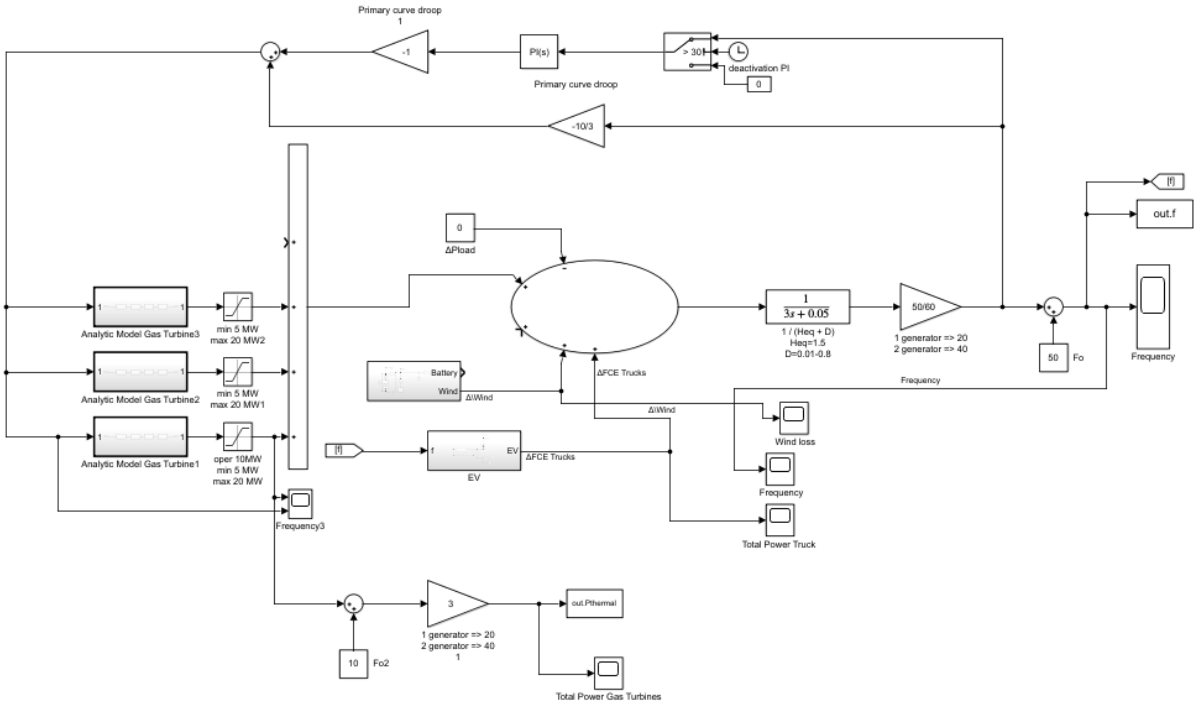
Παρά την έντονη πίεση που δέχονται οι πόροι, το σύστημα αποτρέπει την ολική κατάρρευση, επιτυγχάνοντας τη σταδιακή αποκατάσταση της συχνότητας. Ο αργός ρυθμός επαναφοράς της συχνότητας εκφράζει τη λειτουργία των διαθέσιμων μονάδων στα όρια της ονομαστική τους λειτουργίας, περιορίζοντας τη δυνατότητα παροχής πρόσθετων εφεδρειών. Σε αντίθεση με το δεύτερο σενάριο, τα οχήματα παρουσιάζουν διαλείπουσα λειτουργία λόγω στα περιορισμένα αποθέματα υδρογόνου. Τα FCEVs συνεισφέρουν ισχύ μέχρι την πλήρη εξάντληση των αποθεμάτων τους, αναδεικνύοντας τις προκλήσεις που θέτει η περιορισμένη διαθεσιμότητα καυσίμου σε περιόδους συνεχόμενων κρίσεων.

Συμπερασματικά, το σενάριο αυτά εμφανίζει την κρίσιμη σημασία του ενεργειακού σχεδιασμού και συντονισμού μεταξύ των συμβατικών μονάδων και FCEVs για την διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου.

5 Παρουσίαση μοντέλων προσομοίωσης

5.1 Περιγραφή Μοντέλου προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται το μοντέλο στο περιβάλλον Simulink, το οποίο αποτελεί τη βάση για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του αυτόνομου συστήματος ισχύος. Η δομή ελέγχου Load Frequency Control (LFC) ενσωματώνεται στο μοντέλο με σκοπό τη διατήρηση της ισορροπίας ενεργού ισχύος για τη σταθεροποίηση της συχνότητας στο ονομαστικό επίπεδο των 50 Hz.



Σχήμα 4: Βασικό μοντέλο προσομοίωσης

Ο κεντρικός πυλώνας της μοντελοποίησης βασίζεται στη συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει τη δυναμική απόκριση του συνόλου των περιστρεφόμενων μαζών και του φορτίου του δικτύου. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η συνάρτηση διαμορφώνεται:

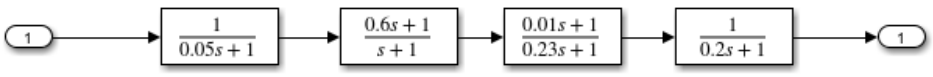
$$G_{sys} = \frac{1}{M_{eq}s + D} = \frac{1}{3s + 0{,}05}$$

Όπου ο συντελεστής $M = 3$ αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη αδράνεια του συστήματος, ενώ ο συντελεστής $D = 0{,}05$ ορίζει τη σταθερά απόσβεσης του φορτίου, εκφράζοντας την ευαισθησία της ζήτησης ως προς τη συχνότητα.

5.1.1 Μονάδες παραγωγής και Έλεγχος

Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται από δύο ή τρεις θερμικές μονάδες (ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο) . Πρόκειται για ένα υποσύστημα όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5, που ενσωματώνει τη δυναμική του ρυθμιστή ταχύτητας και του στροβίλου. Οι μονάδες λαμβάνουν σήμα από τον βρόχο πρωτεύουσας ρύθμισης, αποτελώντας τον κύριο μηχανισμό απόκρισης του συστήματος στις μεταβολές του φορτίου.

Η αποτελεσματικότητα του παραπάνω υποσυστήματος είναι ύψιστης σημασίας για τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος. Η μοντελοποίηση του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου και της μηχανικής ισχύος του αεριοστροβίλου, επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της προσέγγισης αυτής δίνεται η δυνατότητα άμεσης αντίδρασης στις διακυμάνσεις της συχνότητας, διασφαλίζοντας το ισοζύγιο ανάμεσα στη παραγωγή και στη ζήτηση. Προκειμένου να αναλυθεί η δυναμική συμπεριφορά του αεριοστροβίλου, χρησιμοποιείται το μοντέλο που εμφανίζεται στην σχήμα 5. Το διάγραμμα βαθμίδων παρουσιάζει την ροή του σήματος μέσω των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις χρονικές καθυστερήσεις και τα φαινόμενα αδράνειας του συστήματος καύσης και του στροβίλου.

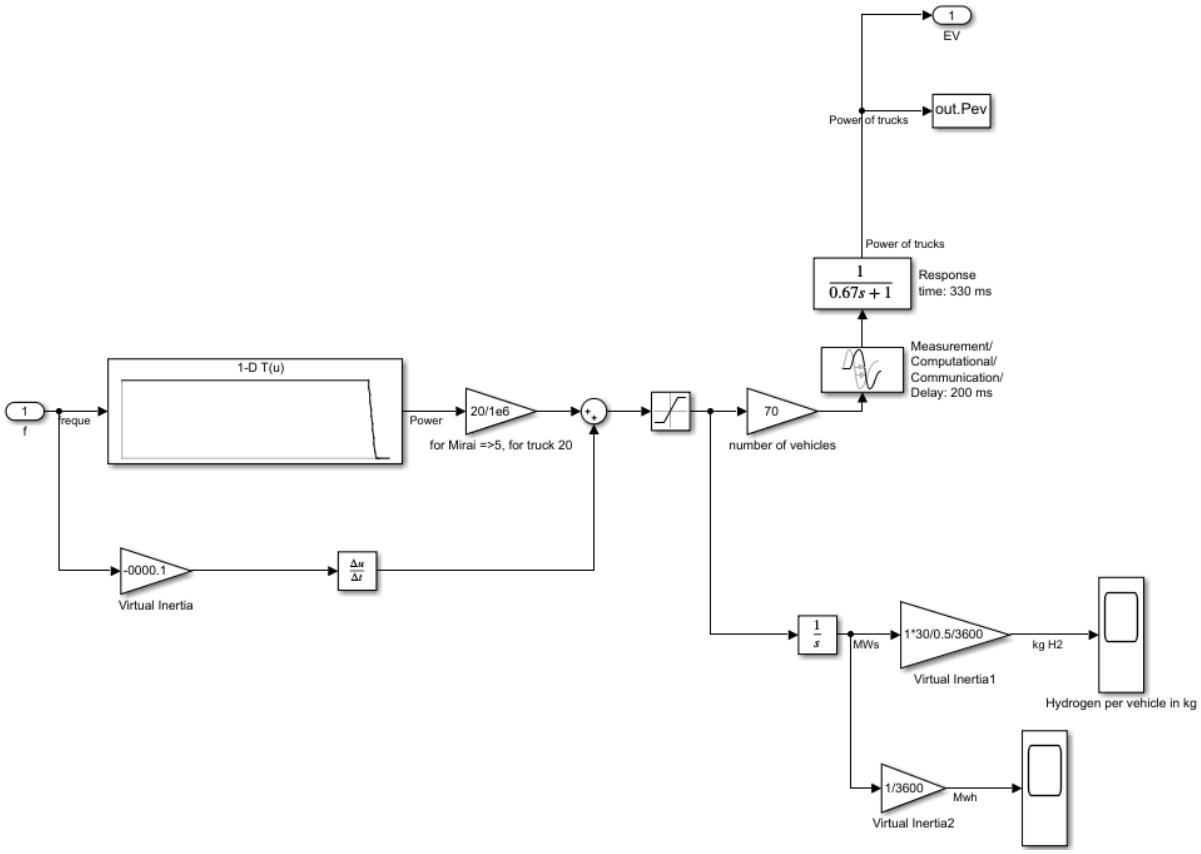


Σχήμα (5): Μοντέλο αεριοστροβίλων

Το διάγραμμα της σχήμα 5 αποτελείται από τέσσερις διαδοχικές συναρτήσεις μεταφοράς , καθεμία να αναλαμβάνει την μοντελοποίηση ενός συγκεκριμένου φυσικού τμήματος της μονάδας. Η συνάρτηση μεταφορά $(\frac{1}{0.05s+1})$, αναπαρίσταται η δυναμική του συστήματος ελέγχου της βαλβίδας καυσίμου. Η χρονική σταθερά 0,05s αντικατοπτρίζοντας την ταχεία απόκριση του μηχανισμού στις εντολές του ρυθμιστή

ταχύτητας. Η συνάρτηση μεταφοράς ($\frac{0,6s+1}{s+1}$), μοντελοποιεί τις διεργασίες μεταφοράς ενέργειας και μάζας. Η συγκεκριμένη βαθμίδα ενσωματώνει την χρονική υστέρηση που χρειάζεται για να αναπτυχθεί η απαραίτητη πίεση καύσης, η οποία ορίζεται από την χρονική σταθερά του παρανομαστή.

Στην συνέχεια μέσω της συνάρτησης μεταφοράς ($\frac{0,01s+1}{0,23s+1}$) περιγράφεται το σύστημα περιορισμών και ασφάλειας, εισάγοντας προσθετικά δυναμικά χαρακτηριστικά που αφορούν τα όρια λειτουργίας και τη προστασία του αεριοστροβίλου κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων. Τέλος η τελευταία συνάρτηση μεταφοράς ($\frac{1}{0,2s+1}$), μοντελοποιεί την αδράνεια του αεριοστροβίλου και τη διαδικασία παραγωγής της μηχανικής ροπής. Η σταθερά χρόνου 0,2s καθορίζει την ταχύτητα μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ στον άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 6: Μοντέλο στόλου οχημάτων κυψελών

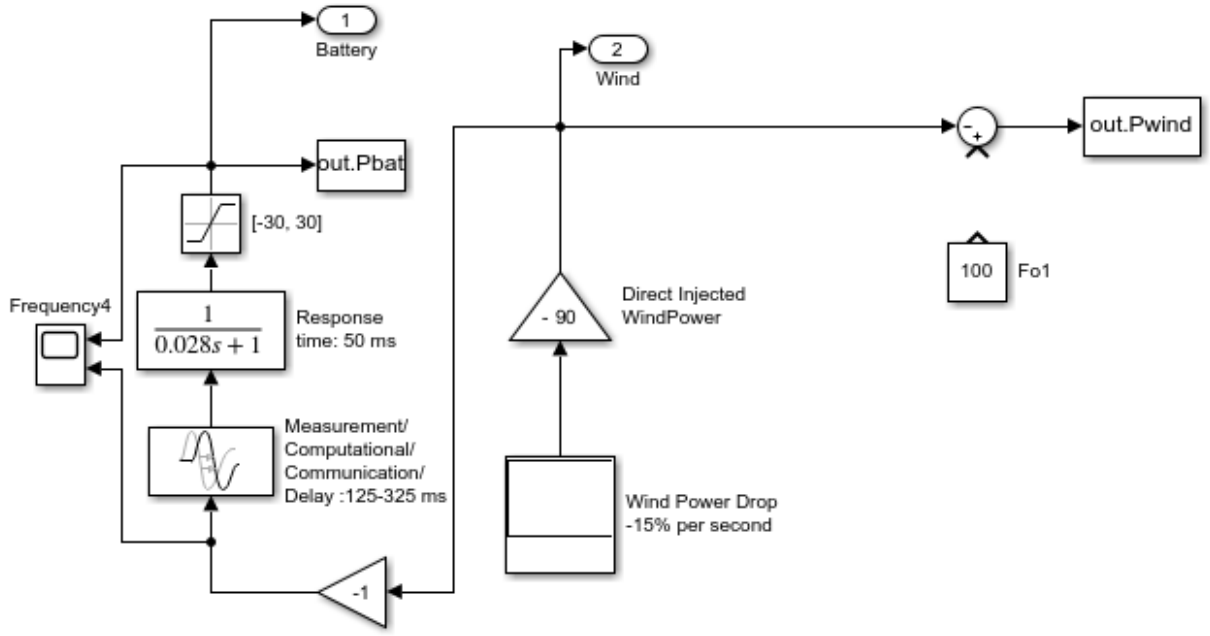
Σε συνδυασμό με τη συμβατική παραγωγή, η δυναμική απόκριση του συστήματος ενισχύεται από την συμμετοχή του στόλου οχημάτων κυψελών καυσίμου. Όπως φαίνεται στην σχήμα 6, τα οχήματα δρουν ως διασπαρμένοι ενεργειακοί πόροι, οι οποίοι αλληλεπιδρούν άμεσα στις μεταβολές της συχνότητας.

Συγκεκριμένα για σκοπούς ανίχνευσης και απόκρισης, γίνεται χρήση ενός πίνακα αναζήτησης (1D Lookup Table), ο οποίος αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα της πρωτεύουσας ρύθμισης των οχημάτων, μετατρέποντας την απόκλιση της συχνότητας σε εντολές ισχύος. Η καμπύλη περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές περιοχές λειτουργίας. Στο κέντρο της καμπύλης η έξοδος ισχύος διατηρείται μηδενική, με σκοπό την αποφυγή της περιττής καταπόνησης των συστημάτων των οχημάτων από μικρές διακυμάνσεις. Εκτός της νεκρής ζώνης, στην γραμμική περιοχή η ισχύς μεταβάλλεται αναλόγως με την απόκλιση της συχνότητας. Τέλος, στη περιοχή κορεσμού, η ισχύς περιορίζεται από τα τεχνικά όρια των μετατροπέων (inverters) των οχημάτων.

Ο συνδυασμός του κέρδους -0000.1 και του μπλοκ παραγωγίσεως ($\frac{du}{dt}$) αποτελεί την ψηφιακή προσομοίωση της εικονικής αδράνειας. Ενώ η καμπύλη απόκρισης (Droop) αντιδρά στην τιμή απόκλισης της συχνότητας, ο κλάδος παραγώγου αντιδρά στον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (ROCOF). Σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο, τα οχήματα κυψελών καυσίμου παρέχουν εικονικά την ενέργεια τους στο σύστημα, προσομοιώνοντας τη δυναμική συμπεριφορά των μεγάλων περιστρεφόμενων μαζών των συμβατικών γεννητριών.

Στην συνέχεια του μοντέλου ελέγχου, το σήμα ισχύος που απαιτείται διέρχεται από δύο κρίσιμες βαθμίδες χρονικής καθυστέρησης. Η πρώτη μοντελοποίει τις υστερήσεις που οφείλονται στη μέτρησης της συχνότητας, καθώς και στη καθυστέρηση μεταφοράς της πληροφορίας στο κέντρο ελέγχου. Στην συνέχεια η δεύτερη μέσω της συνάρτησης μεταφοράς $\frac{1}{0,67s+1}$, περιγράφει τη δυναμική απόκριση του συστήματος ισχύος των κυψελών καυσίμου. Η παραγόμενη ισχύς ανά όχημα πολλαπλασιάζεται με τον συνολικό αριθμό του στόλου, διαμορφώνοντας την συνολική ισχύ που επιστρέφει στο κεντρικό σύστημα.

Τέλος στο μοντέλο υλοποιήθηκε ένας κλάδος ενεργειακών υπολογισμών, για να υπολογιστεί η κατανάλωση του στόλου. Μέσω ενός ολοκληρωτή ($\frac{1}{s}$), η ισχύς μετατρέπεται σε ενέργεια, η οποία στη συνέχεια διαχωρίζεται σε δύο μεγέθη. Συγκεκριμένα η κατανάλωση του υδρογόνου υπολογίζεται σε κιλά μέσω του συντελεστή μετατροπής στο μπλοκ «Virtual Inertia», λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό απόδοσης των κυψελών καυσίμου. Ενώ το δεύτερο μέγεθος προκύπτει μέσω του συντελεστή στο μπλοκ «Virtual Inertia2», επιτρέποντας την παρακολούθηση της συνολικής ενεργειακής επιβάρυνσης του συστήματος αναλόγως με το σενάριο προσομοίωσης.



Σχήμα 7: Μοντέλο προσομοίωσης αιολικής παραγωγής

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται το υποσύστημα που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της αιολικής παραγωγής στο αυτόνομο σύστημα ισχύος. Σκοπός του μοντέλου είναι η εισαγωγή στο κεντρικό σύστημα μιας μεταβαλλόμενης αιολικής ισχύος, για τη μελέτη των αιφνίδιων μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου στη διατήρηση της συχνότητας. Η δομή του υποσυστήματος που χρησιμοποιείται στη τελική προσομοίωση, εστιάζει στην μοντελοποίηση της παροχής και της απώλειας ισχύος. Η βαθμίδα «Direct Injected Wind Power», με κέρδος -90, χρησιμοποιείται για να καθορίσει την αρχική, ονομαστική στάθμη ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο. Από την ύπαρξη του αρνητικού υποδηλώνει ότι η ισχύ μειώνεται κάτι που επιβαρύνει την συνολική ισχύ.

Στην συνέχεια το μοντέλο περιλαμβάνει μια βηματική είσοδο, που προσομοιώνει μια απότομη μεταβολή στην αιολική παραγωγή, όπως μια ξαφνική πτώση της ταχύτητας του ανέμου. Η διαταραχή αυτή έχει ρυθμό μεταβολής που ορίστηκε με -15% ανά δευτερόλεπτο, δημιουργώντας μια ρεαλιστική διακύμανση. Η συνολική αιολική ισχύς αποδίδεται στο κεντρικό μοντέλο μέσω άθροισης της αρχικής ισχύος και της δυναμικής μεταβολής. Το τελικό σήμα εισάγεται στον κεντρικό κόμβο

άθροισης ισχύος του συστήματος, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα της σχήμα 5. Με την εισαγωγή μιας αιφνίδιας διαταραχής στην αιολική παραγωγή, το σύστημα καλείται να διατηρήσει το ισοζύγιο ενεργού ισχύος σε πραγματικό χρόνο. Ο συνδυασμός της σταθερότητας των συμβατικών αεριοστροβίλων με την υψηλή ταχύτητα απόκρισης των FCEVs αποτελεί τη βάση για τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος. Στη συνέχεια, η μελέτη εστιάζει στην παραμετροποίηση τεσσάρων μοντέλων προσομοίωσης, καθένα από τα οποία εξετάζει διαφορετικές συνθήκες παραγωγής και ζήτησης.

Σενάριο 1	Ξαφνική πτώση αιολικής ισχύος κατά 30 MW, τρεις αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία
Σενάριο 2	Ξαφνική πτώση της αιολικής ισχύος κατά 30 MW, δύο αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία
Σενάριο 3	Απότομη αύξηση ζήτησης με σταθερή αιολική παραγωγή
Σενάριο 4	Αύξηση ζήτησης σε συνδυασμό ταυτοχρόνως με ξαφνική Απώλεια της Μεγαλύτερης Μονάδας Παραγωγής

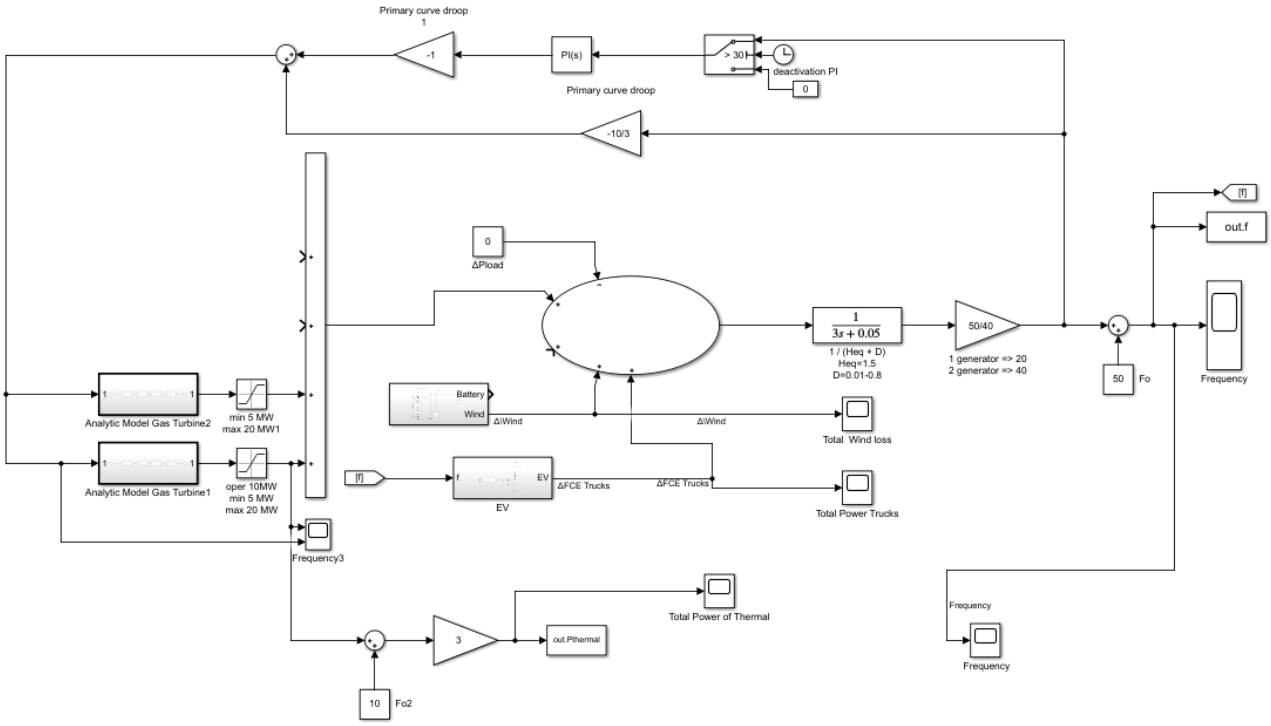
5.1.2 Μοντέλο σεναρίου 1 (Ξαφνική πτώση αιολικής ισχύος κατά 30 MW, τρεις αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία)

Η αρχιτεκτονική του πρώτου σεναρίου βασίζεται στη λειτουργία τριών θερμικών μονάδων αεριοστροβίλου, οι οποίες συνδέονται στον κεντρικό αθροιστή ισχύος Σχήμα 4. Οι μονάδες παραμετροποιούνται με τις ονομαστικές τους χρονικές σταθερές, προσφέροντας τη μέγιστη περιστροφική αδράνεια στο σύστημα.

Παράλληλα, πραγματοποιείται η ενσωμάτωση του στόλου των οχημάτων, ρυθμίζοντας την τιμή του κέρδους για 70 μονάδες όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Η σύνδεση του υποσυστήματος γίνεται μέσω του μπλοκ “ΔFCE Truck” απευθείας στον κόμβο άθροισης, ενεργοποιώντας τον κλάδο της εικονικής αδράνειας και της καμπύλης Droop. Τέλος για τη μοντελοποίηση της διαταραχής, το μπλοκ της αιολικής παραγωγής ρυθμίζεται για την προσομοίωση μιας απότομης πτώσης τάξεως 30 MW, λειτουργώντας ως η βασική πηγή αστάθειας.

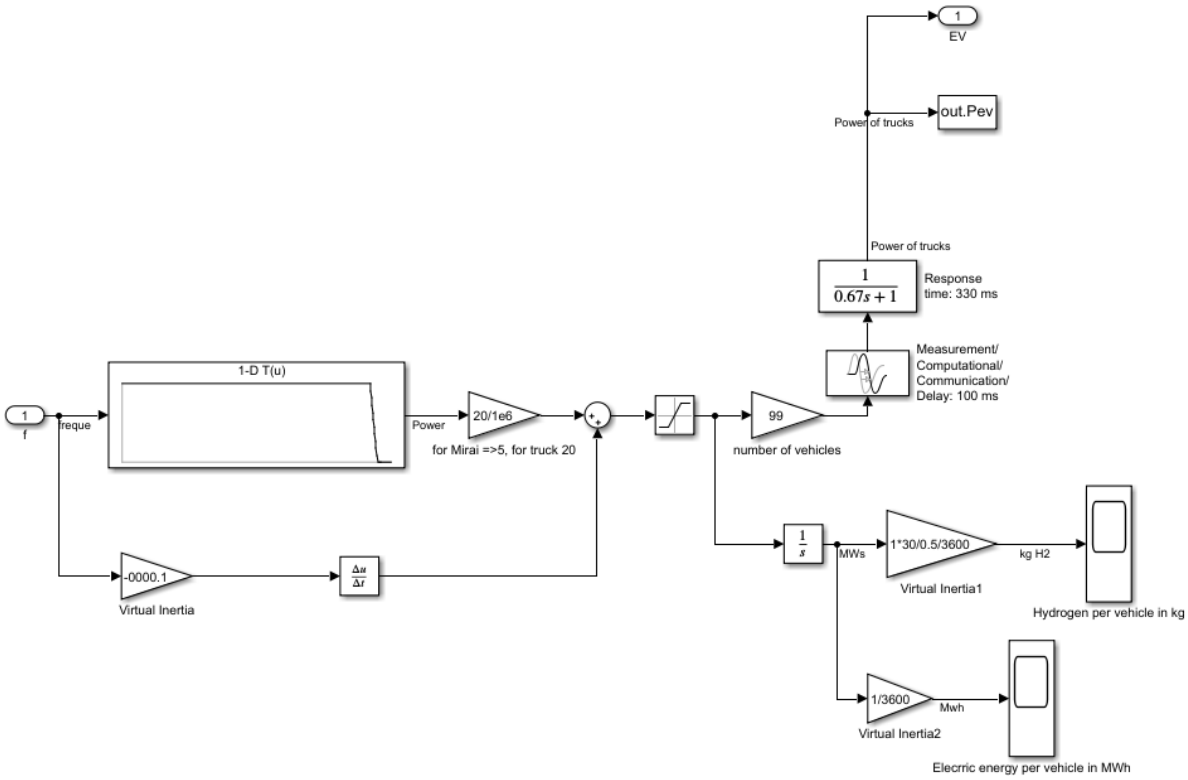
5.1.3 Μοντέλο σεναρίου 2 (Ξαφνική πτώση της αιολικής ισχύος κατά 30 MW, δύο αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία)

Το δεύτερο σενάριο τροποποιείται για να προσομοιωθεί μια κατάσταση μειωμένης διαθεσιμότητας ισχύος και αδράνειας. Στην περίπτωση αυτή, μία από τις τρεις θερμικές μονάδες αποσυνδέεται, αφήνοντας δύο ενεργούς αεριοστροβίλους. Η αλλαγή αυτή οδηγεί σε σημαντική μείωση της αδράνειας του συστήματος (M_{eq}), καθιστώντας το σύστημα πιο ευαίσθητο σε μεταβολές συχνότητας.



Σχήμα 8: Μοντέλο προσομοίωσης σεναρίου 2

Προκειμένου να αντισταθμιστεί η απώλεια της φυσικής αδράνειας, πραγματοποιούνται αλλαγές στις παραμέτρους του υποσυστήματος των οχημάτων κυψέλης καυσίμου.

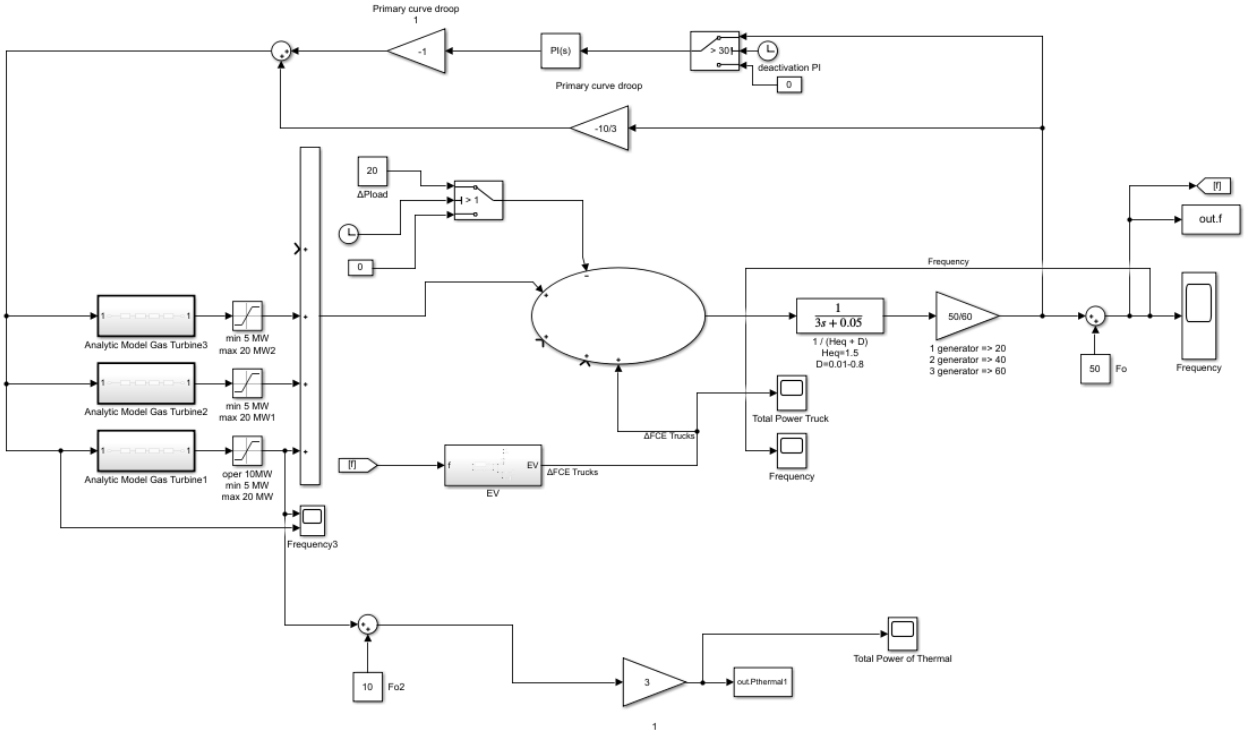


Σχήμα 9: Μοντέλο προσομοίωσης οχημάτων κυψελών σεναρίου 2

Συγκεκριμένα ο ελάχιστος στόλος που απαιτείται για την διασφάλιση της συχνότητας επαναπροσδιορίζεται για 99 οχήματα. Παρόλο που η υπόλοιπη δομή του ελέγχου παραμένει αμετάβλητη, η δυναμική απόκριση της βαθμίδας “Virtual Inertia” είναι πιο έντονη εξαιτίας της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ισχύος.

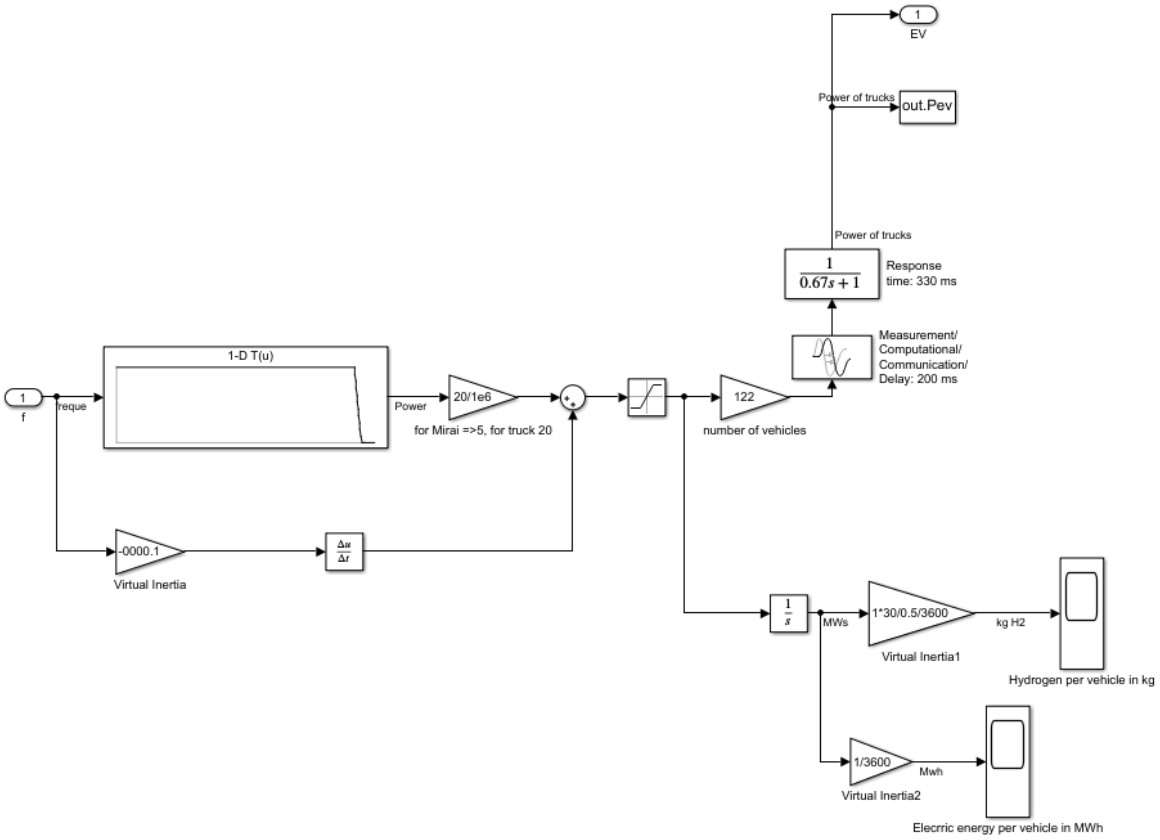
5.1.4 Μοντέλο σεναρίου 3 (Απότομη αύξηση ζήτησης με σταθερή αιολική παραγωγή)

Το μοντέλο του τρίτου σεναρίου επιστρέφει στην αρχική δομή των τριών γεννητριών, αλλά γίνεται εστίαση στη δυναμική του φορτίου.



Σχήμα 10: Μοντέλο προσομοίωσης σεναρίου 3

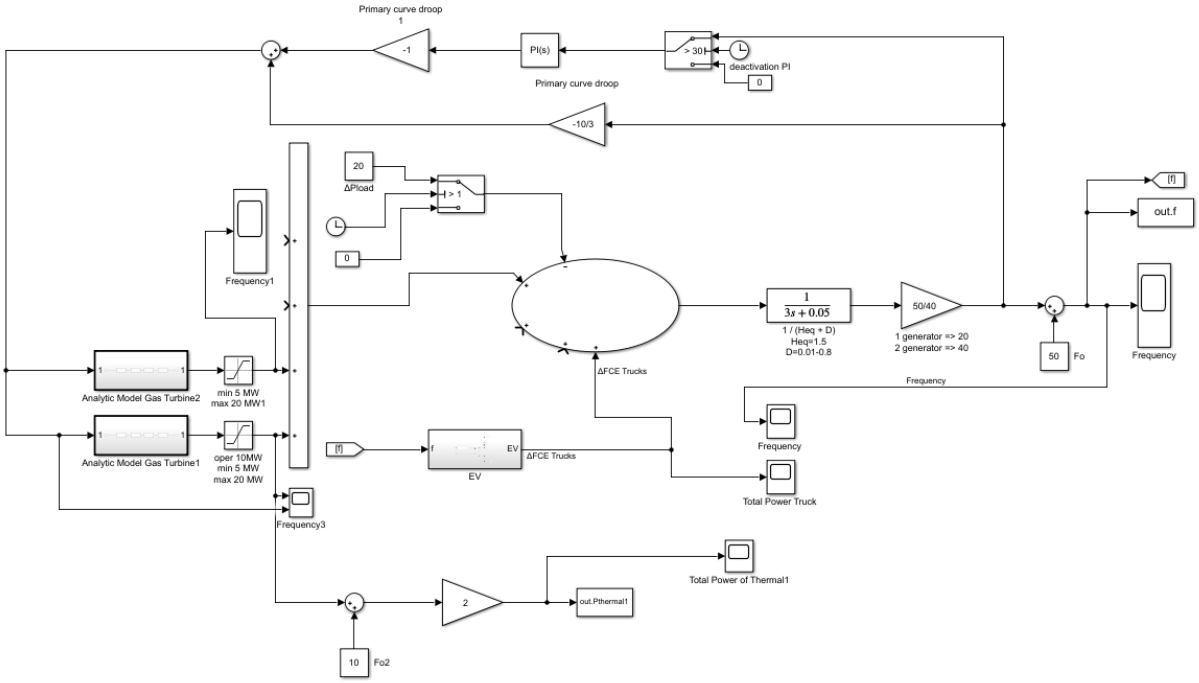
Το σύστημα ρυθμίζεται για τη μεγαλύτερη προβλεπόμενη διείσδυση, με τον αριθμό των οχημάτων να ανέρχεται στις 122 μονάδες. Αυτή η διαμόρφωση δίνει τη δυνατότητα μελέτης της επιθετικής απόκρισης του στόλου. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, η αιολική παραγωγή παραμένει σταθερό. Η διαταραχή εισάγεται μέσω της βαθμίδας Load Demand (ΔP_{load}), προσομοιώνοντας μια απότομη αύξηση της κατανάλωσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της ικανότητας του στόλου να στηρίξει τη συχνότητα του δικτύου όχι μόνο για περιπτώσεις απώλειας παραγωγής, αλλά και για απότομες μεταβολές ζήτησης.



Σχήμα 11: Μοντέλο προσομοίωσης οχημάτων κυψελών σεναρίου 3

5.1.5 Μοντέλο σεναρίου 4 (Αύξηση ζήτησης σε συνδυασμό ταυτοχρόνως με ξαφνική Απώλεια της Μεγαλύτερης Μονάδας Παραγωγής)

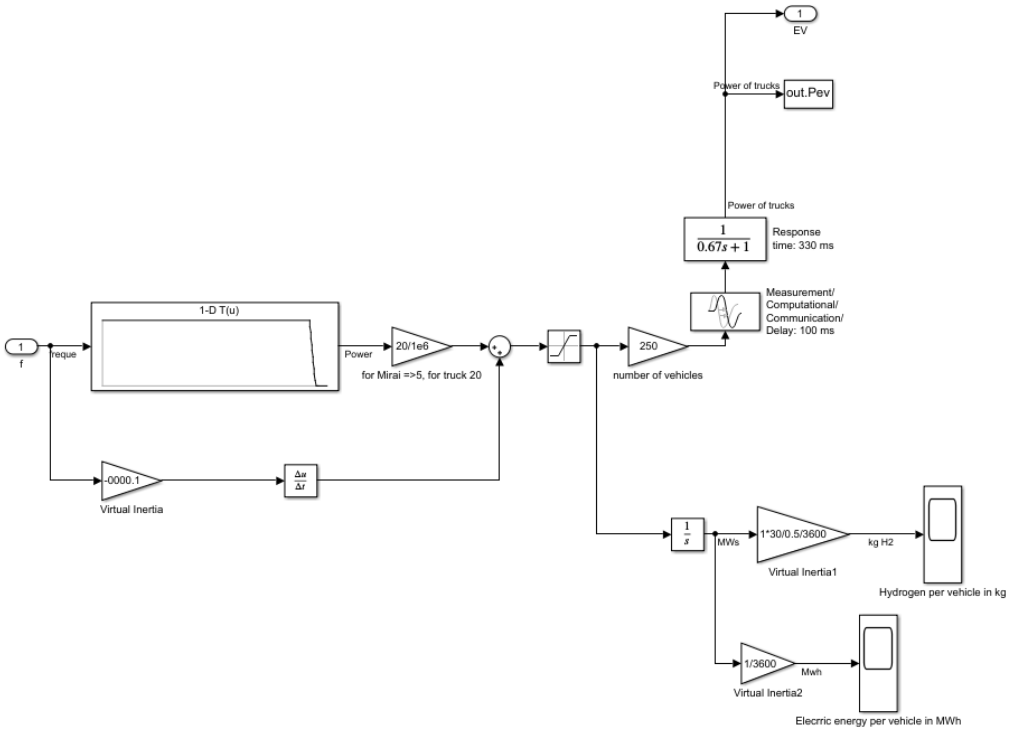
Το μοντέλο του τετάρτου σεναρίου αποτελεί την πιο απαιτητική διαμόρφωση της μελέτης, καθώς προσομοιώνεται μια συνθήκη ακραίας διαταραχής. Η δομή επιστρέφει στη λειτουργία δύο ενεργών γεννητριών, γεγονός που μειώνει σημαντικά την εγγενή αδράνεια και τα περιθώρια εφεδρείας του συστήματος.



Σχήμα 12: Μοντέλο προσομοίωσης σεναρίου 4

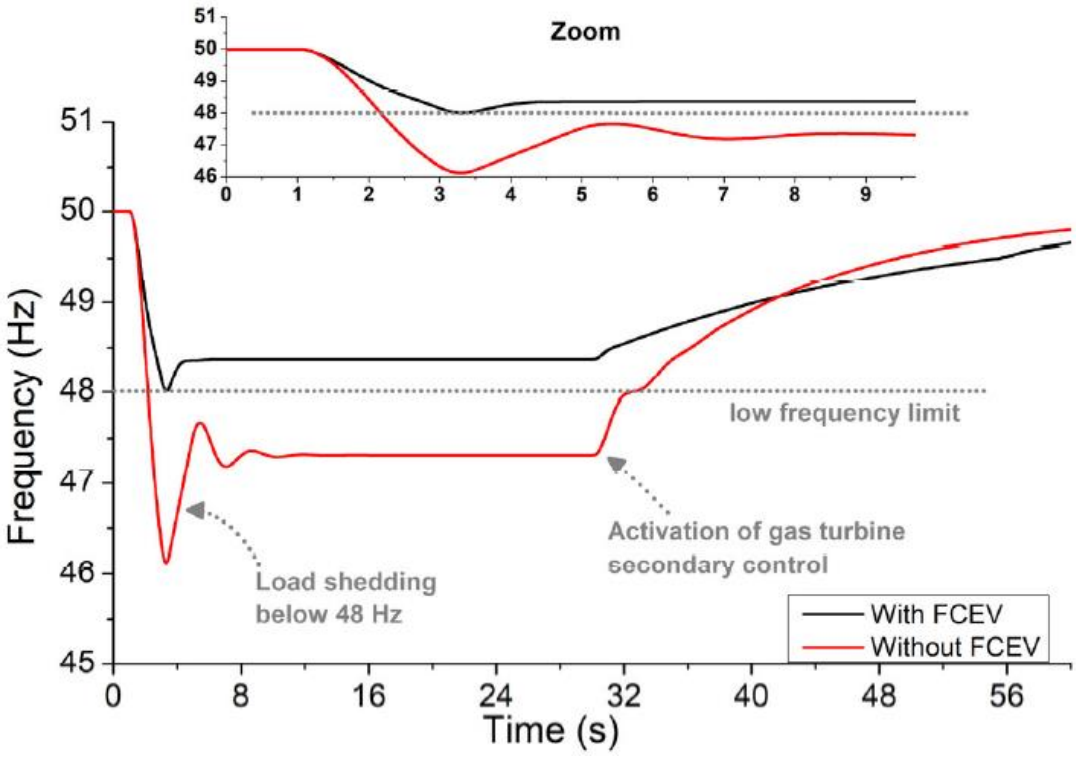
Το μοντέλο ρυθμίζεται για τη μέγιστη διείσδυση επικουρική υπηρεσιών, με τον αριθμό των οχημάτων να ανέρχεται σε 250 μονάδες. Ο στόλος καλείται να αντιμετωπίσει μια σύνθετη διαταραχή, την ταυτόχρονη αιφνίδια απώλεια μια εκ των θερμικών μονάδων (20 MW) και την παράλληλη αύξηση της ζήτησης.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω αυτού του σεναρίου αναδεικνύονται οι φυσικοί περιορισμοί των συμβατικών μονάδων. Χωρίς την υποστήριξη των FCEVs, η ισχύς που πρέπει να αναπληρωθεί εμφανίζει τέτοιο ρυθμό μεταβολής που δεν είναι μηχανικά εφικτή για τους αεριοστροβίλους, καταλήγοντας στη κατάρρευση του δικτύου. Μέσω του συγκεκριμένου μοντέλου καταδεικνύεται ότι η ταχεία παροχή ισχύος από τον στόλο των 250 FCEVs είναι κρίσιμος παράγοντας, καθώς εξομαλύνει την απόκριση των γεννητριών που απομένουν καθιστώντας τη σταθεροποίηση του δικτύου τεχνικά εφικτή για ακραίες συνθήκες.



Σχήμα 13: Μοντέλο προσομοίωσης οχημάτων κυψελών σεναρίου 4

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης πρώτου σεναρίου



Σχήμα 14: Απόκριση συχνότητας για το σενάριο 1

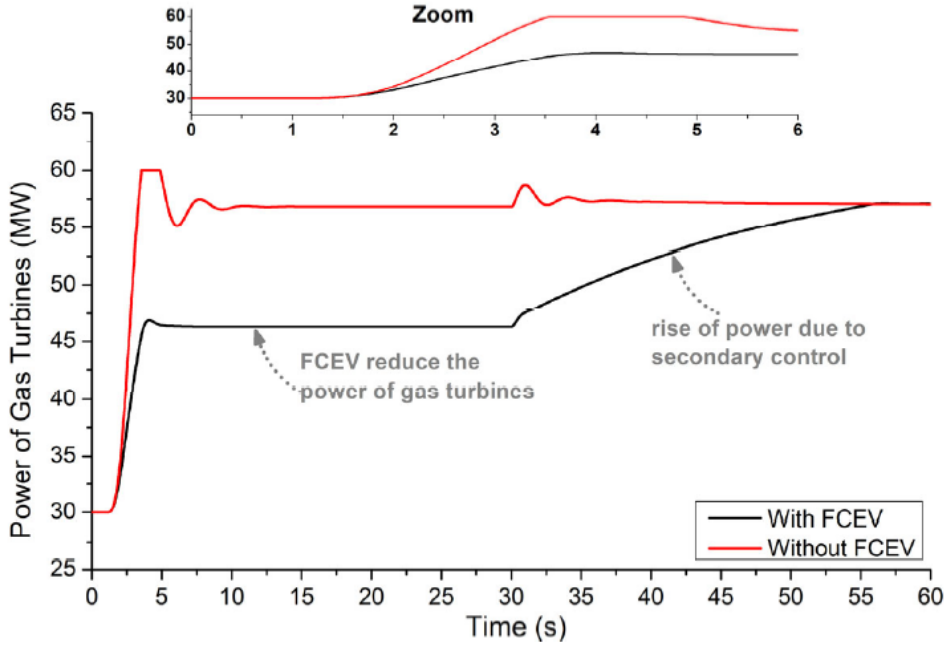
Η συμβολή των FCEVs στη διατήρηση της δυναμικής ευστάθειας του συστήματος επιβεβαιώνεται από την ανάλυση της μεταβατικής απόκρισης της συχνότητας, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 14. Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, προκειμένου να διατηρηθεί η συχνότητα εντός των ορίων λειτουργίας προϋποθέτει τη συμμετοχή 70 FCEVs. Ο αριθμός αυτός αποτελεί το κρίσιμο μέγεθος του στόλου που απαιτείται για την παροχή της αναγκαίας εφεδρείας ισχύος και εικονικής αδράνειας, διασφαλίζοντας την ευστάθεια του δικτύου ακόμα και κάτω από τις πιο δυσμενείς συνθήκες διαταραχής.

Η μελέτη συγκρίνει τη συμπεριφορά του δικτύου με και χωρίς την ενσωμάτωση του στόλου οχημάτων. Στην περίπτωση απουσίας των οχημάτων, το σύστημα εμφανίζει ανεξέλεγκτη διολίσθηση της συχνότητας, με την τιμή της να υποχωρεί κάτω από το κρίσιμο όριο των 48 Hz. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ως κατώφλι ασφαλείας, καθώς είναι αντιπροσωπευτική για τη λειτουργία μικρών αυτόνομων νησιωτικών δικτύων. Η παραβίαση αυτού του ορίου θέτει το δίκτυο σε άμεσο κίνδυνο, προκαλώντας μια γενικευμένη αστάθεια, οδηγώντας σε ολική κατάρρευση του συστήματος. Για την αποφυγή μιας τέτοιας εξέλιξης, ο Διαχειριστής του συστήματος αναγκάζεται να

ενεργοποιήσει αυτόματους μηχανισμούς απόρριψης φορτίου, προβαίνοντας σε αναγκαστικές διακοπές ηλεκτροδότησης μεγάλου μέρους των καταναλωτών για την προστασία της ακεραιότητας του δικτύου.

Αντιθέτως με την ενεργοποίηση του στόλου των FCEVs, η ισχύς που παρέχεται για εξισορρόπηση χαρακτηρίζεται ως ταχύτατη, επιτυγχάνοντας τη συγκράτηση της συχνότητας στην περιοχή των 48 Hz. Το αποτέλεσμα αυτό επαληθεύει την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος στην πρωτογενή ρύθμιση. Η πλήρης αποκατάσταση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή των 50 Hz, πραγματοποιείται μέσω του δευτερογενούς ελέγχου των θερμικών μονάδων, ο οποίος ενεργοποιείται έπειτα από διάστημα περίπου 30 δευτερολέπτων. Σε αυτό το στάδιο, τα FCEVs δεν αποσυνδέονται αφνίδια, αλλά η μείωση της ισχύος εξόδου γίνεται σταδιακά, για να διασφαλιστεί η ομαλή μεταβίβαση του συστήματος σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Η συνολική απόκριση του συστήματος, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 15, παρέχει δεδομένα για τη λειτουργική συμπεριφορά των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτουν ουσιώδη συμπεράσματα για τη δυναμική του συστήματος. Στην περίπτωση απουσίας της συνδρομής των οχημάτων, ο πρωτογενής έλεγχος των αεριοστρόβιλων καλείται να αντισταθμίσει πλήρως την διαταραχή ισχύος. Αυτό τους οδηγεί να λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους



Σχήμα 15: Συνολική ισχύ αεριοστροβίλων για το σενάριο 1

ικανότητα (60 MW). Η λειτουργία των θερμικών μηχανών σε σημεία που πλαισιώνουν τα οριακά τους χαρακτηριστικά οδηγεί σε μηχανική και θερμική καταπόνηση, με μακροπρόθεσμη επιβάρυνση της αξιοπιστίας τους. Επιπλέον, η πλήρης εξάντληση των εφεδρειών από τις μονάδες βάσης εκμηδενίζει τα περιθώρια ασφαλείας του συστήματος, καθιστώντας το ευάλωτο σε διαδοχικά σφάλματα.

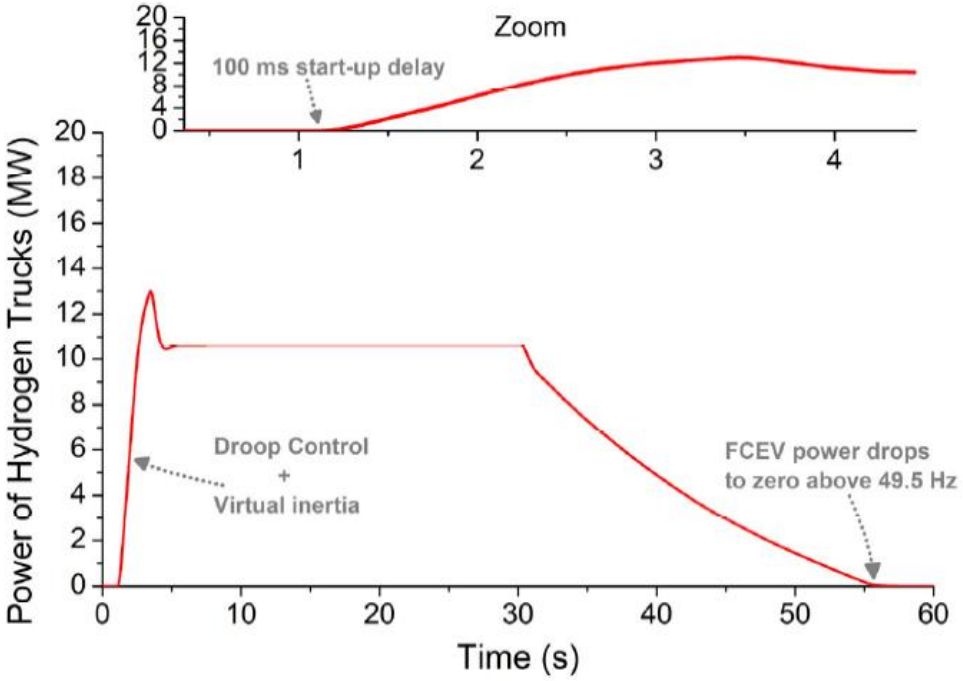
Με την υποστήριξη των FCEVs, ο στόλος των οχημάτων αναλαμβάνει την άμεση απόκριση κατά το αρχικό στάδιο της διαταραχής. Η παρέμβαση αυτή επιτρέπει στους αεριοστρόβιλους να αυξήσουν την ισχύ εξόδου τους με πιο ομαλό ρυθμό μεταβολής, προστατεύοντας τον μηχανολογικό εξοπλισμό και διατηρώντας τις σημαντικές εφεδρείες για την ασφάλεια του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση, η συνεισφορά των οχημάτων οδηγεί στην αποφόρτιση των αεριοστροβίλων, λόγω της ταχύτατης παροχής ισχύος από τις κυψέλες καυσίμου. Οι θερμικές μονάδες δεν εξαναγκάζονται σε απότομες μεταβολές σε σημεία λειτουργίας που πλησιάζουν τα οριακά τους χαρακτηριστικά, αλλά λειτουργούν σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς απόκρισης.

Η υιοθέτηση αυτής της τεχνικής προσφέρει πολλαπλά οφέλη στο δίκτυο, με σημαντικότερο τη διατήρηση των λειτουργικών εφεδρειών. Το γεγονός ότι οι αεριοστρόβιλοι δεν δεσμεύουν μέρος της διαθέσιμης ισχύος τους για τη συγκράτηση της συχνότητας, επιτρέπει τη διατήρηση ενός σημαντικού αποθέματος ισχύος για την αντιμετώπιση ενδεχομένων διαδοχικών διαταραχών. Παράλληλα, μέσω της στρατηγικής αυτής είναι δυνατή η δραστική μείωση των θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων. Περιορίζονται οι φθορές των μονάδων, μειώνεται το μακροπρόθεσμο κόστος συντήρησης και αυξάνεται ο κύκλος ζωής τους και αποφεύγονται οι βίαιες διακυμάνσεις στην έξοδο των γεννητριών.

Έπειτα από το πέρας των 30 δευτερολέπτων, ο δευτερογενής έλεγχος αναλαμβάνει τη διαχείριση του συστήματος στοχεύοντας στην επαναφορά της συχνότητας στα 50 Hz. Σε αυτή τη μεταβατική φάση, οι αεριοστρόβιλοι αυξάνουν την ισχύ τους για να μηδενίσουν το μόνιμο σφάλμα που προκάλεσε η αρχική διαταραχή. Ταυτοχρόνως, καθώς τα FCEVs ολοκληρώνουν τη σταθεροποίηση του δικτύου, η συμβολή τους μειώνεται σταδιακά μέχρι την πλήρη απεμπλοκή τους. Με αυτή τη διαδικασία διασφαλίζεται η ομαλή μεταβίβαση προς τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, χωρίς να προκληθούν δευτερογενείς ταλαντώσεις στη συχνότητα του δικτύου. Η

παρεχόμενη συνολική ισχύς από τον στόλο των 70 οχημάτων απεικονίζεται στο σχήμα 15, όπου διακρίνονται σε δύο σαφείς συμπεριφορές ελέγχου βελτιστοποιημένες για κάθε φύση της διαταραχής.

Κατά το αρχικό στάδιο της διαταραχής, η ενεργοποίηση των μηχανισμών αδράνειας (virtual inertia) είναι ακαριαία. Παρά την καθυστέρηση των 100 ms που εισάγεται λόγω των ηλεκτροχημικών περιορισμών και της δυναμικής των κυψελών καυσίμου, η απόκριση του συστήματος παραμένει εξαιρετικά ταχεία συγκριτικά με τις συμβατικές θερμικές μονάδες. Μέσω της συνεισφοράς των FCEVs επιτυγχάνονται δύο θεμελιώδεις στόχοι, η δραστική μείωση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας (ROCOF) και η άμεση αντιστάθμιση του ελλείμματος ισχύος.

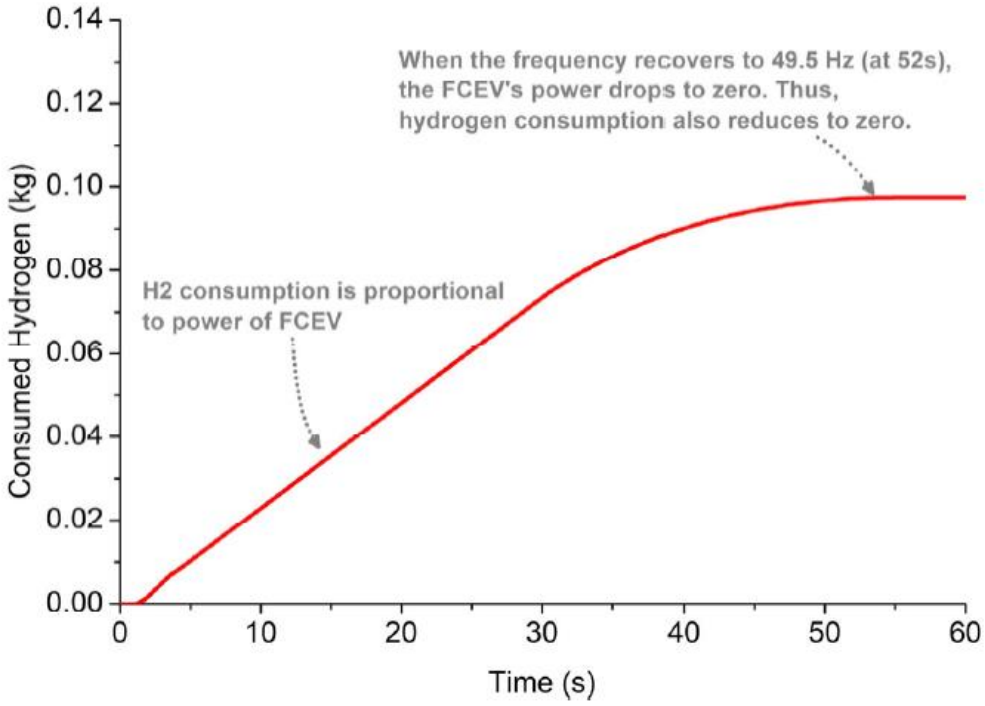


Σχήμα 16: Συνολική ισχύ FCEVs για το σενάριο 1

Κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς απόκρισης και μέχρι το χρονικό όριο των 30 δευτερολέπτων, η ισχύς εξόδου των FCEVs διατηρείται σε σχεδόν σταθερά επίπεδα, αποτρέποντας την περαιτέρω υποχώρηση της συχνότητας. Με την ενεργοποίηση του δευτερογενούς ελέγχου, η τιμή της συχνότητας αρχίζει να προσεγγίζει την ονομαστική τιμή, οδηγώντας σε αναλογική μείωση της ισχύος των οχημάτων, βάσει της γραμμικής σχέσης του ελέγχου droop (εξίσωση 1). Η παροχή ισχύος που παρέχεται από τον στόλο, μηδενίζεται πλήρως όταν η συχνότητα επανέλθει στην καθορισμένη «νεκρή ζώνη» (deadband) άνω των 49,5 Hz. Στο σημείο αυτό, η κατανάλωση του υδρογόνου διακόπτεται, καθώς το δίκτυο θεωρείται ευσταθές

και οι μονάδες βάσης αναλαμβάνουν εξ ολοκλήρου την κάλυψη του φορτίου. Εξασφαλίζοντας τη μέγιστη οικονομία καυσίμου και τη βέλτιστη διαχείριση των ενεργειακών πόρων του στόλου.

Η τεχνική υπεροχή των FCEVs μεταφράζεται σε μια επιχειρηματικά βιώσιμη και πρακτική πρόταση. Σύμφωνα με τα δεδομένα του σχήματος 17, η κατανάλωση



Σχήμα 17: Η ανά όχημα κατανάλωση υδρογόνου για το σενάριο 1

υδρογόνου για τις υποστηρικτικές υπηρεσίες στο δίκτυο είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Πιο αναλυτικά, για να αντιμετωπιστεί πλήρως μια διαταραχή αντίστοιχη με εκείνη του πρώτου σεναρίου, κάθε όχημα καταναλώνει μόλις 0,1 kg υδρογόνου. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι η κλίμακα μιας τέτοιας διαταραχής (όπου η συχνότητα λαμβάνει τιμές κάτω από 49,5 Hz) αποτελεί σπάνιο φαινόμενο κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Λόγω αυτού, η ενεργειακή επιβάρυνση για την παροχή υπηρεσιών υποστήριξης ημερησίως είναι αμελητέα συγκριτικά με τις καθημερινές ανάγκες μετακίνησης. Εν κατακλείδι, δεν επιφέρεται σημαντική επιβάρυνση στην επιχειρησιακή αυτονομία των οχημάτων, από την παροχή υποστηρικτικών υπηρεσιών στο δίκτυο.

Βασιζόμενοι στις εκτιμήσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας [45, 46, 55], παρουσιάζονται διακυμάνσεις στην τιμή του υδρογόνου μεταξύ 2 και 10 ευρώ ανά κιλό, αναλόγως της μεθόδου παραγωγής και της προέλευσης του. Στο πλαίσιο αυτών των

παραμέτρων, το κόστος λειτουργίας κάθε οχήματος για την αντιμετώπιση μιας διαταραχής εκτιμάται εξαιρετικά χαμηλό, κυμαινόμενο μεταξύ 0,2 και 1 ευρώ. Σε μια συγκριτική ανάλυση, προκύπτει ότι η δαπάνη κινητοποίησης του στόλου των FCEVs είναι πολύ μικρότερη από τις οικονομικές απώλειες μιας γενικευμένης διακοπής ηλεκτροδότησης αλλά και του υψηλού κόστους λειτουργίας των συμβατικών εφεδρικών μονάδων ταχείας εκκίνησης. Το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος λειτουργίας, συνδυαζόμενο με το κοινωνικό και οικονομικό όφελος από την αποφυγή απόρριψης φορτίου, προσδίδει στην προτεινόμενη προσέγγιση ένα μοναδικό χαρακτήρα βιωσιμότητας. Συμπεραίνουμε ότι η αξιοποίηση των FCEVs δεν είναι απλώς μια τεχνικά άρτια λύση για να διασφαλιστεί η ευστάθεια της συχνότητας, αλλά συνιστά συγχρόνως τη βέλτιστη οικονομική στρατηγική για να θωρακιστεί η αυτονομία των νησιωτικών δικτύων.

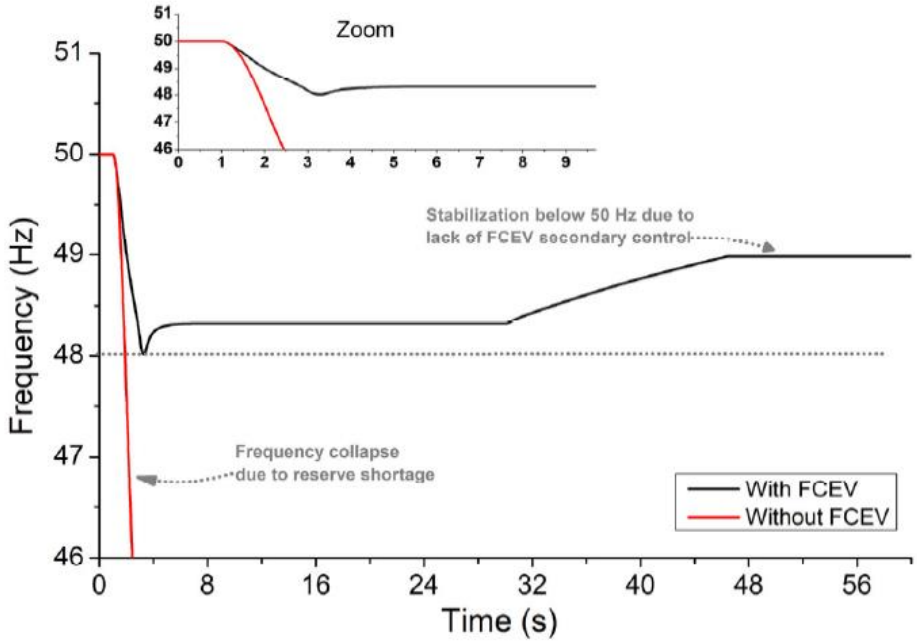
5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης δεύτερου σεναρίου

Στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται μια από τις πιο δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας για το αυτόνομο δίκτυο, η οποία βασίζεται στη μείωση των ενεργών αεριοστροβίλων από τρεις σε δύο. Με τη μεταβολή αυτή δεν μειώνεται μόνο η διαθέσιμη ισχύς παραγωγής, αλλά προκαλείται σημαντική υποβάθμιση της συνολικής αδράνειας του συστήματος. Η ικανότητα του δικτύου να αντιστέκεται σε απότομες μεταβολές της συχνότητας μειώνεται σημαντικά, κάτι που οφείλεται στον περιορισμό των περιστρεφόμενων μαζών, καθιστώντας το σύστημα εξαιρετικά ευάλωτο σε διαταραχές. Υπό από αυτές τις συνθήκες, ο ρυθμιστικός ρόλος των FCEVs κρίνεται πρωταρχικής σημασίας. Για τη συγκράτηση της συχνότητας εντός των λειτουργικών ορίων και την αναπλήρωση της ελλείπουσας φυσικής αδράνειας, ο απαιτούμενος αριθμός οχημάτων αυξάνεται σημαντικά, με τον στόλο να αποτελείται πλέον από 99 οχήματα. Η αύξηση αυτή φανερώνει ότι σε δίκτυο με χαμηλή διείσδυση συμβατικών μονάδων, η εικονική αδράνεια που παρέχεται καθίσταται επιτακτική ανάγκη για την διασφάλιση της ευστάθειας.

Η σύγκριση της απόκρισης συχνότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 18, αποτυπώνει την μεγάλη διαφορά της ευστάθειας και της συστημικής κατάρρευσης. Δίχως τη συνεισφορά των οχημάτων, το σύστημα αδυνατεί να αντιμετωπίσει τη ξαφνική απώλεια των 27 MW αιολικής παραγωγής. Ο συνδυασμός του υψηλού ρυθμού

μεταβολής της συχνότητας (ROCOF) και η ανεπαρκής αδρανειακή εφεδρεία οδηγεί σε μια μη αναστρέψιμη κατάσταση, η συχνότητα πέφτει ταχύτατα κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια ασφαλείας, οδηγώντας σε πλήρη κατάρρευση του συστήματος.

Αντιθέτως, με τον στόλο των 99 οχημάτων παρέχεται ταχύτατα η απαιτούμενη ισχύς, αναχαιτίζοντας τη πτώση της συχνότητας και προσφέροντας στο δίκτυο τον αναγκαίο χρόνο για τη σταθεροποίησή του. Συμπερασματικά, τα FCEVs ξεπερνούν τον ρόλο μιας απλής επικουρικής μονάδας και καθίστανται μια θεμελιώδης υποδομή ασφαλείας. Η ενσωμάτωση τους σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη αδράνεια, λειτουργεί ως πυλώνας ασφαλείας για να αποφευχθεί η ολική απώλεια φορτίου, ενισχύοντας την ενεργειακή ευστάθεια του νησιωτικού συστήματος.

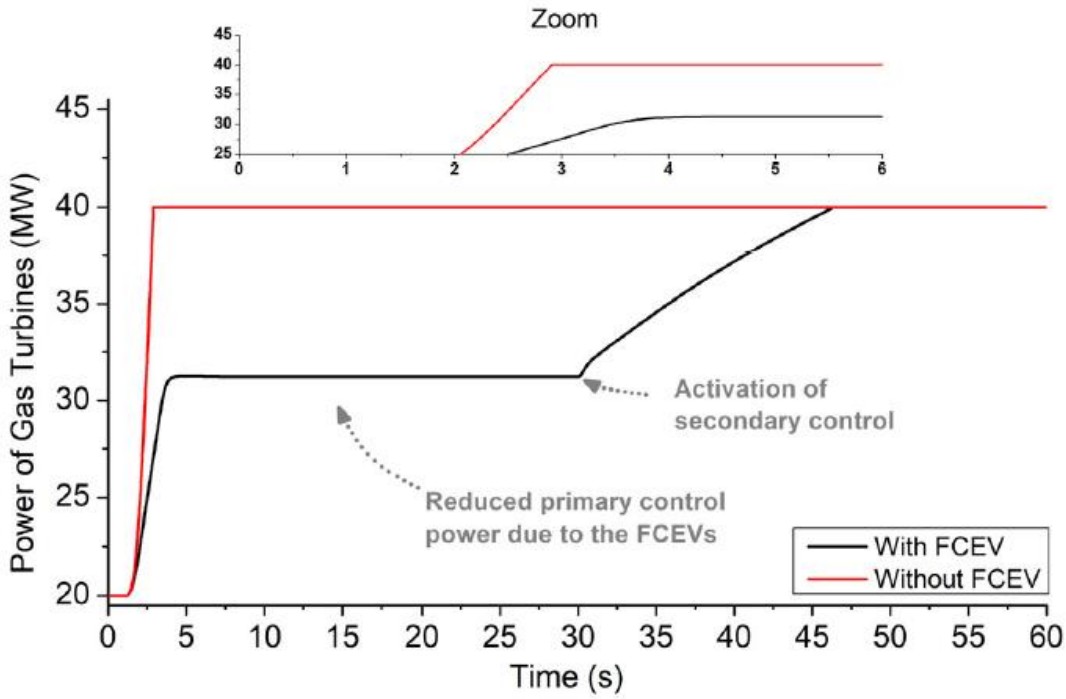


Σχήμα 18: Απόκριση συχνότητας για το δεύτερο σενάριο

Με την ενεργοποίηση του στόλου των 99 οχημάτων, η δυναμική ευστάθεια του συστήματος βελτιώνεται σημαντικά. Τα οχήματα προσφέρουν ακαριαία 16 MW πρωτογενούς εφεδρείας, μια ταχύτατη έγχυση ισχύος που αναχαιτίζει την πτώση της συχνότητας για τα πρώτα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Η ακαριαία αυτή απόκριση συγκρατεί την συχνότητα εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων ασφαλείας, αποτρέποντας την ολική κατάρρευση που παρατηρήθηκε στην περίπτωση έλλειψης επικουρικής υποστήριξης.

Λόγω τεχνικών περιορισμών στη μέγιστη χωρητικότητα ή αναγκών προγραμματισμένης συντήρησης, κρίνεται συχνά απαραίτητη η λειτουργία του

συστήματος με δύο αεριοστρόβιλους, μειώνοντας δραστικά τα επιχειρησιακά περιθώρια ελιγμών. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 19, παρόλο που οι δύο διαθέσιμες θερμικές μονάδες είναι ικανές να ανταποκριθούν στη διαταραχή, θα εξαντλούσαν γρήγορα τα όρια της ονομαστικής τους ισχύος. Συνεπώς, λόγω της μειωμένης περιστρεφόμενης αδράνειας, η συμβολή των FCEVs καθίσταται αναντικατάστατη. Η ανάληψη του βάρους της αρχικής διαταραχής από τα οχήματα επιτρέπει στις θερμικές μονάδες να λειτουργήσουν εντός των ασφαλών ορίων λειτουργίας τους, χωρίς να οδηγούνται σε κατάσταση κορεσμού.



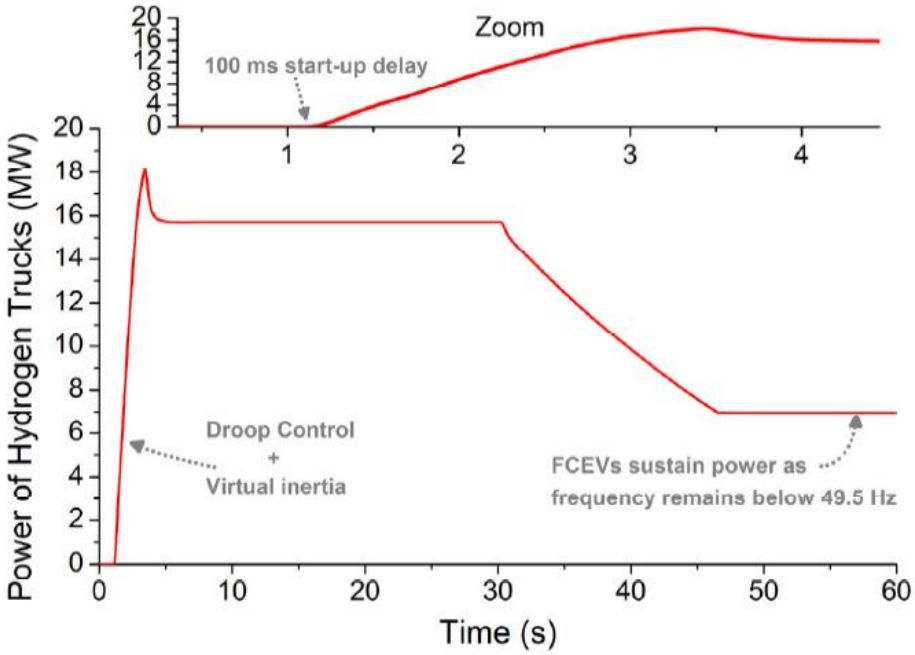
Σχήμα 19: Συνολική ισχύ αεριοστροβίλων για το δεύτερο σενάριο

Εντός του χρονικού διαστήματος των 45 δευτερολέπτων, οι αεριοστρόβιλοι προσεγγίζουν το ανώτερο όριο της επιχειρησιακής ικανότητας τους, με τιμή 40 MW. Σε αυτό το σημείο, εμφανίζεται αδυναμία των θερμικών μονάδων να παρέχουν επιπλέον ισχύ για την κάλυψη του ελλείμματος στο ενεργειακό ισοζύγιο, φαινόμενο που αποδίδεται στο φυσικό κορεσμό των μονάδων παραγωγής. Παρά την ενεργοποίηση της δευτερογενούς ρύθμισης, η ισχύς εξόδου παραμένει σταθερή, καθώς οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν ήδη στη μέγιστη ονομαστική τους τιμή. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι σε περιπτώσεις αιχμής του φορτίου ή περιορισμένης διαθεσιμότητας συμβατικών μονάδων, το δίκτυο δεν είναι ικανό να

αποκαταστήσει την συχνότητα στην ονομαστική τιμή των 50 Hz χωρίς εξωτερική υποστήριξη. Αυτές οι συνθήκες τεκμηριώνουν την στρατηγική σημασία των FCEVs για την ευστάθεια του συστήματος. Με την απουσία της συνεισφοράς τους, η συχνότητα παραμένει σε μια μόνιμη κατάσταση υποσυχνότητας, γεγονός που οδηγεί στην επιβολή αναγκαστικών περικοπών φορτίων ή σε ολική αστάθεια. Ο στόλος των οχημάτων έχει αναλάβει την λειτουργία μιας πηγής πρόσθετης ισχύος, αναπληρώνοντας το έλλειμα ανάμεσα στην ζήτηση και στη μέγιστη παραγωγική ικανότητα των θερμικών μονάδων.

Η δυναμική συμπεριφορά του στόλου των οχημάτων σε αυτό το σενάριο έχει σημαντικές διαφορές από εκείνη του πρώτου σεναρίου, επιβεβαιώνοντας την ευελιξία της προτεινόμενης λύσης. Ενώ κάτω από κανονικές συνθήκες οι επικουρικές υπηρεσίες των οχημάτων μειώνονται σταδιακά έπειτα από 30 δευτερόλεπτα, στη προκειμένη περίπτωση η παροχή ισχύος λαμβάνει μόνιμο χαρακτήρα. Από τα δεδομένα που αντλούνται από το σχήμα 20, ο στόλος των οχημάτων αναλαμβάνει να καλύψει το μόνιμο έλλειμμα της δευτερογενούς εφεδρείας, με τιμή 7 MW. Η συνδρομή αυτή είναι ύψιστης σημασίας, καθώς αποτρέπει τη μόνιμη απόκλιση της συχνότητας. Δίχως τα 7 MW που παρέχονται από τα FCEVs, η τιμή της συχνότητας θα διατηρείται κάτω από το όριο των 50 Hz, επιφέροντας καταπονήσεις και αστάθεια στον εξοπλισμό του δικτύου. Επί της ουσίας, τα FCEVs υποκαθιστούν τη λειτουργία μιας επιπλέον

θερμικής μονάδας, παρέχοντας στο σύστημα την απαραίτητη στιβαρότητα και διασφαλίζοντας τη λειτουργική ισορροπία του συστήματος.

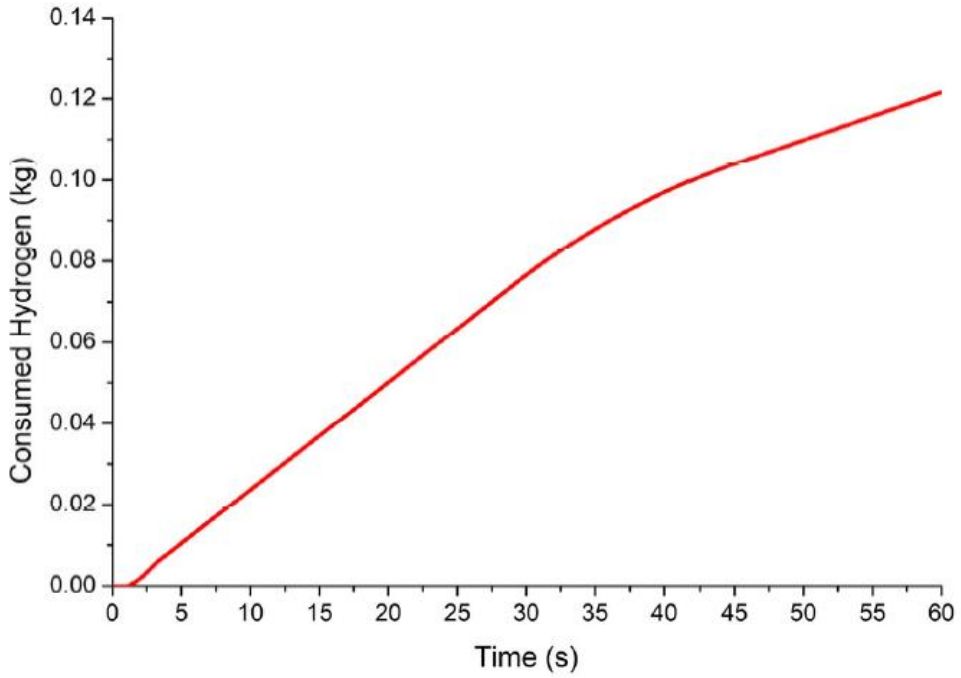


Σχήμα 20: Συνολική ισχύ FCEVs για το δεύτερο σενάριο

Η συνεχής παροχή ισχύος επιβεβαιώνει ότι ο στρατηγικός έλεγχος droop των FCEVs είναι σε θέση να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις ανάγκες του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η ικανότητα των οχημάτων να παραμένουν συνδεδεμένα και να προσφέρουν ισχύ πέραν της πρωτογενούς απόκρισης, τα μετατρέπει σε μια δυναμική ενεργειακή εφεδρεία, η οποία ενισχύει το αυτόνομο νησιωτικό δίκτυο, ακόμα και σε συνθήκες δομικής ανεπάρκειας των συμβατικών θερμικών μονάδων.

Όμως, η εν λόγω συνεχόμενη λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη κατανάλωση υδρογόνου, όπως απεικονίζεται από το σχήμα 21. Σε αυτό το σημείο εντοπίζεται μια κρίσιμη παράμετρος για τη βιωσιμότητα της προτεινόμενης λύσης. Στην περίπτωση ανάγκης για δευτερογενή υποστήριξη από τα FCEVs με παρατεταμένη διάρκεια εμφανίζεται ο κίνδυνος πλήρους εξάντλησης του καυσίμου στις δεξαμενές των οχημάτων. Η εξέλιξη αυτή καθιστά τα οχήματα μη λειτουργικά για το κύριο μεταφορικό τους έργο, προκαλώντας προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα. Συνεπώς, η υποβάθμιση της επιχειρησιακής ετοιμότητας των φορτηγών θα αποθαρρύνει τους ιδιοκτήτες από την συμμετοχή τους στο πρόγραμμα υποστήριξης δικτύου.

Συμπερασματικά, παρά την τεχνική αρτιότητα του ελέγχου droop σε πραγματικές συνθήκες κατά την διάρκεια συνεχόμενης παροχής, καθίσταται σαφές ότι η αξιοποίηση του συνόλου των οχημάτων σαν ενεργειακή εφεδρεία πρέπει να υπακούει σε αυστηρούς περιορισμούς. Η σταθεροποίηση του δικτύου δεν μπορεί να επιτυγχάνεται με τίμημα της ενεργειακής αυτονομίας και της πρωτεύουσας χρηστικότητας των οχημάτων, απαιτώντας τον ορισμό ορίων κατώτερης στάθμης καυσίμου.



Σχήμα 21: Κατανάλωση υδρογόνου ανά FCEV για το σενάριο 2

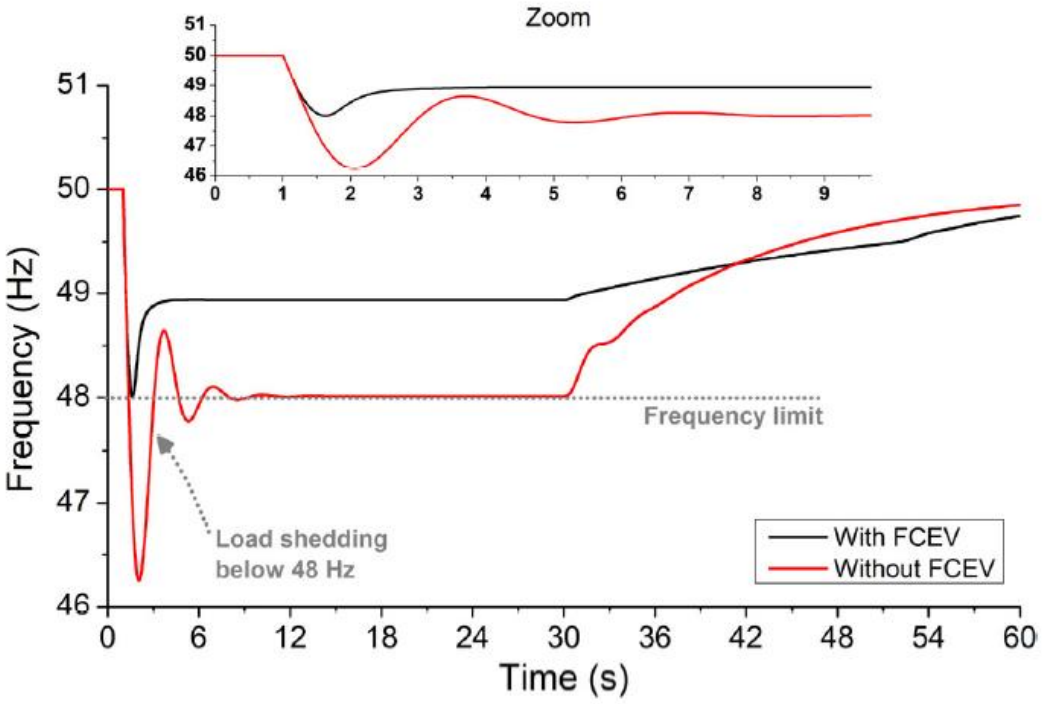
Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου ορίζουν με ακρίβεια επιχειρησιακούς και οικονομικούς περιορισμούς των FCEVs ως μέσο παροχής επικουρικών υπηρεσιών. Προκύπτει ότι η βέλτιστη αξιοποίηση του στόλου επιβάλλεται να εστιάσει αποκλειστικά στην παροχή εικονικής αδράνειας και πρωτογενούς εφεδρείας. Εξαιτίας της δυναμικής τους απόκρισης, οι κυψέλες καυσίμου καθίστανται ιδανικές για τον περιορισμό των διαταραχών στην κρίσιμη αρχική φάση, όπου η ταχύτητα παροχής ισχύος αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την επιβίωση του δικτύου.

Συνοψίζοντας, η επιχειρησιακή στρατηγική του διαχειριστή επιβάλλεται να ενσωματώσει έναν ακριβή διαχωρισμό ανάμεσα στην δυναμική ευστάθεια και στην ενεργειακή επάρκεια. Ενώ τα FCEVs αποτελούν τον κατάλληλο μηχανισμό για να διασφαλιστεί η δυναμική ευστάθεια, μέσω της απόσβεσης του μόνιμου ελλείματος

ισχύος. Η διαχείριση του μόνιμου ελλείμματος ισχύος πρέπει να παραμείνει αρμοδιότητα των πρωτογενών πηγών ή στην έσχατη περίπτωση των αυτόματων συστημάτων προστασίας. Με τον τρόπο αυτό, η συνεισφορά του στόλου παραμένει εντός των ορίων που διασφαλίζουν βιωσιμότητα των μεταφορικών αναγκών.

5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης τρίτου σεναρίου

Το τρίτο σενάριο διερευνά τη μεγαλύτερη δοκιμή για το σύστημα ελέγχου, καθώς

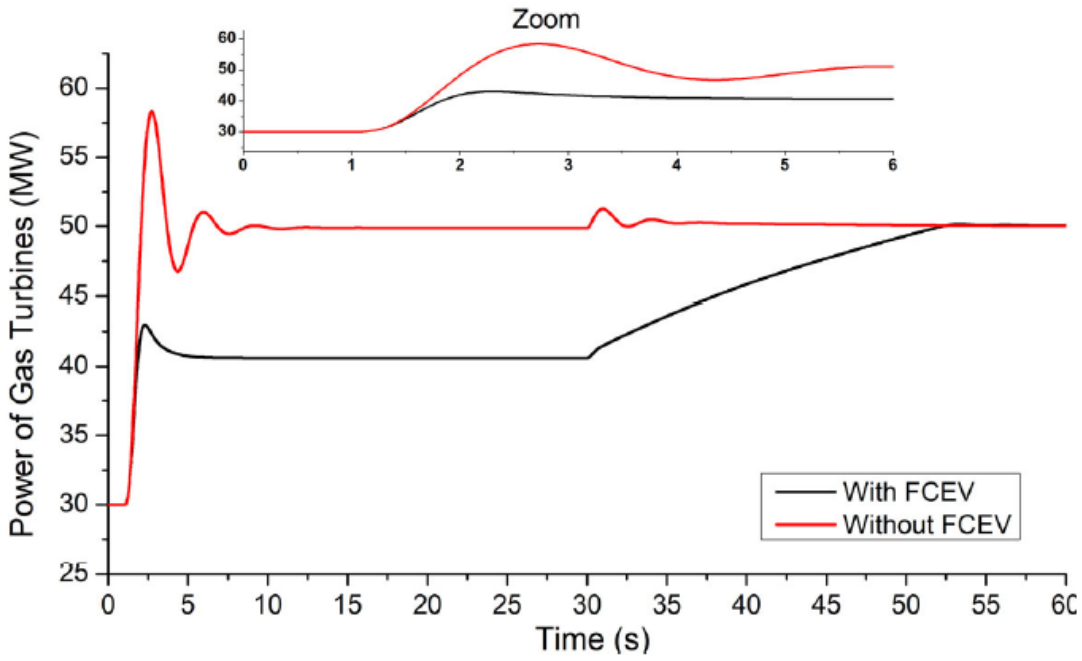


Σχήμα 22: Απόκριση συχνότητας για το τρίτο σενάριο

εξετάζεται η ακαριαία απώλεια μιας μονάδας παραγωγής. Σε αντίθεση με το πρώτο και δεύτερο σενάριο προσομοιώνονταν προοδευτικές μεταβολές φορτίου, στο παρόν σενάριο η εισαγωγή της διαταραχής γίνεται ως βηματική συνάρτηση (step change). Η ακαριαία έλλειψη ισχύος οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό ρυθμό μεταβολής συχνότητας (ROCOF) αμέσως μετά το συμβάν, δοκιμάζοντας τα όρια της ευστάθειας συχνότητας του συστήματος.

Για την παροχή της απαιτούμενης εικονική αδράνειας και τη διατήρηση της συχνότητας εντός των ορίων λειτουργίας, ο ελάχιστος απαιτούμενος στόλος αυξάνεται σημαντικά, με τον αριθμό των οχημάτων να ανέρχεται στα 122 οχήματα. Όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 22, κατά την απουσία των FCEVs, η συχνότητα υποχωρεί με ταχύ ρυθμό κάτω από το όριο των 48 Hz. Σε ένα πραγματικό δίκτυο η παραβίαση

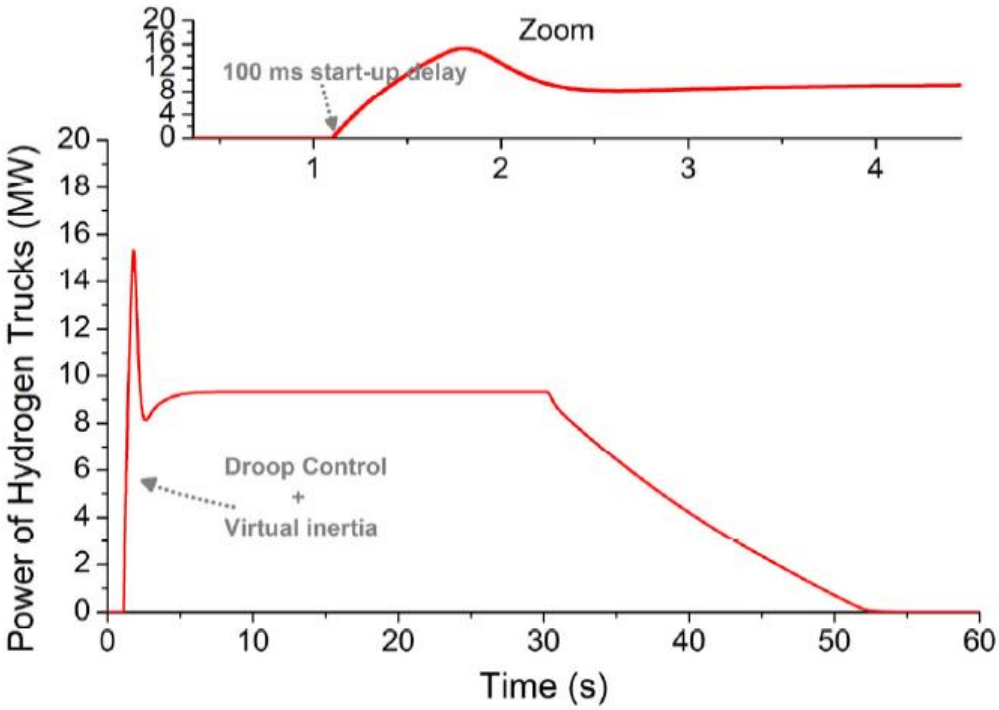
αυτού του ορίου προκαλεί την άμεση ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων χαμηλής συχνότητας, οδηγώντας σε αναγκαστική απόρριψη φορτίου (load shedding) για λόγους προστασίας. Ωστόσο, μέσω της ταχείας απόκρισης των οχημάτων και των συστημάτων ελέγχου των αντιστροφέων τους, η συχνότητα διατηρείται εντός των επιτρεπτών ορίων, εξασφαλίζοντας την συνεχή τροφοδοσία των καταναλωτών και αποτρέποντας τα σενάρια αποσύνδεσης τμημάτων φορτίου.



Σχήμα 23: Συνολική ισχύς αεριοστροβίλων για το τρίτο σενάριο

Η παροχή ισχύος από τα FCEVs έχει επικουρική λειτουργία προς τον πρωτογενή έλεγχο των αεριοστρόβιλων, παρέχοντας ενίσχυση στην στιβαρότητα της απόκρισης του συστήματος. Από την απεικόνιση του σχήματος 23, η συνεισφορά του στόλου δίνει την δυνατότητα στις θερμικές μονάδες να λειτουργήσουν σε επίπεδα χαμηλότερα από τα ονομαστικά τους όρια. Η διατήρηση αυτού του περιθωρίου ισχύος βελτιώνει μακροπρόθεσμα την δυναμική ευστάθεια του συστήματος και της ικανότητας αντιμετώπισης επιπλέον διαταραχών. Μέσω της ανάλυσης του σχήματος 24, παρατηρείται η ενεργοποίηση των μηχανισμών droop και εικονικής αδράνειας, πραγματοποιείται έπειτα από μία καθυστέρηση 100 msec. Ακόμα και με την εισαγωγή αυτής της καθυστέρησης, η απόκριση μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξαιρετικά ταχεία, καταφέρνοντας την άμεση αναχαίτηση του υψηλού ρυθμού μεταβολής της συχνότητας (ROCOF).

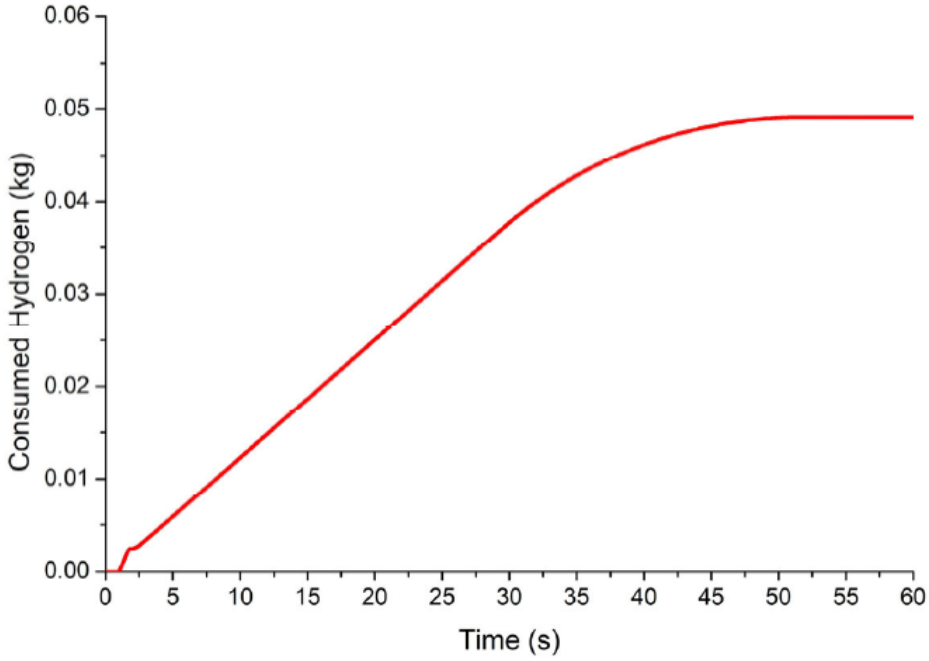
Η ισχύ εξόδου των FCEVs διατηρείται σταθερή, μέχρι την χρονική στιγμή των 30 δευτερολέπτων, όπου ενεργοποιείται πλήρως ο δευτερογενής έλεγχος για την αποκατάσταση του ελλείματος ενέργειας. Στην συνέχεια, τα οχήματα αποδεσμεύονται σταδιακά, σύμφωνα με την περιγραφή της γραμμικής σχέσης της εξίσωσης (1). Διασφαλίζεται η ομαλή μεταβίβαση του συστήματος στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μέσω της παραπάνω διαδικασίας, αποφεύγοντας την πρόκληση δευτερογενών ταλαντώσεων.



Σχήμα 24: Συνολική ισχύ FCEVs για το τρίτο σενάριο

Λόγω του περιορισμένου χρόνου της πρωτογενούς απόκρισης, η κατανάλωση υδρογόνου ανά όχημα συγκρατείται στα 0,05 kg, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 25. Η ποσότητα κρίνεται μικρής σημασίας σε σύγκριση με την συνολική χωρητικότητα της δεξαμενής ενός τυπικού βαρέος οχήματος. Ο συνδυασμός των δεδομένων αυτών με τις τρέχουσες τιμές υδρογόνου, που κυμαίνονται μεταξύ 2 και 10 ευρώ ανά κιλό, η οικονομική επιβάρυνση για κάθε όχημα ανά διαταραχή εκτιμάται μεταξύ 0,1 και 0,5 ευρώ. Η υψηλή επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα του συστήματος σε συνδυασμό με το χαμηλό μεταβλητό κόστος, αναδεικνύει τη στρατηγική των FCEV2G ως μια σταθερή παράμετρο για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών σε αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα. Η

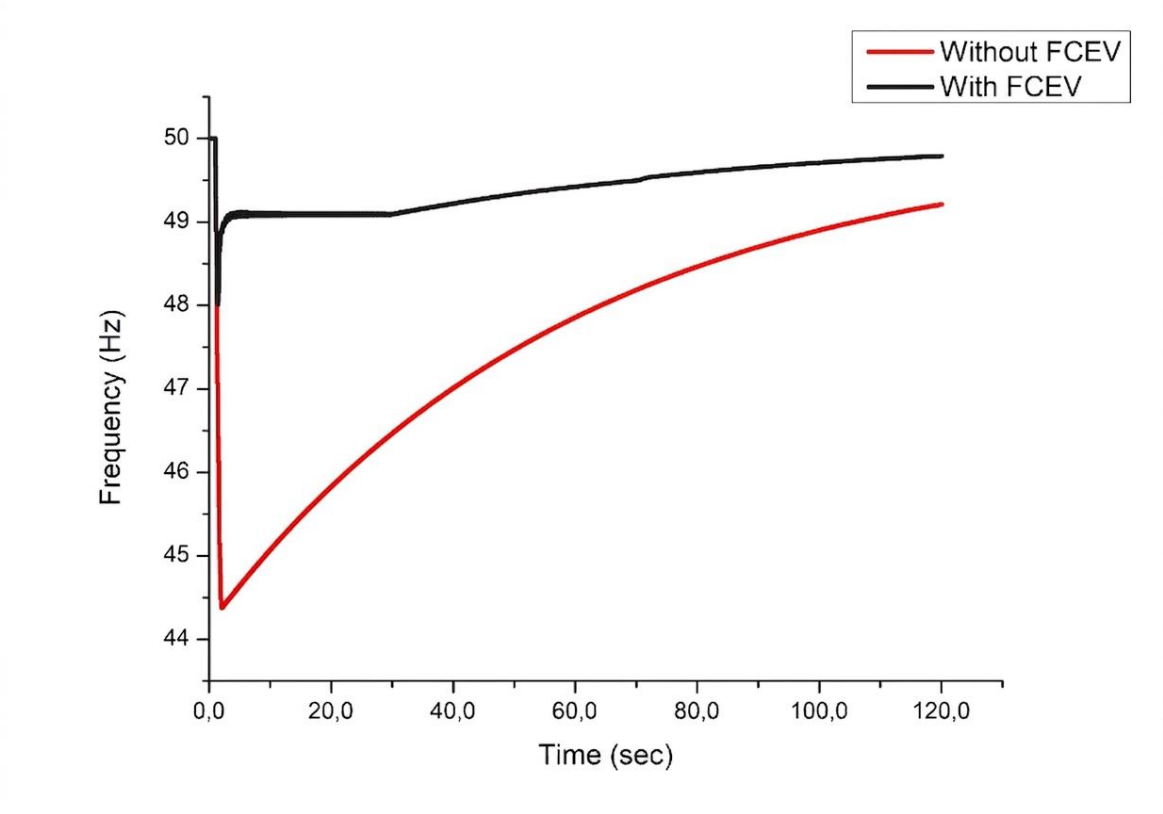
προσέγγιση αυτή παρέχει σημαντική ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος με ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους για τους ιδιοκτήτες των οχημάτων, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την απρόσκοπτη εκτέλεση του μεταφορικού τους έργου.



Σχήμα 25: Κατανάλωση υδρογόνου ανά FCEV για το τρίτο σενάριο

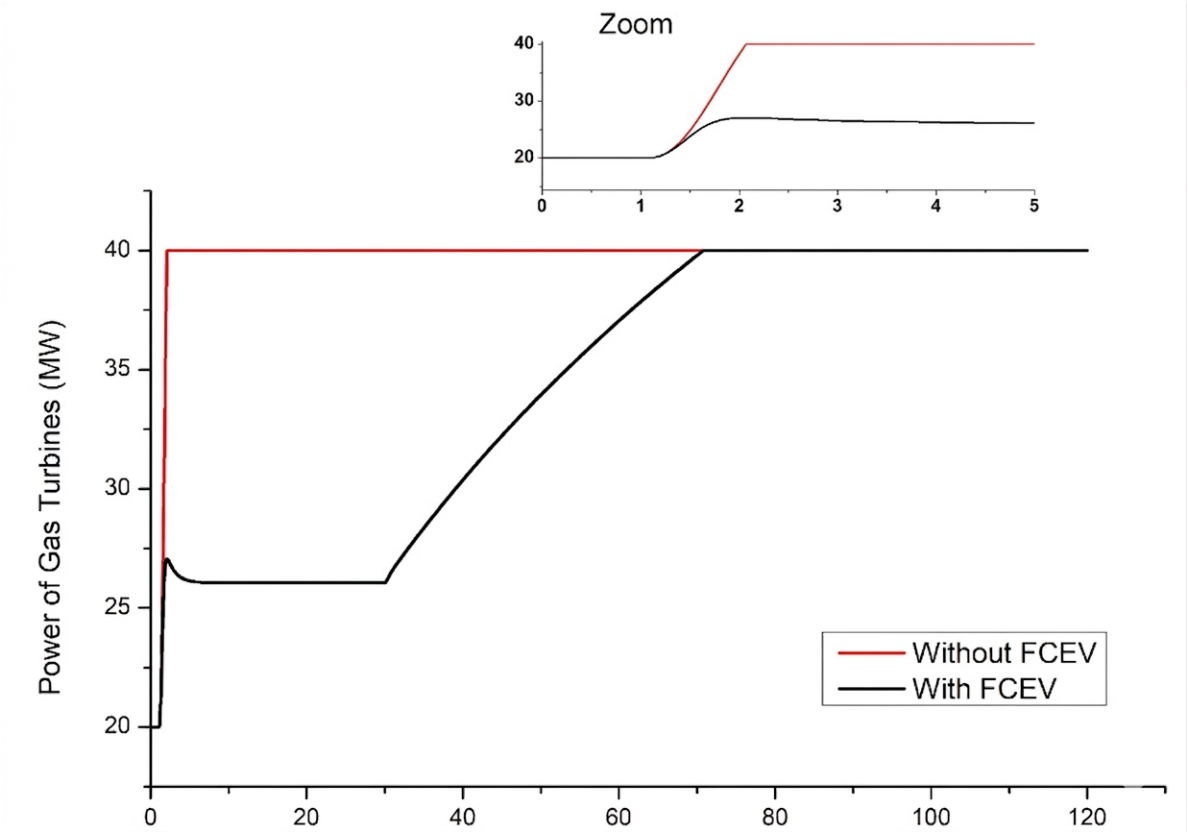
5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης τέταρτου σεναρίου

Το τέταρτο σενάριο αποτελεί την πιο απαιτητική δοκιμασία για το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου, καθώς γίνεται η προσομοίωση μιας σύνθετης διαταραχής, που συνδυάζει την απώλεια της μεγαλύτερης θερμικής μονάδας παραγωγής ταυτοχρόνως με την αύξηση του φορτίου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 26, η απουσία των οχημάτων οδηγεί σε μια απότομη πτώση της συχνότητας που ξεπερνά τα όρια ασφαλείας, γεγονός που σε πραγματικές συνθήκες θα προκαλούσε ολικό blackout. Ωστόσο, η ενεργοποίηση του απαιτούμενου ελάχιστου στόλου των 250 οχημάτων προσφέρει την αναγκαία εικονική αδράνεια, συγκρατώντας το nadir της συχνότητας εντός των αποδεκτών ορίων. Η αποκατάσταση της συχνότητας υλοποιείται σε πιο αργό ρυθμό συγκριτικά με τα προηγούμενα σενάρια, με το φαινόμενο αυτό να οφείλεται στη λειτουργία των αεριοστροβίλων υπό πλήρες φορτίο, αγγίζοντας τα όρια της ονομαστικής τους ισχύος.



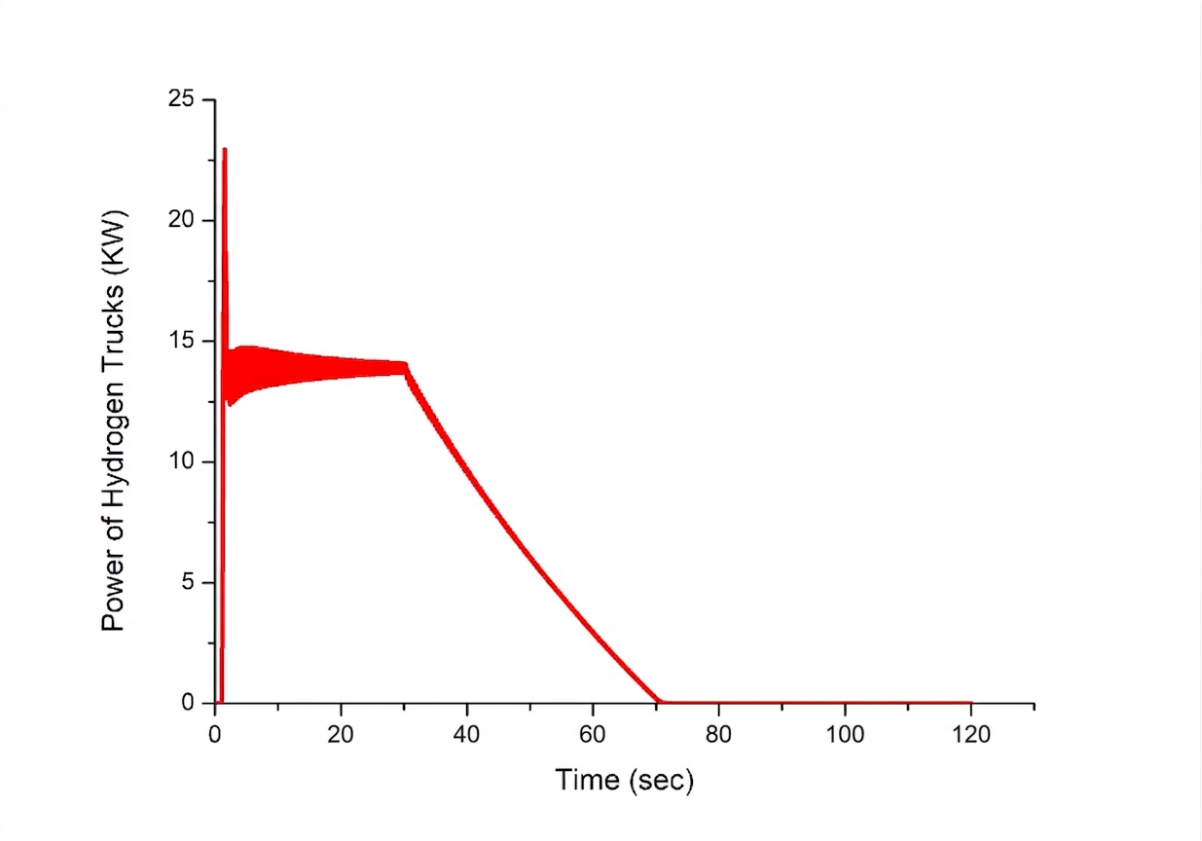
Σχήμα 26: Απόκριση συχνότητας τέταρτου σεναρίου

Η ενίσχυση της ισχύος των αεριοστροβίλων όπως φαίνεται στο σχήμα 27, αναδεικνύει την κρισιμότητα της παροχής ισχύος από τα FCEVs για την ευστάθειας του δικτύου. Απεικονίζεται η απαίτηση σε θεωρητικό επίπεδο, της ραγδαίας αύξησης ισχύος η οποία όμως δεν αποτελεί ρεαλιστική λειτουργία καθώς υπερβαίνονται οι μηχανικές αντοχές και οι ρυθμούς μεταβολής των θερμικών μονάδων. Μέσω της παροχής ισχύος από τα FCEVs, η αύξηση της παραγωγής των θερμικών μονάδων γίνεται πιο σταδιακά. Αυτή η ήπια μεταβίβαση αποτρέπει την απότομη καταπόνηση των γεννητριών, προστατεύοντας έτσι τον εξοπλισμό και επιτρέποντας στις μονάδες να λειτουργούν με ασφάλεια εντός των προδιαγραφών τους.



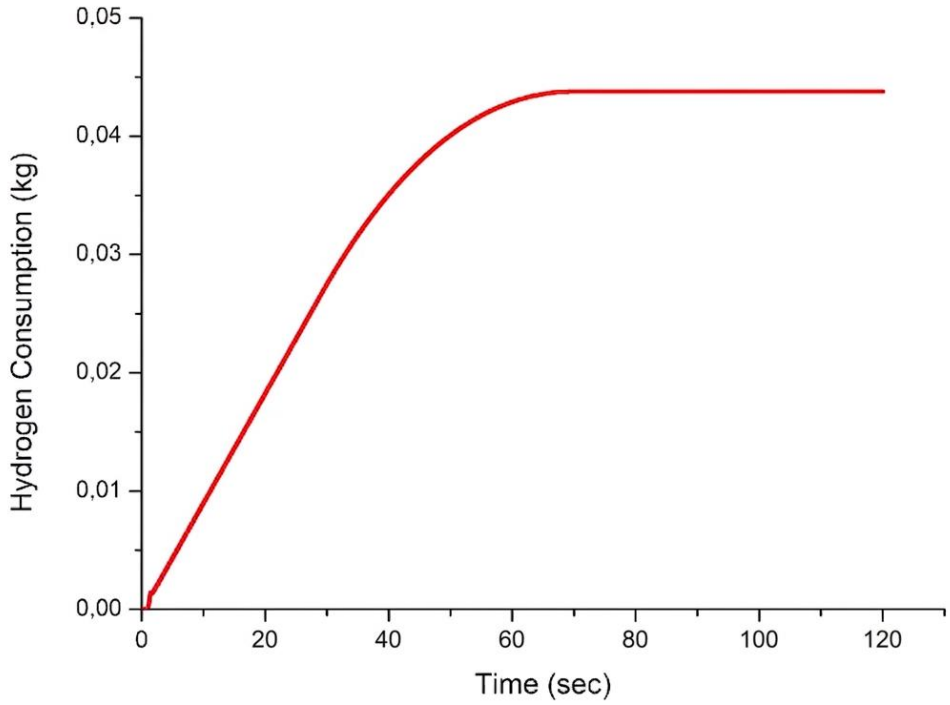
Σχήμα 27: Συνολική ισχύ αεριοστρόβιλων για το τέταρτο σενάριο

Η έγχυση ισχύος ξεκινά ακαριαία έπειτα από τη διαταραχή, καλύπτοντας το κρίσιμο έλλειμμα ενέργειας για τα πρώτα δευτερόλεπτα. Στο Σχήμα 28 παρατηρείται προοδευτική μείωση της ισχύος και μηδενισμός της ισχύος για χρόνο που αντιστοιχεί σε τιμή 70 sec. Αυτό οφείλεται στον γεγονός ότι το σύστημα ελέγχου αποσύρει σταδιακά τα οχήματα, καθώς οι μονάδες προσφέρουν την μέγιστη ισχύ τους και καλύπτουν τις ανάγκες του συστήματος, με την συνεισφορά των FCEVs να μην είναι πλέον απαραίτητη. Σημαντική είναι να αναφορά ότι η παύση παροχής ισχύος από τα φορτηγά οφείλεται στην ανάληψη του φορτίου από τις θερμικές μονάδες με επιτυχία, με την περιορισμένη χωρητικότητα των δεξαμενών υδρογόνου των οχημάτων να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σε παρατεταμένες διαταραχές. Ανεξαρτήτως συνθηκών, η αρχική παρέμβαση των οχημάτων αποδεικνύεται αρκετή, προσφέροντας τον χρόνο που απαιτείται για την ενεργοποίηση του δευτερογενή ελέγχου των αεριοστροβίλων.



Σχήμα 28: Συνολική ισχύ FCEVs για το τέταρτο σενάριο

Η συνολική κατανάλωση υδρογόνου, όπως γίνεται αντιληπτή από το Σχήμα 29 φανερώνει την αυξημένη ένταση του σεναρίου. Κάθε όχημα εμφανίζει συνεχή άνοδο ως προς την κατανάλωση κατά την διάρκεια παροχής ισχύος, με την τιμή να σταθεροποιείται στην τιμή περίπου 0,044 kg για την χρονική τιμή 70 sec, όπου μηδενίζεται και η συνεισφορά του στόλου. Συγκρίνοντας τα παραπάνω στοιχεία με τα αντίστοιχα των προηγούμενων σεναρίων, η ποσότητα καυσίμου που απαιτείται είναι αναμενόμενα μεγαλύτερη, όμως παραμένει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για την οδική αυτονομία ενός βαρέος οχήματος. Το κόστος αυτό χαρακτηρίζεται ως απόλυτα λογικό σε σχέση με υπηρεσίες εικονικής αδράνειας που προσφέρει, καθώς μέσω της άμεσης υποστήριξης από τα οχήματα αποτρέπονται οι καταστροφικές συνέπειες ενός blackout, εξασφαλίζοντας την συνεχή λειτουργία και την ευστάθεια ενός απομονωμένου νησιωτικού δικτύου ακόμα και υπό τις πιο ακραίες συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 29: Κατανάλωση υδρογόνου ανά FCEV για το σενάριο 4

5.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η παρούσα μελέτη αποδεικνύει ότι για την διασφάλιση της ευστάθειας συχνότητας ενός απομονωμένου νησιωτικού δικτύου απέναντι στις απαιτητικές διαταραχές που εξετάστηκαν, θεωρείται απαραίτητη η συμβολή ενός στόλου 100 έως 250 FCEVs. Ο τρόπος υλοποίησης του μοντέλου που προτείνεται βασίζεται στη διασύνδεση των οχημάτων σε καθορισμένους σταθμούς στάθμευσης με δυνατότητα αμφίδρομης παροχής ενέργειας στο δίκτυο. Σε θεωρητικό επίπεδο σχεδιασμού, ο στόλος θα μπορεί να διαμοιραστεί σε παραπάνω από μία τοποθεσίες, ώστε η ισχύς να διοχετεύεται σε πολλαπλά σημεία διασύνδεσης σε όλη την έκταση του νησιού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αποφόρτιση των τοπικών υποσταθμών και ενισχύεται συνολικά η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος.

Για σκοπό ρεαλιστικής αξιολόγησης της επάρκειας του απαιτούμενου στόλου χρησιμοποιήθηκαν διεθνώς αναγνωρισμένοι δείκτες αναλογίας βαρέων οχημάτων ανά πληθυσμιακή μονάδα. Σε ανεπτυγμένες οικονομίες, η αναλογία αυτή κυμαίνεται από 4 έως 8 φορτηγά μεταφορών για 1000 κατοίκους, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν τα

λεωφορεία. Εφαρμόζοντας αυτή την αναλογία σε ένα νησιωτικό σύστημα με τα αντίστοιχα πληθυσμιακά χαρακτηριστικά με το νησί της Ρόδου, ο συνολικός αριθμός των βαρέων οχημάτων που κυκλοφορούν στο νησί εκτιμάται μεταξύ 500 και 1000 μονάδων. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος των φορτηγών μεταφορών παραμένουν ακινητοποιημένα για το μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετράωρου, ένας συντελεστής διαθεσιμότητας της τάξης του 10% έως 20% κρίνεται επιτεύξιμος για το άμεσο μέλλον. Ο συντελεστής αυτός αντιστοιχεί σε έναν άμεσα διαθέσιμο στόλο 50 έως 200 οχημάτων ανά πάσα στιγμή, με την ικανότητα να καλύψει τις ανάγκες ευστάθειας του δικτύου.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η βιωσιμότητα της προτεινόμενης λύσης συγκριτικά με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω μπαταριών (BESS), τα οποία αποτελούν το σύγχρονο σημείο αναφοράς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η μέγιστη κατανάλωση υδρογόνου για την αντιμετώπιση της πιο βίαιης διαταραχής (Τέταρτο σενάριο) ανέρχεται σε 0,044 kg. Υποθέτοντας στατιστικά την εκδήλωση τριών παρόμοιων σοβαρών διαταραχών ανά μέρα, με τη συνολική ημερήσια κατανάλωση να ανέρχεται περίπου σε 0,13 kg ανά όχημα. Η ετήσια ανάγκη καυσίμου για ένα στόλο 250 οχημάτων αγγίζει τους 12 τόνους υδρογόνου. Με βάση την προβλεπόμενη μέση τιμή υδρογόνου στα 5 ευρώ ανά κιλό, το ετήσιο κόστος λειτουργίας για τον στόλο των FCEVs κάτω από αυτές τις συνθήκες εκτιμάται σε περίπου 60.225 ευρώ.

Αναφορικά με την κεφαλαιουχική δαπάνη, η λύση των FCEVs παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό κόστος για τον διαχειριστή δικτύου, καθώς βασίζεται στην αξιοποίηση ενός ήδη υπάρχων εμπορικού στόλου. Σε αντίθεση, η εγκατάσταση ενός σταθερού συστήματος μπαταριών λιθίου αντίστοιχης ικανότητας υποστήριξης χρειάζεται μια αρχική επένδυση της τάξης του 1.000.000 ευρώ. Για το σύστημα των μπαταριών, η ετήσια επιβάρυνση κεφαλαίου, που υπολογίζεται με βάση τον Συντελεστή Ανάκτησης Κεφαλαίου (CRF) για ένα χρονικό διάστημα 10 ετών και με επιτόκιο 5%, ανέρχεται σε 130.000 ευρώ. Ενώ το ετήσιο κόστος για την αναπλήρωση των απωλειών ενέργειας κατά την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών εκτιμάται στις 27.375 ευρώ, με το συνολικό ετήσιο κόστος να διαμορφώνεται στα 157.375 ευρώ.

Συμπερασματικά, η προσέγγιση FCEV2G παρουσιάζει ένα σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα, καθώς η οικονομική επιβάρυνση για ένα έτος για τον στόλο που

απαιτείται να είναι 62% χαμηλότερη από το συνολικό ετήσιο κόστος ενός συμβατικού συστήματος μπαταριών. Η διαπίστωση αυτή αναδεικνύει τη συγκεκριμένη στρατηγική ως μια εξαιρετικά ανταγωνιστική και ελκυστική λύση για την παροχή υπηρεσιών ευστάθειας σε αυτόνομα νησιωτικά ηλεκτρικά δίκτυα.

Πίνακας 2, Οικονομική σύγκριση με συστήματα μπαταριών κλίμακας δικτύου

FCEVs	Κατανάλωση οχήματος ανά διαταραχή	0.1 kg H_2
	Αριθμός διαταραχών ανά μέρα	3
	Κόστος υδρογόνου	5 ευρώ / kg
	Αριθμός οχημάτων	100
	Συνολικό ετήσιο κόστος	150 ευρώ / μέρα ή 57,750 ευρώ / έτος
Σύστημα μπαταριών κλίμακας δικτύου	Σταθμισμένο κεφαλαιουχικό κόστος	100,000 ευρώ / MW
	Εγκαταστημένη ισχύ	10 MW
	Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου	0.13
	Ετήσιο κόστος κεφαλαίου	130,000 ευρώ / έτος
	Κατανάλωση ηλεκτρισμού	500 kWh / μέρα
	Σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	0.15 ευρώ / kWh
	Ετήσιο κόστος ηλεκτρισμού	75 ευρώ / μέρα ή 27,375 ευρώ / έτος
	Συνολικό ετήσιο κόστος	157,375 ευρώ / έτος

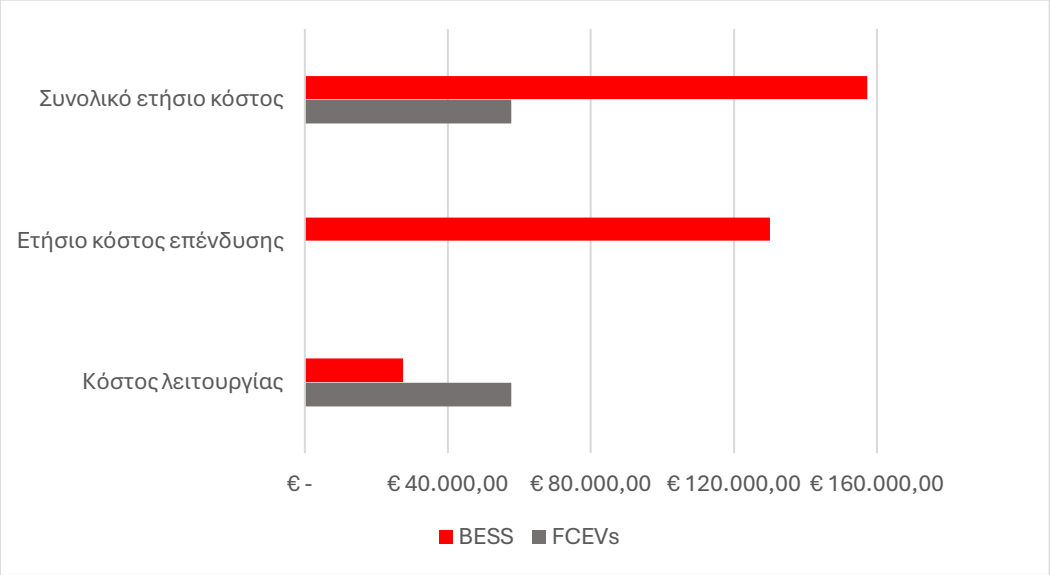
Από την τεχνοοικονομική ανάλυση προκύπτει ότι το ετήσιο κόστος για ένα σύστημα μπαταριών είναι σχεδόν τριπλάσιο από το κόστος της προτεινόμενης λύσης. Το οικονομικό αυτό όφελος ενισχύεται από την αποφυγή των σημαντικών

κεφαλαιουχικών δαπανών που απαιτούνται για την εγκατάσταση νέων υποδομών αποθήκευσης. Ως εκ τούτο, η αξιοποίηση των FCEVs για υπηρεσίες ταχείας απόκρισης συχνότητας αποτελεί μια οικονομικά βιώσιμη λύση για μη διασυνδεδεμένα νησιωτικά δίκτυα χαμηλής αδράνειας, επιτρέποντας τη σημαντική εξοικονόμηση πόρων για τους διαχειριστές του συστήματος.

Η ενσωμάτωση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, όπως τα FCEVs, για την ενίσχυση της ευστάθειας βασίζεται σε αυστηρά προκαθορισμένα λειτουργικά πρωτόκολλα. Η μέθοδος που ακολουθεί η παρούσα μελέτη (σχήμα 2) διασφαλίζει την αξιοπιστία της λύσης. Στο σημείο αυτό, η επιλογή συχνότητας κατωφλίου 49,5 Hz ορίζεται ως μια νεκρή ζώνη (deadband), η οποία εξασφαλίζει ότι τα οχήματα δεν θα ενεργοποιούνται σε διαταραχές μικρής κλίμακας. Με αυτό τον τρόπο προστατεύεται η διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου και περιορίζεται η άσκοπη κατανάλωση υδρογόνου καθώς η απόκριση του στόλου προορίζεται αποκλειστικά για κρίσιμα συμβάντα, όπως η σύνθετη διαταραχή που εξετάστηκε στο τέταρτο σενάριο.

Ο συντελεστής droop προσδιορίζει την ευαισθησία της παροχής ισχύος. Ο συντελεστής 1,5 επιλέχθηκε με σκοπό να επιτρέπει την μέγιστη παροχή ισχύος (P_{max}) όταν η συχνότητα προσεγγίζει το κατώτερο επιτρεπτό όριο, εγγυώμενος μια αναλογική και σταθερή αντίδραση στη διαταραχή. Για να υποκατασταθεί η φυσική αδράνεια των περιστρεφόμενων μαζών, χρειάζεται καθυστέρηση απόκρισης μικρότερη από 100 ms. Παράλληλα, ο χρόνος ανόδου (rise time) των 2 sec αντιπροσωπεύει τον φυσικό δυναμικό περιορισμό των κυψελών καυσίμου, ο οποίος σχετίζεται με την ταχύτητα τροφοδοσίας των αεριών στο εσωτερικό τους. Ο χρόνος αυτός εξασφαλίζει ότι ο στόλος των οχημάτων θα παρέχει την πλήρη ονομαστική ισχύ έγκαιρα, πριν την ολίσθηση της συχνότητας στο κρίσιμο σημείο καμπής, αποτρέποντας την κατάρρευση του συστήματος.

Οι παραπάνω προδιαγραφές συνδέουν άμεσα τις δυναμικές απαιτήσεις ενός αυτόνομου νησιωτικού δικτύου με την ηλεκτροχημική συμπεριφορά των κυψελών. Η συγκεκριμένη παραμετροποίηση επιτρέπει στον στόλο των FCEVs να προσομοιάζει τη δυναμική απόκριση ισχύος των σταθερών συστημάτων μπαταριών BESS, με το βασικό πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται νέα κεφαλαιουχική επένδυση για την αγορά στοιχείων αποθήκευσης, αλλά αξιοποιείται ο ήδη υπάρχων εμπορικός στόλος του νησιού.



Σχήμα 30: Οικονομικά Στοιχεία Τεχνολογιών

6 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία διερευνά μια καινοτόμο μεθοδολογία για τον ταχύ έλεγχο συχνότητας σε αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα, αξιοποιώντας βαρέα οχήματα κυψέλων καυσίμου υδρογόνου (FCEVs). Τα οχήματα αυτά είναι εξοπλισμένα με συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου, που χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Τα οχήματα μετασχηματίζονται σε ενεργά μέσα υποστήριξης του δικτύου, αξιοποιώντας τον χρόνο στάθμευσης σε κατάλληλα εξοπλισμένους σταθμούς διασύνδεσης. Η ροή ισχύος πραγματοποιείται μέσω εξελιγμένων συστημάτων αντιστροφέων (inverters), που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα (DC) των κυψελών καυσίμου σε εναλλασσόμενο (AC), επιτυγχάνοντας την πλήρη συμβατότητα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Ο εξωτερικός αντιστροφέας έχει την λειτουργία κεντρικής μονάδας ελέγχου, επεξεργάζοντας σε πραγματικό χρόνο τις διακυμάνσεις της συχνότητας και δίνοντας εντολές στα FCEVs για την παροχή εικονικής αδράνειας (Virtual Inertia) και πρωτογενούς εφεδρείας μέσω του μηχανισμού droop. Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης μέσω τεσσάρων δυναμικών σεναρίων, προσομοιώνοντας ποίκιλα επίπεδα ενεργειακής ανισορροπίας και εγγενούς αδράνειας. Από τα αποτελέσματα αποκαλύπτεται, ότι η συχνότητα διολίσθησε σε δύο από τα τρία σενάρια κάτω από την τιμή των 46 Hz, δίχως την υποστήριξη των FCEVs. Επίπεδο σημαντικά χαμηλότερο από το κρίσιμο όριο ασφαλείας των 48 Hz, ενώ σε μία περίπτωση έγινε καταγραφή ολικής κατάρρευσης του συστήματος (blackout). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο τέταρτο σενάριο, το οποίο προσομοίωσε μια σύνθετη διαταραχή (ταυτόχρονη απώλεια παραγωγής και αύξηση φορτίου), αναδεικνύοντας ότι η συνδρομή των FCEVs είναι καθοριστική για την αποτροπή της κατάρρευσης ακόμα και σε συνθήκες ακαριαίας καταπόνησης.

Σε αντίθεση με τη συνδρομή των FCEVs, η συχνότητα διατηρείται σταθερά πάνω από το όριο των 48 Hz σε όλες τις δοκιμές. Η ταχύτητα απόκρισης του στόλου λειτούργησε συμπληρωματικά προς τις θερμικές μονάδες παραγωγής, αυξάνοντας σημαντικά την ανθεκτικότητα του δικτύου χαμηλής αδράνειας. Η τεχνοοικονομική ανάλυση επιβεβαιώνει τη βιωσιμότητα του μοντέλου. Για ένα τυπικό νησιωτικό δίκτυο ισχύος 100 MW, η κατανάλωση ημερησίως εκτιμάται σε περίπου 0,3 kg για κάθε όχημα, κάτι που οδηγεί σε κόστος 1,5 ευρώ. Για την πλήρη θωράκιση της ευστάθειας χρειάζεται στόλος 100 οχημάτων, ενώ σε περιπτώσεις σύνθετων σφαλμάτων η ανάγκη δύναται να ανέλθει στις 250 μονάδες. Αριθμός που παραμένει εντός των ορίων

διαθεσιμότητας ενός νησιωτικού δικτύου όπως της Ρόδου, με το συνολικό κόστος ανά μέρα για το δίκτυο να ανέρχεται στα 150 ευρώ. Η λύση FCEV2G παρέχει τρεις φορές χαμηλότερο λειτουργικό και κεφαλαιουχικό κόστος συγκριτικά με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω μπαταριών (BESS) μεγάλης κλίμακας. Συγκεκριμένα, το ετήσιο κόστος της προτεινόμενης λύσης υπολογίζεται σε 54.750 ευρώ σε σχέση με 157.375 ευρώ που απαιτούνται για ένα ισοδύναμο σύστημα μπαταριών.

Συμπερασματικά, η αξιοποίηση των FCEVs ως παροχή επικουρικών υπηρεσιών συχνότητας αποτελεί μια οικονομική και τεχνικά άρτια λύση. Η προσέγγιση αυτή δεν βελτιστοποιεί απλώς τη χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα, αλλά προσφέρει ένα σημαντικό μέτρο διασφάλισης ενεργειακής μεταβίβασης σε συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Μειώνοντας δραστικά το κόστος λειτουργίας και τον κίνδυνο εκτεταμένων διακοπών ηλεκτροδότησης.

7 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία εξέτασε συγκεκριμένα σενάρια και ανισορροπίες ισχύος για να γίνει η αξιολόγηση των FCEVs. Μια σημαντική επέκταση που μπορεί να γίνει στο μέλλον είναι η προσομοίωση του μοντέλου σε ένα περιβάλλον δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Με την πρόσβαση σε συστήματα υπολογιστών υψηλότερης ισχύος, καθίσταται δυνατή η μοντελοποίηση πιο σύνθετων και μεγαλύτερων αυτόνομων συστημάτων, αντίστοιχα με αυτό της Ρόδου. Η Ρόδος αποτελεί ιδανικό παράδειγμα για μελέτη, καθώς χαρακτηρίζεται από τον συνδυασμό έντονων διακυμάνσεων φορτίου λόγω του τουρισμού και υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ. Η μελλοντική έρευνα χρειάζεται να εστιάσει στην εισαγωγή πραγματικών δεδομένων χρόνου (τουλάχιστον 24 ώρες ή εβδομάδων).

Η εισαγωγή πραγματικών μετρήσεων ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας, επιτρέποντας στην μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος FCEV-to-Grid κάτω από συνθήκες έντονης στοχαστικότητας των ΑΠΕ. Αντί για συγκεκριμένα σενάρια απώλειας γεννητριών, μέσω της διακύμανσης φορτίου, το μοντέλο θα μπορεί να κάνει έλεγχο της αποτελεσματικότητας του δευτεροβάθμιου ελέγχου και της εικονικής αδράνειας σε συνεχή λειτουργία.

Ένας περιορισμός αυτής της τεχνοοικονομικής ανάλυσης βασίζεται σε σταθερά λειτουργικά κόστη βάσει κατανάλωσης υδρογόνου. Όμως η παροχή ταχέος ελέγχου συχνότητας χρειάζεται μεταβολής της παροχής ισχύος από τις κυψέλες καυσίμου. Μελλοντικά θα πρέπει να ενσωματωθούν μοντέλα φθοράς της μεμβράνης, μια διερεύνηση του πως οι συνεχείς ρυθμίσεις του droop control επηρεάζουν την διάρκεια ζωής της κυψέλης.

Ο τρέχων αλγόριθμος βασίζεται σε σταθερές παραμέτρους στατισμού και εικονικής αδράνειας. Μία νέα πρόταση είναι η χρήση Μηχανικής Μάθησης για να προσαρμοστούν δυναμικά οι παράμετροι σε πραγματικό χρόνο. Ο ελεγκτής του αντιστροφέα θα μπορούσε να αλλάζει τον συντελεστή R σύμφωνα με την κατάσταση φόρτισης της δεξαμενής υδρογόνου ή της κρισιμότητας του δικτύου. Μέσω μελέτης της επικοινωνίας ανάμεσα στα οχήματα, για να συντονιστεί ο στόλος. Η βελτιοποίηση της απαιτούμενης ισχύος με σκοπό να μην γίνεται καταπόνηση όλων των οχημάτων

εξισου, αλλά να γίνεται επιλογή εκείνων που έχουν την μεγαλύτερη διαθέσιμη ποσότητα καυσίμου.

Τέλος, η επιτυχία ενός συστήματος V2G βασίζεται στην συμμετοχή των ιδιοκτητών οχημάτων εθελοντικά. Σε μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξεταστεί, κάποιο μοντέλο αποζημείωσης. Ο σχεδιασμός πολιτικών τιμολόγησης που θα ανταμείβει τους ιδιοκτήτες FCEVs για την παροχή υπηρεσιών ευστάθειας.Η ανάλυση συμπεριφοράς των οχημάτων, μελέτη της διαθεσιμότητας των οχημάτων που είναι σταθμευμένα σε πραγματικό χρόνο αλλά και η διάρκεια στάθμευσής τους. Έτσι θα καθορίζεται με ακρίβεια η εγγυημένη ισχύ που μπορεί να προσφερθεί από τον στόλο στο δίκτυο κάθε στιγμή.

Συμπερασματικά η μεταβίβαση από τα θεωρητικά σενάρια σε δυναμικές προσομοιώσεις με πραγματικά δεδομένα από νησιά όπως η Ρόδος , συνδυάζοντας την τεχνική ανάλυση της φθοράς των κυψελών, θα αποτελεί το επόμενο βήμα για να επικυρωθεί η τεχνολογία FCEV-to-Grid ως βασικό πυλώνα των έξυπνων και πράσινών νησιωτικών δικτύων.

Αναφορές

1. Katsaprakakis, D. Hybrid power plants in non-interconnected insular systems. Appl. Energy **2016**, 164, 268–283.
2. Katsaprakakis, D.; Dakanali, I.; Condaxakis, C.; Christakis, D. Comparing electricity storage technologies for small insular grids. Appl. Energy **2019**, 251, 84–89.
3. Pombo, D.V.; Martinez-Rico, J.; Marczinkowski, H.M. Towards 100% renewable islands in 2040 via generation expansion planning: The case of S.o Vicente, Cape Verde. Appl. Energy **2022**, 315, 118869.
4. Pompodakis, E.E.; Kryonidis, G.C.; Karapidakis, E.S. Volt/Var control and energy management in non-interconnected insular networks with multiple hybrid power plants. Appl. Energy **2023**, 331, 120427.
5. Sarasúaa, J.I.; Lucas, G.M.; Lafoz, M. Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system. Int. J. Electr. Power Energy Syst. **2019**, 113, 807–823.
6. Cheng, Y.; Azizipanah-Abarghooee, R.; Azizi, S.; Ding, L.; Terzija, V. Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review. Appl. Energy **2020**, 279, 115798.
7. Margaris, I.D.; Papathanassiou, S.A.; Hatziargyriou, N.D.; Hansen, A.D.; Sorensen, P. Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration. IEEE Trans. Sustain. Energy **2012**, 3, 189–199.
8. Alqahtani, S.; Shaher, A.; Garada, A.; Cipcigan, L. Impact of the High Penetration of Renewable Energy Sources on the Frequency Stability of the Saudi Grid. Electronics **2023**, 12, 1470.
9. Pompodakis, E.; Orfanoudakis, G.; Katsigiannis, G.; Tsikalakis, A.; Kryonidis, G.; Karapidakis, E.S. Investigating Frequency Stability Challenges in Non-Interconnected Renewable-Rich Islands. In Proceedings of the UPEC 2024, Cardiff, UK, 2–6 September 2024. Nguyen-Huu, T.A.; Van Nguyen, T.; Hur, K.; Shim, J.W. Coordinated control of a hybrid energy storage system for improving the capability of frequency regulation and state-of-charge management. Energies **2020**, 13, 6304.

10. Khalilisenobari, R.; Wu, M. Optimal participation of price-maker battery energy storage systems in energy and ancillary services markets considering degradation cost. Int. J. Electr. Power Energy Syst. **2022**, 138, 107924.
11. Alam, M.S.; Chowdhury, T.A.; Dhar, A.; Al-Ismail, F.S.; Choudhury, M.S.H.; Shafiullah, M.; Hossain, M.I.; Hossain, M.A.; Ullah, A.; Rahman, S.M. Solar and Wind Energy Integrated System Frequency Control: A Critical Review on Recent Developments. Energies **2023**, 16, 812.
12. Robledo, C.B.; Poorte, M.J.; Mathijssen, H.H.M.; van der Veen, R.A.C.; van Wijk, A.J.M. Fuel cell electric vehicle-to-grid feasibility: A technical analysis of aggregated units offering frequency reserves. In Intelligent Integrated Energy Systems: The PowerWeb Program at TU Delft; Palensky, P., Cvetkovi'c, M., Keviczky, T., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2019; pp. 167–194.
13. Lee, C.-Y.; Jang, J.-W.; Lee, M.-K. Willingness to accept values for vehicle-togrid service in South Korea. Transp. Res. Part D Transp. Environ. **2020**, 87, 102487.
14. Oceano, A.; Rodella, G.; Rizzo, R.; Di Noia, L.P.; Brusaglino, G. Grid balancing support through Electric Vehicles mobile storage. In Proceedings of the 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 24–26 June 2020; pp. 108–113.
15. Solanke, T.U.; Ramachandaramurthy, V.K.; Yong, J.Y.; Pasupuleti, J.; Kasinathan, P.; Rajagopalan, A. A review of strategic charging–discharging control of gridconnected electric vehicles. J. Energy Storage **2020**, 28, 101193.
16. Forrest, K.E.; Tarroja, B.; Zhang, L.; Shaffer, B.; Samuelsen, S. Charging a renewable future: The impact of electric vehicle charging intelligence on energy storage requirements to meet renewable portfolio standards. J. Power Sources **2016**, 336, 63–74.
17. van der Kam, M.; van Sark, W. Smart charging of electric vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid; a case study. Appl. Energy **2015**, 152, 20–30.
18. Hyundai Nexo. Available online: https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/nexo (accessed on 1 November 2024).

19. Toyota Mirai. Available online: https://mag.toyota.co.uk/toyota-mirai-technical-specifications-vs-fchv-adv/ (accessed on 1 November 2024).
20. Honda Clarity. Available online: https://automobiles.honda.com/honda-automobiles/home/clarity-fuel-cell (accessed on 1 November 2024).
21. Mercedes-Benz. Available online: https://group.mercedes-benz.com/documents/sustainability/product/daimlerenvironmental- check-lifecycle-compact-glc-f-cell-en.pdf (accessed on 1 November 2024).
22. Kathimerini. Available online: https://www.ekathimerini.com/economy/1209162/hydrogen-powered-bus-tested-in-centralathens- route/ (accessed on 19 August 2024). (In Greek).
23. European Commission; Joint Research Centre; Bravo Diaz, L.; Boillot, L. Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refueling Infrastructure Projects; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2024. Available online: https://data.europa.eu/doi/10.2760/892745 (accessed on 1 November 2024).
24. Lipman, T.E.; Edwards, J.L.; Kammen, D.M. Economic Implications of Net Metering for Stationary and Motor Vehicle Fuel Cell Systems in California; University of California Energy Institute: Berkeley, CA, USA, 2002.
25. Kempton, W.; Tomic, J.; Letendre, S.; Brooks, A.; Lipman, T. Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California; University of California: Davis, CA, USA, 2001; Volume IUCD-ITS-R.
26. Williams, B.D.; Kurani, K.S. Commercializing light-duty plug-in/plug-out hydrogenfuel-cell vehicles: “Mobile Electricity”technologies and opportunities. J. Power Sources **2007**, 166, 549–566.
27. Lipman, T.E.; Edwards, J.L.; Kammen, D.M. Fuel cell system economics: Comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems. Energy Policy **2004**, 32, 101–125.
28. Kissock, J.K. Combined heat and power for buildings using fuel-cell cars. In Proceedings of the 1998 International Solar Energy Conference, Albuquerque, NM, USA, 14–17 June 1998; pp. 121–132.
29. Alavi, F.; Park Lee, E.; van de Wouw, N.; De Schutter, B.; Lukszo, Z. Fuel cell cars in a microgrid for synergies between hydrogen and electricity networks. Appl. Energy **2017**, 192, 296–304.

30. Cao, S. Comparison of the energy and environmental impact by integrating a H2 vehicle and an electric vehicle into a zero-energy building. Energy Convers. Manag. **2016**, 123, 153–173.
31. Cao, S.; Alanne, K. Technical feasibility of a hybrid on-site H2 and renewable energy system for a zero-energy building with a H2 vehicle. Appl. Energy **2015**, 158, 568–583.
32. Garmsiri, S.; Koohi-Fayegh, S.; Rosen, M.A.; Smith, G.R. Integration of transportation energy processes with a net zero energy community using captured waste hydrogen from electrochemical plants. Int. J. Hydrogen Energy **2016**, 41, 8337–8346.
33. Oldenbroek, V.; Verhoef, L.A.; VanWijk, A.J.M. Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas. Int. J. Hydrogen Energy **2017**, 42, 8166–8196.
34. Robledo, C.B.; Oldenbroek, V.; Abbruzzese, F.; vanWijk, A.J.M. Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building. Appl. Energy **2018**, 215, 615–629.
35. ˙Inci, M. Technoeconomic Analysis of Fuel Cell Vehicle-to-Grid (FCV2G) System Supported by Photovoltaic Energy. Energy Technol. **2023**, 11, 2201162.
36. Qian, F.; Gao, W.; Yang, Y.; Yu, D. Economic optimization and potential analysis of fuel cell vehicle-to-grid (FCV2G) system with large-scale buildings. Energy Convers. Manag. **2020**, 205, 112463.
37. Li, H.; Sun, B.; Hao, J.; Zhao, J.; Li, J.; Khakichi, A. Economical planning of fuel cell vehicle-to-grid integrated green buildings with a new hybrid optimization algorithm. Int. J. Hydrogen Energy **2022**, 47, 8514–8531.
38. ˙Inci, M.; Buyuk, M.; Savrun, M.M.; Demir, M.H. Design and analysis of fuel cell vehicle-to-grid (FCV2G) system with high voltage conversion interface for sustainable energy production. Sustain. Cities Soc. **2021**, 67, 102753.
39. ˙Inci, M. Connecting multiple vehicular PEM fuel cells to electrical power grid as alternative energy sources: A Case Study. Int. J. Hydrogen Energy **2024**, 52, 1035–1051.
40. Savrun, M.M.; Inci, M.; Buyuk, M. Design and analysis of a high energy efficient multi-port dc-dc converter interface for fuel cell/battery electric vehicle-to-home (V2H) system. J. Energy Storage **2022**, 45, 103755.

41. Oldenbroek, V.; Hamoen, V.; Alva, S.; Robledo, C.; Verhoef, L.; van Wijk, A. Fuel cell electric vehicle-to-grid: Experimental feasibility and operational performance as balancing power plant. Fuel Cell **2018**, 18, 649–662.
42. Pompodakis, E.E.; Kryonidis, G.C.; Karapidakis, E.S. Optimizing the installation of hybrid power plants in non-interconnected islands. J. Energy Storage **2023**, 74, 109511.
43. Karapidakis, E.; Kalogerakis, C.; Pompodakis, E. Sustainable Power Generation Expansion in Island Systems with Extensive RES and Energy Storage. Inventions **2023**, 8, 127.
44. Ahmed, A.; Pompodakis, E.E.; Katsigiannis, Y.; Karapidakis, E.S. Optimizing the Installation of a Centralized Green Hydrogen Production Facility in the Island of Crete, Greece. Energies **2024**, 17, 1924.
45. Huang, C.; Zong, Y.; You, S.; Traholt, C. Analytical Modeling and Control of Grid-Scale Alkaline Electrolyzer Plant for Frequency Support in Wind-Dominated Electricity-Hydrogen Systems. IEEE Trans. Sustain. Energy **2023**, 14, 217–232.
46. Toyota Fuel Cell Modules. Available online: https://www.toyota-europe.com/content/dam/toyota/tme/assets-without-cars/2022/image/lifestyle/brands-and-services/toyota-fuel-cell/fuel-cell-business/011931_Fuel_Cell_A5_portrait_WEB_P.pdf (accessed on 1 November 2024).
47. Bignell,W.; Saffron, H.; Nguyen, T.T.; Humpage,W.D. Effects of machine inertia constants on system transient stability. Electr. Power Syst. Res. **1999**, 51, 153–165.
48. Fernandez-Guillam, A.; Gómez-Lázaro, E.; Muljadi, E.; Molina-García, Á. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. Renew. Sustain. Energy Rev. **2019**, 115, 109369.
49. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG. Available online: https://h2.live/en/fuelcell-cars/h2-trucks/ (accessed on 1 November 2024).
50. Guillamon, A.F.; Muljadi, E.; García, A.M. Frequency control studies: A review of power system, conventional and renewable generation unit modeling. Electr. Power Syst. Res. **2022**, 211, 108191.

51. Nikiforow, K.; Pennanen, J.; Ihonen, J.; Uski, S.; Koski, P. Power ramp rate capabilities of a 5 kW proton exchange membrane fuel cell system with discrete ejector control. J. Power Sources **2018**, 381, 30–37.
52. Alshehri, F.; Suárez, V.G.; Torres, J.L.R.; Perilla, A.; van der Meijden, M.A.M.M. Modelling and evaluation of PEM hydrogen technologies for frequency ancillary services in future multi-energy sustainable power systems. Heliyon **2019**, 5, e01396.
53. Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017, Toyota Mirai. Available online: https://publications.anl.gov/anlpubs/2018 /06/144774.pdf (accessed on 2 November 2024).
54. Pompodakis, E.E.; Orfanoudakis, G.I.; Katsigiannis, Y.A.; Karapidakis, E.S. Hydrogen Production fromWave Power Farms to Refuel Hydrogen-Powered Ships in the Mediterranean Sea. Hydrogen **2024**, 5, 494–518.
55. Vengatesan, S.; Jayakumar, A.; Sadasivuni, K.K. FCEV vs. BEV—A short overview on identifying the key contributors to affordable & clean energy (SDG-7). Energy Strategy Rev. **2024**, 53, 101380.
56. Jayakumar, A.; Chalmers, A.; Lie, T.T. Review of prospects for adoption of fuel cell electric vehicles in New Zealand. IET Electr. Syst. Transp. **2017**, 7, 259–266.
57. Pompodakis, E.E.; Ahmed, A.; Orfanoudakis, G.I.; Karapidakis, E.S. Optimization of Residential Hydrogen Facilities with Waste Heat Recovery: Economic Feasibility across Various European Cities. Processes **2024**, 12, 1933.
58. C. Tziotas, E. E. Pompodakis, and G. I. Orfanoudakis, "Techno-Economic Feasibility of Fuel Cell Vehicle-to-Grid Fast Frequency Control in Non-Interconnected Islands," *Hydrogen*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2025, doi: 10.3390/hydrogen6010001.