

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών



Διπλωματική Εργασία
**Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
με υπερπυκνωτές για ηλεκτρικά οχήματα**

Νικόλαος - Λάζαρος Κυριακίδης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος
Καθηγητής Τσουρβελούδης Νικόλαος

Χανιά, Ιούλιος 2022

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές του ηλεκτρικού οχήματος της ομάδας TUCer. Ο σκοπός της είναι η βελτιστοποίηση σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές του ηλεκτρικού οχήματος, ώστε να συνεργάζεται με αξιόπιστο και αποδοτικό τρόπο με την κυψέλη καυσίμου για να πετύχει την καλύτερη δυνατή απόδοση. Μετέπειτα, το συγκεκριμένο ηλεκτρικό όχημα με βελτιστοποιημένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας πρόκειται να συμμετάσχει στο διεθνή διαγωνισμό Shell Eco Marathon.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρώ καθοριστικής σημασίας τη συμβολή ορισμένων προσώπων που νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κουτρούλη Ευτύχιο, για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία εκπόνησής της.

Όλα τα μέλη και τον υπεύθυνο της ομάδας TUCer, για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Τους καθηγητές κ. Σταυρακάκη Γεώργιο και κ. Τσουρβελούδη Νικόλαο για την συμμετοχή τους στην επιτροπή αξιολόγησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, την οικογένειά μου για την κατανόηση και την στήριξή τους σε όλη αυτή την προσπάθεια.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται με στόχο, μέσω μελέτης σε επίπεδο προσομοίωσης, τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές του ηλεκτρικού οχήματος της ομάδας TUCer. Το σύστημα προσομοιώνεται με το Simulink της MathWorks.

Οι υπερπυκνωτές, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους και των πλεονεκτημάτων τους σε σχέση με τις μπαταρίες, αποτελούν ίσως την καλύτερη επιλογή ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος. Όμως, κρίνεται απαραίτητη η σύνδεση ενός μεγάλου αριθμού υπερπυκνωτών σε σειρά εξαιτίας της χαμηλής ονομαστικής τάσης τους, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται συστοιχίες για να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα τάσης και ενέργειας. Επομένως, η βελτιστοποίηση σχεδιασμού συνιστά σημαντικό παράγοντα για την καλύτερη λειτουργία των υπερπυκνωτών, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του οχήματος.

Πιο συγκεκριμένα, βασικός σκοπός του παρούσας εργασίας αποτελεί η εύρεση, μετά από έρευνα και μελέτη, της βέλτιστης επιλογής χωρητικότητας και συνδεσμολογίας της συστοιχίας των υπερπυκνωτών, που θα λειτουργήσουν ως σύστημα και θα εξασφαλίσουν την κατάλληλη ηλεκτρική τάση και την απαραίτητη ενέργεια στο όχημα. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκεται και επιτυγχάνεται η βελτίωση της απόδοσης και η αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας του οχήματος, ώστε να εξισορροπεί την παροχή ενέργειας που τροφοδοτείται από την κυψέλη καυσίμου όταν αυτή μεταβαίνει σε μια κατάσταση συντήρησης, ή ακόμα και να εξασφαλίζει την τροφοδότηση του φορτίου κατά την περίοδο της αιχμής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη ως εξής: Σε πρώτη φάση, περιγράφονται, τα χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών, η μοντελοποίηση τους, καθώς και η σημασία και η διαδικασία εξισορρόπησης της τάσης τους (balancing). Στη συνέχεια, περιγράφεται η τοπολογία του ηλεκτρικού κυκλώματος και τα ηλεκτρικά στοιχεία που την αποτελούν. Έπειτα, μοντελοποιείται το ηλεκτρικό κύκλωμα σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Κατόπιν, αφού επιλεγούν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας του οχήματος για τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του (drive cycle) και για τέσσερις διαφορετικούς τύπους υπερπυκνωτών, εξάγονται τα αποτελέσματα. Τέλος, αφού καθοριστούν τα κριτήρια αξιολόγησης, γίνεται η σύγκριση όλων των τύπων υπερπυκνωτών, εκ της οποίας προκύπτει η πιο συμφέρουσα και αποδοτική λύση.

Λέξεις Κλειδιά: υπερπυκνωτές, εξισορρόπηση τάσης, ηλεκτρικό κύκλωμα, αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, κυψέλη καυσίμου, μετατροπέας DC-DC, μοντελοποίηση, αλγόριθμος.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Πίνακας περιεχομένων	5
Κατάλογος Σχημάτων.....	7
Κατάλογος Πινάκων	14
1. Εισαγωγή.....	15
1.1 Γενικά.....	15
1.2 Η δομή της εργασίας	16
2. Υπερπυκνωτές.....	18
2.1 Υπερπυκνωτές	18
2.1.1 Γενικά	18
2.1.2 Χωρητικότητα υπερπυκνωτή	18
2.1.3 Φόρτιση και εκφόρτιση του υπερπυκνωτή	18
2.1.4 Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στον υπερπυκνωτή.....	19
2.1.5 Απώλειες υπερπυκνωτή.....	19
2.1.6 Σύνδεση υπερπυκνωτών	20
2.1.7 Κατηγορίες υπερπυκνωτών.....	22
2.1.8 Σύγκριση υπερπυκνωτών με μπαταρίες	23
2.1.9 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή	23
2.2 Εξισορρόπηση τάσης (balancing)	24
2.2.1 Σημασία ύπαρξης κυκλωμάτων εξισορρόπησης τάσεων	24
2.2.2 Διαδικασία εξισορρόπησης τάσης.....	25
3. Περιγραφή του Ηλεκτρικού Συστήματος του Οχήματος	28
3.1 Ηλεκτρικό Σύστημα	28
3.2 Κυψέλη Καυσίμου	29
3.3 Μετατροπέας DC-DC	31
3.4 Ελεγκτής κινητήρα.....	32
3.5 Κινητήρας brushless DC (BLDC).....	33
3.6 Υπερπυκνωτές	35

3.6.1	Το προηγούμενο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές	35
3.6.2	Το νέο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές	38
4.	Προσομοίωση του Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας με Υπερπυκνωτές σε Περιβάλλον Simulink	42
4.1	Λειτουργικό διάγραμμα.....	42
4.2	Μοντελοποίηση ηλεκτρικού συστήματος με Matlab/Simulink.....	42
4.2.1	Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Stack)	43
4.2.2	Μοντελοποίηση DC-DC μετατροπέα	48
4.2.3	Μοντελοποίηση ελεγκτή κινητήρα και κινητήρα BLDC	53
4.2.4	Μοντελοποίηση συστοιχίας υπερπυκνωτών	57
4.2.5	Αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.....	58
5.	Αποτελέσματα προσομοίωσης Simulink	67
5.1	Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #1	68
5.1.1	Σενάριο λειτουργίας I.....	68
5.1.2	Σενάριο λειτουργίας II.....	76
5.1.3	Σενάριο λειτουργίας III.....	84
5.2	Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #2	93
5.2.1	Σενάριο λειτουργίας I.....	93
5.2.2	Σενάριο λειτουργίας II.....	101
5.2.3	Σενάριο λειτουργίας III.....	109
5.3	Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #3	117
5.3.1	Σενάριο λειτουργίας I.....	117
5.3.2	Σενάριο λειτουργίας II.....	126
5.3.3	Σενάριο λειτουργίας III.....	133
5.4	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης	142
5.4.1	Ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά	143
5.4.2	Ως προς το σύνολο των κριτηρίων	145
6.	Συμπεράσματα.....	152
7.	Βιβλιογραφία	154

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Λειτουργικό διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος.	16
Σχήμα 2-1. Κυκλώματα RC: α) Φόρτιση υπερπυκνωτή, β) Εκφόρτιση υπερπυκνωτή.	19
Σχήμα 2-2. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών σε σειρά.	20
Σχήμα 2-3. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών παράλληλα.	21
Σχήμα 2-4. Μικτή συνδεσμολογία υπερπυκνωτών.	21
Σχήμα 2-5. Ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή.	23
Σχήμα 2-6. Πιο ακριβής απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος υπερπυκνωτή.	24
Σχήμα 2-7. Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή.	24
Σχήμα 2-8. Υπερπυκνωτές σε σειρά.	25
Σχήμα 2-9. Κύκλωμα παθητικής εξισορρόπησης με α)αντιστάσεις και β) διόδους Zener [6].	26
Σχήμα 2-10. Κύκλωμα ενεργητικής εξισορρόπησης με MOSFET [7].	27
Σχήμα 3-1. Συνδεσμολογία ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος.	28
Σχήμα 3-2. Κυψέλη καυσίμου H ₂ [8].	29
Σχήμα 3-3. Κυψέλη Καυσίμου FCgen-1020ACS [9].	30
Σχήμα 3-4. Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης-υποβιβασμού [10].	32
Σχήμα 3-5. Ελεγκτής κινητήρα.	33
Σχήμα 3-6. Κινητήρας BLDC.	34
Σχήμα 3-7. Υπερπυκνωτές BMOD0058 E016 C02 της Maxwell.	36
Σχήμα 3-8. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών.	37
Σχήμα 3-9. Υπερπυκνωτής, BCAP0450 P270 S18 της Maxwell.	39
Σχήμα 3-10. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών ανά εξάδες.	40
Σχήμα 4-1. Λειτουργικό διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος.	42
Σχήμα 4-2. Μοντελοποίηση ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος σε Matlab/Simulink.	43
Σχήμα 4-3. Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου.	43
Σχήμα 4-4. Λεπτομερές μοντέλο Fuel Cell Stack [12].	44
Σχήμα 4-5. Καμπύλη τάσης ρεύματος της κυψέλης καυσίμου FCgen-1020ACS.	45
Σχήμα 4-6. Παράμετροι μοντελοποίησης της κυψέλης καυσίμου.	47
Σχήμα 4-7. Μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής καυσίμου στην πρώτη είσοδο της κυψέλης.	48
Σχήμα 4-8. Μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής αέρα στη δεύτερη είσοδο της κυψέλης.	48
Σχήμα 4-9. Μοντελοποίηση μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης (Buck-Boost converter).	49
Σχήμα 4-10. Παράμετροι μοντελοποίησης για τα MOSFET και τις διόδους.	50

Σχήμα 4-11. Τιμή αυτεπαγωγής πηνίου του μετατροπέα DC-DC.	51
Σχήμα 4-12. Τιμή χωρητικότητας πυκνωτή του μετατροπέα DC-DC.	51
Σχήμα 4-13. Ελεγκτής MOSFET του μετατροπέα DC-DC.....	52
Σχήμα 4-14. Ρύθμιση ελεγκτή PI.	52
Σχήμα 4-15. Παράμετροι γεννήτριας PWM.....	52
Σχήμα 4-16. Διάγραμμα ροής ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα DC-DC.	53
Σχήμα 4-17. Μοντελοποίηση κινητήρα BLDC.	54
Σχήμα 4-18. Παράμετροι λειτουργίας του τριφασικού αντιστροφέα.....	54
Σχήμα 4-19. Παράμετροι λειτουργίας σύγχρονου τριφασικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.....	55
Σχήμα 4-20. Μοντελοποίηση αποκωδικοποιητή κινητήρα BLDC [14].	56
Σχήμα 4-21. Μοντελοποίηση του μπλοκ Gates κινητήρα BLDC [14].	57
Σχήμα 4-22. Μοντέλο Simulink συστοιχίας υπερπυκνωτών.	57
Σχήμα 4-23. Παράμετροι νέας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές.....	58
Σχήμα 4-24. Σήμα διακοπής cut FC.	59
Σχήμα 4-25. Κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη.	60
Σχήμα 4-26. Ελεγχόμενος διακόπτης με τις παραμέτρους του.	61
Σχήμα 4-27. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.....	62
Σχήμα 4-28. Ελεγκτής MOSFET του μετατροπέα DC-DC.....	63
Σχήμα 4-29. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.....	64
Σχήμα 4-30. Νέο κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη.....	65
Σχήμα 4-31. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #3.....	66
Σχήμα 5-1. Πρώτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος.....	68
Σχήμα 5-2. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	69
Σχήμα 5-3. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και ισχύς υπερπυκνωτών.....	69
Σχήμα 5-4. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	69
Σχήμα 5-5. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	70
Σχήμα 5-6. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	70
Σχήμα 5-7. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	71
Σχήμα 5-8. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	71
Σχήμα 5-9. Ισχύς εισόδου και εξόδου του κινητήρα BLDC.....	72
Σχήμα 5-10. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	72
Σχήμα 5-11. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	73
Σχήμα 5-12. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.....	73
Σχήμα 5-13. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	74
Σχήμα 5-14. Ροπή κινητήρα BLDC.	74

Σχήμα 5-15. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	75
Σχήμα 5-16. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	75
Σχήμα 5-17. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	76
Σχήμα 5-18. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	76
Σχήμα 5-19. Δεύτερο σενάριο λειτουργίας του οχήματος.	77
Σχήμα 5-20. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	77
Σχήμα 5-21. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	77
Σχήμα 5-22. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	78
Σχήμα 5-23. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	78
Σχήμα 5-24. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	79
Σχήμα 5-25. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	79
Σχήμα 5-26. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	80
Σχήμα 5-27. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	80
Σχήμα 5-28. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	81
Σχήμα 5-29. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.....	81
Σχήμα 5-30. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	82
Σχήμα 5-31. Ροπή κινητήρα BLDC.	82
Σχήμα 5-32. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	83
Σχήμα 5-33. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	83
Σχήμα 5-34. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	84
Σχήμα 5-35. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	84
Σχήμα 5-36. Τρίτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος.....	85
Σχήμα 5-37. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	85
Σχήμα 5-38. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	85
Σχήμα 5-39. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	86
Σχήμα 5-40. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	86
Σχήμα 5-41. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	87
Σχήμα 5-42. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	87
Σχήμα 5-43. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	88
Σχήμα 5-44. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	88
Σχήμα 5-45. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	89
Σχήμα 5-46. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.....	89
Σχήμα 5-47. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	90
Σχήμα 5-48. Ροπή κινητήρα BLDC.	90
Σχήμα 5-49. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	91

Σχήμα 5-50. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	91
Σχήμα 5-51. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	92
Σχήμα 5-52. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	92
Σχήμα 5-53. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	93
Σχήμα 5-54. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και ισχύς υπερπυκνωτών.....	93
Σχήμα 5-55. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	94
Σχήμα 5-56. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	94
Σχήμα 5-57. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	95
Σχήμα 5-58. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	95
Σχήμα 5-59. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	96
Σχήμα 5-60. Ισχύς εισόδου και εξόδου του κινητήρα BLDC.....	96
Σχήμα 5-61. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	97
Σχήμα 5-62. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	97
Σχήμα 5-63. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.....	98
Σχήμα 5-64. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	98
Σχήμα 5-65. Ροπή κινητήρα BLDC.	99
Σχήμα 5-66. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	99
Σχήμα 5-67. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	100
Σχήμα 5-68. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	100
Σχήμα 5-69. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	101
Σχήμα 5-70. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	102
Σχήμα 5-71. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	102
Σχήμα 5-72. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	102
Σχήμα 5-73. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	103
Σχήμα 5-74. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	103
Σχήμα 5-75. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	104
Σχήμα 5-76. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	104
Σχήμα 5-77. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	105
Σχήμα 5-78. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	105
Σχήμα 5-79. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.....	106
Σχήμα 5-80. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	106
Σχήμα 5-81. Ροπή κινητήρα BLDC.	107
Σχήμα 5-82. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	107
Σχήμα 5-83. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	108
Σχήμα 5-84. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	108

Σχήμα 5-85. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	109
Σχήμα 5-86. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	110
Σχήμα 5-87. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	110
Σχήμα 5-88. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.	110
Σχήμα 5-89. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	111
Σχήμα 5-90. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	111
Σχήμα 5-91. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.	112
Σχήμα 5-92. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	112
Σχήμα 5-93. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	113
Σχήμα 5-94. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	113
Σχήμα 5-95. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.	114
Σχήμα 5-96. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.	114
Σχήμα 5-97. Ροπή κινητήρα BLDC.	115
Σχήμα 5-98. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	115
Σχήμα 5-99. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	116
Σχήμα 5-100. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.	116
Σχήμα 5-101. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	117
Σχήμα 5-102. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	118
Σχήμα 5-103. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και ισχύς υπερπυκνωτών.	118
Σχήμα 5-104. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.	118
Σχήμα 5-105. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	119
Σχήμα 5-106. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	119
Σχήμα 5-107. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.	120
Σχήμα 5-108. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	120
Σχήμα 5-109. Ισχύς εισόδου και εξόδου του κινητήρα BLDC.	121
Σχήμα 5-110. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	121
Σχήμα 5-111. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	122
Σχήμα 5-112. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.	122
Σχήμα 5-113. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.	123
Σχήμα 5-114. Ροπή κινητήρα BLDC.	123
Σχήμα 5-115. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	124
Σχήμα 5-116. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	124
Σχήμα 5-117. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.	125
Σχήμα 5-118. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	125
Σχήμα 5-119. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.	126

Σχήμα 5-120. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	126
Σχήμα 5-121. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	127
Σχήμα 5-122. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	127
Σχήμα 5-123. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	128
Σχήμα 5-124. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	128
Σχήμα 5-125. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	128
Σχήμα 5-126. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	129
Σχήμα 5-127. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	129
Σχήμα 5-128. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.	130
Σχήμα 5-129. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	131
Σχήμα 5-130. Ροπή κινητήρα BLDC.	131
Σχήμα 5-131. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	132
Σχήμα 5-132. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.	132
Σχήμα 5-133. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	133
Σχήμα 5-134. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	133
Σχήμα 5-135. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	134
Σχήμα 5-136. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	134
Σχήμα 5-137. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	135
Σχήμα 5-138. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	135
Σχήμα 5-139. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	136
Σχήμα 5-140. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	136
Σχήμα 5-141. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	137
Σχήμα 5-142. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	137
Σχήμα 5-143. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.	138
Σχήμα 5-144. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.	138
Σχήμα 5-145. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.....	139
Σχήμα 5-146. Ροπή κινητήρα BLDC.	139
Σχήμα 5-147. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.....	140
Σχήμα 5-148. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.....	140
Σχήμα 5-149. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	141
Σχήμα 5-150. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.	141
Σχήμα 5-151. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	145
Σχήμα 5-152. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	146
Σχήμα 5-153. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	147
Σχήμα 5-154. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	148

Σχήμα 5-155. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	148
Σχήμα 5-156. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	149
Σχήμα 5-157. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	150
Σχήμα 5-158. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	151
Σχήμα 5-159. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	151

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Σύγκριση υπερπυκνωτών και μπαταριών.....	23
Πίνακας 3-1. Χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου FCgen-1020ACS.	31
Πίνακας 3-2. Χαρακτηριστικά μετατροπέα DC-DC.....	32
Πίνακας 3-3. Χαρακτηριστικά ελεγκτή κινητήρα.	33
Πίνακας 3-4. Απόδοση κινητήρα BLDC.....	35
Πίνακας 3-5. Χαρακτηριστικά του BMOD0058 E016 C02 της Maxwell.....	36
Πίνακας 3-6. Χαρακτηριστικά μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.	38
Πίνακας 3-7. Χαρακτηριστικά του BCAP0450 P270 S18 της Maxwell.....	39
Πίνακας 3-8. Χαρακτηριστικά μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.	41
Πίνακας 5-1. Χαρακτηριστικά τεσσάρων τύπων υπερπυκνωτών.....	67
Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	76
Πίνακας 5-3. Αποτελέσματα σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	84
Πίνακας 5-4. Αποτελέσματα σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	92
Πίνακας 5-5. Αποτελέσματα σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	101
Πίνακας 5-6. Αποτελέσματα σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	109
Πίνακας 5-7. Αποτελέσματα σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	117
Πίνακας 5-8. Αποτελέσματα σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	125
Πίνακας 5-9. Αποτελέσματα σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	133
Πίνακας 5-10. Αποτελέσματα σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	141
Πίνακας 5-11. Αξιολόγηση διακύμανσης SOC (%) των υπερπυκνωτών.....	143
Πίνακας 5-12. Αξιολόγηση τελικής τιμής SOC (%) των υπερπυκνωτών.....	144
Πίνακας 5-13. Αξιολόγηση κατανάλωσης υδρογόνου (Liters).	144
Πίνακας 5-14. Αξιολόγηση κατανάλωσης ενέργειας (Wh) κυψέλης καυσίμου.	144
Πίνακας 5-15. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	145
Πίνακας 5-16. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	146
Πίνακας 5-17. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.	147
Πίνακας 5-18. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	147
Πίνακας 5-19. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	148
Πίνακας 5-20. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.	149
Πίνακας 5-21. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	150
Πίνακας 5-22. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	150
Πίνακας 5-23. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.	151

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

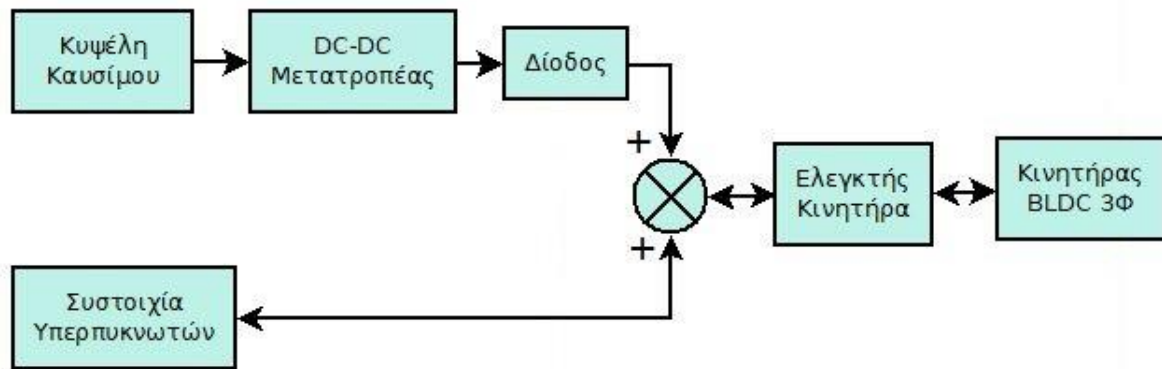
Η κλιματική αλλαγή συνδέεται στενά με τον τομέα της ενέργειας. Η πρόκληση της εποχής μας που αφορά στην όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική αντιμετώπιση όχι μόνο της κλιματικής αλλαγής αλλά και της επερχόμενης ενεργειακής κρίσης επιβάλλει αποδέσμευση από το παρόν ενεργειακό σύστημα που εξαρτάται κυρίως απ' τα ορυκτά καύσιμα. Τα συστήματα αποθήκευσης και μετατροπής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων μπαταριών, υπερπυκνωτών, κυψελών καυσίμου και ηλιακών κυψελών, έχουν διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών ζητημάτων και στην ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων. Ο υπερπυκνωτής είναι ένα πολλά υποσχόμενο, μη ρυπογόνο και καινοτόμο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ηλεκτρικά οχήματα συμβάλλουν καθοριστικά στην προσπάθεια απεξάρτησης από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και χαρακτηρίζονται από την αξιοποίηση μπαταριών και ηλεκτροκινητήρα, καθώς και από την απουσία του κινητήρα εσωτερικής καύσης, δηλαδή, τη μέχρι πρότινος επικρατούσα τεχνολογία κινητήρων στα αυτοκίνητα με βενζίνη ή πετρέλαιο. Αντί της εσωτερικής καύσης, αντλούν την απαραίτητη για την κίνησή τους ενέργεια από μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου και υπερπυκνωτές.

Τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) αποτελούν έναν τύπο οχημάτων που χρησιμοποιούν τεχνολογία «κυψελών καυσίμου», για να παράγουν την απαραίτητη για τη λειτουργία τους ηλεκτρική ενέργεια. Η επιπλέον ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες ή υπερπυκνωτές. Σε αυτόν τον τύπο οχημάτων, εξάγεται απευθείας η ηλεκτρική ενέργεια από τη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου. Ουσιαστικά, η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας υδρογόνο και παράγοντας νερό (H_2O).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφεται η διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδιασμού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές για το νέο πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα ER.2021 τεχνολογίας FCEV με υπερπυκνωτές, που κατασκευάζει η ομάδα TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στην πρώτη και δεύτερη φάση υλοποίησης της εργασίας ερευνούνται ζητήματα σχετικά με τους υπερπυκνωτές και περιγράφεται το υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα του οχήματος.



Σχήμα 1-1. Λειτουργικό διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος.

Το Σχήμα 1-1 παρουσιάζει το λειτουργικό κύκλωμα του οχήματος, που αποτελείται από έξι ηλεκτρικά στοιχεία, δηλαδή την κυψέλη καυσίμου, η οποία συνιστά την βασική πηγή της απαραίτητης για τη λειτουργία του οχήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τον μετατροπέα DC-DC, που ανάλογα με τις ανάγκες υποβιβάζει ή ανυψώνει την τάση εξόδου της κυψέλης στην κατάλληλη τιμή, τη δίοδο για τη διακοπή των ανάστροφων ρευμάτων προς την κυψέλη, τη συστοιχία υπερπυκνωτών, που συνιστά το κύριο σύστημα για την εναπόθεση της ηλεκτρικής ενέργειας, τον ελεγκτή, που οδηγεί τον κινητήρα, και τον κινητήρα, που δίνει κίνηση στο όχημα.

Στην Τρίτη και τέταρτη φάση υλοποίησης της εργασίας πραγματοποιείται η μοντελοποίηση, ρυθμίζονται οι παράμετροι και προσομοιώνεται η λειτουργία του ηλεκτρικού κυκλώματος του οχήματος, από την οποία εξάγονται συμπεράσματα για την τελική επιλογή σχεδιασμού του πραγματικού συστήματος.

Στη τελική φάση καθορίζονται πρώτα τα κριτήρια αξιολόγησης και, έπειτα, με τη λήψη των απαραίτητων αποτελεσμάτων, συνάγονται τα γενικά συμπεράσματα και διατυπώνονται οι προτάσεις για τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών.

1.2 Η δομή της εργασίας

- Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών των υπερπυκνωτών, της διαδικασίας φόρτισης και εκφόρτισης τους και του τρόπου σύνδεσής τους. Παράλληλα, παρουσιάζονται οι κατηγορίες τους, γίνεται σύγκρισή τους με τις μπαταρίες και μοντελοποίηση τους, και, τέλος, εξηγείται η σημασία και η διαδικασία εξισορρόπησης τάσης (balancing).
- Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος και των ηλεκτρικών στοιχείων που το αποτελούν, δηλαδή της κυψέλης

καυσίμου, του μετατροπέα DC-DC, του ελεγκτή κινητήρα, του κινητήρα (BLDC) και της συστοιχίας των υπερπυκνωτών.

- Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές σε περιβάλλον Simulink, δηλαδή προσομοιώνονται η κυψέλη καυσίμου, ο μετατροπέας DC-DC, ο κινητήρας με τον ελεγκτή του, η συστοιχία υπερπυκνωτών και, τέλος, οι διαφορετικοί αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τεσσάρων τύπων υπερπυκνωτών για τρία σενάρια λειτουργίας (drive cycle) για τρεις διαφορετικούς αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο παρατίθενται συμπεράσματα και προτάσεις, βασισμένα στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

2. Υπερπυκνωτές

2.1 Υπερπυκνωτές

2.1.1 Γενικά

Οι υπερπυκνωτές (SC) λόγω των δυνατοτήτων τους αποτελούν μια αξιόπιστη λύση στην αυξανόμενη ζήτηση για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, με πρόσθετο πλεονέκτημα το γεγονός ότι δεν προϋποθέτουν μετατροπές της χημικής ενέργειας. Σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυκνωτές έχουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά και πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα (Farad). Από την άλλη, η χαμηλή ονομαστική τους τάση (2.7 V) που απαιτεί τη σύνδεση ενός μεγάλου αριθμού υπερπυκνωτών σε σειρά, αποτελεί και το κυριότερο μειονέκτημά τους.

2.1.2 Χωρητικότητα υπερπυκνωτή

Το πηλίκο του φορτίου Q που είναι αποθηκευμένο σε έναν υπερπυκνωτή προς την τάση U στους οπλισμούς του ονομάζεται χωρητικότητα του υπερπυκνωτή και συμβολίζεται με το σύμβολο C . Όποτε ισχύει :

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.1)$$

Για την μέτρηση της χωρητικότητας χρησιμοποιείται στο σύστημα S.I. η μονάδα Farad που σημειώνεται με το σύμβολο F [1].

2.1.3 Φόρτιση και εκφόρτιση του υπερπυκνωτή

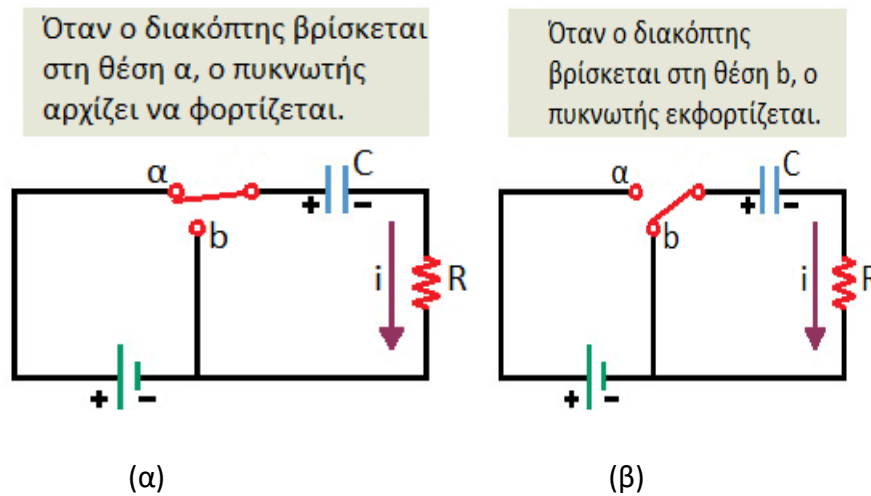
Όταν συνδέεται ένας υπερπυκνωτής στους πόλους μιας πηγής που δίνει συνεχές ρεύμα μέσω μιας αντίστασης R ο υπερπυκνωτής φορτίζεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1α. Ο χρόνος t που χρειάζεται για να φορτιστεί ο υπερπυκνωτής είναι συνάρτηση της τιμής της αντίστασης R του κυκλώματος και της τιμής της χωρητικότητάς του.

Αν η τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα του υπερπυκνωτή είναι V , η ηλεκτρική τάση στα άκρα του υπερπυκνωτή αυξάνει εκθετικά [2]:

$$V_c = V \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \text{ σε Volt} \quad (2.2)$$

όπου:

t ο χρόνος σε sec και RC η σταθερά χρόνου του κυκλώματος.



Σχήμα 2-1. Κυκλώματα RC: α) Φόρτιση υπερπυκνωτή, β) Εκφόρτιση υπερπυκνωτή.

Όταν ένας φορτισμένος υπερπυκνωτής συνδέεται στα άκρα μιας αντίστασης R , ο υπερπυκνωτής εκφορτίζεται (Σχήμα 2-1β). Η ηλεκτρική τάση στα άκρα του υπερπυκνωτή ελαττώνεται εκθετικά:

$$V_c = V \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \text{ σε Volt} \quad (2.3)$$

2.1.4 Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στον υπερπυκνωτή

Όταν φορτίζεται ένας υπερπυκνωτής, αποθηκεύει μια ορισμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ενέργεια επιστρέφεται στο κύκλωμα εκφόρτισης, όταν εκφορτίζεται.

Η ενέργεια που αποθηκεύει ένας υπερπυκνωτής είναι:

$$E = \frac{1}{2} \cdot V \cdot Q \quad (2.4)$$

Εφόσον όμως $Q = C \cdot V$, προκύπτει:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (2.5)$$

Στον παραπάνω τύπο το E εκφράζεται σε Joule, το C σε Farad και το V σε Volt.

2.1.5 Απώλειες υπερπυκνωτή

Οι υπερπυκνωτές μπορεί να εμφανίσουν απώλειες επειδή η αντίσταση του διηλεκτρικού τους δεν είναι άπειρη. Οι απώλειες εκφράζονται με την ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση

(Equivalent Parallel Resistance, EPR) του υπερπυκνωτή, και η ισχύς που καταναλώνεται είναι:

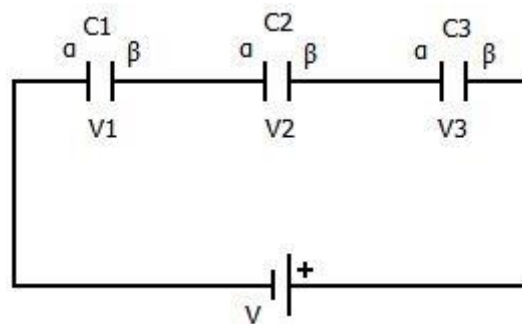
$$P = \frac{V^2}{EPR} \quad (2.6)$$

2.1.6 Σύνδεση υπερπυκνωτών

Όπως τα ηλεκτρικά στοιχεία, έτσι και οι υπερπυκνωτές μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα ή και μικτά.

α. Σύνδεση σε σειρά

Για να συνδεθούν τρεις υπερπυκνωτές με χωρητικότητες C_1 , C_2 , C_3 σε σειρά, γίνεται σύνδεση του οπλισμού β του πρώτου με τον οπλισμό α του δευτέρου, και έπειτα του οπλισμού β του δευτέρου με τον οπλισμό α του τρίτου, όπως δείχνει το Σχήμα 2-2.



Σχήμα 2-2. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών σε σειρά.

Η ολική χωρητικότητα C είναι:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \text{ και } C = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3}{C_1 \cdot C_2 + C_2 \cdot C_3 + C_1 \cdot C_3} \quad (2.7)$$

Η ολική, επομένως, χωρητικότητα είναι μικρότερη και από τη μικρότερη χωρητικότητα της συνδεσμολογίας.

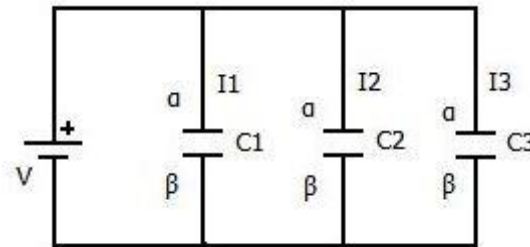
Αν συνδεθούν σε σειρά n ίσοι υπερπυκνωτές με χωρητικότητα C_1 ο καθένας, τότε:

$$C = \frac{C_1}{n} \quad (2.8)$$

Στην περίπτωση αυτή, η ηλεκτροστατική αντοχή της διάταξης αυξάνει ανάλογα με τους υπερπυκνωτές που συνδέονται σε σειρά.

β. Σύνδεση παράλληλα

Για να συνδεθούν παράλληλα τρεις υπερπυκνωτές με χωρητικότητες C_1 , C_2 , C_3 , συνδέονται όλοι οι οπλισμοί α μαζί και όλοι οι οπλισμοί β πάλι μαζί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών παράλληλα.

Η ολική χωρητικότητα C είναι:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.9)$$

Άρα η ολική χωρητικότητα της συνδεσμολογίας είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους χωρητικότητων.

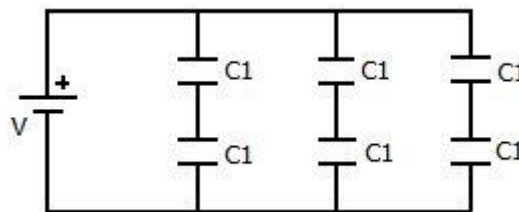
Αν συνδεθούν παράλληλα n ίσοι υπερπυκνωτές με χωρητικότητα C_1 ο καθένας, τότε:

$$C = n \cdot C_1 \quad (2.10)$$

Στη σύνδεση υπερπυκνωτών παράλληλα η ηλεκτροστατική αντοχή δεν αυξάνει, αλλά μένει ίση με τη μικρότερη ηλεκτροστατική αντοχή που παρουσιάζει ένας από τους συνδεδεμένους υπερπυκνωτές.

γ. Μικτή συνδεσμολογία.

Για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια σύνδεση, πρέπει να συνδεθούν πρώτα σε σειρά n υπερπυκνωτές και ύστερα παράλληλα οι k ομάδες που σχηματίζουν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4. Μικτή συνδεσμολογία υπερπυκνωτών.

Η ολική χωρητικότητα είναι ίση με το άθροισμα που παρουσιάζουν οι χωρητικότητες των k ομάδων ως εξής:

$$- \text{Χωρητικότητα ομάδας: } C' = \frac{C_1}{n} \quad (2.11)$$

$$- \text{Ολική χωρητικότητα: } C = k \cdot C' = \frac{k}{n} \cdot C_1 \quad (2.12)$$

2.1.7 Κατηγορίες υπερπυκνωτών

Οι υπερπυκνωτές, ανάλογα με τον μηχανισμό αποθήκευσης φορτίου, ταξινομούνται σε τρεις τύπους:

- τους υπερπυκνωτές διπλής στρώσης, που αποθηκεύουν τα φορτία στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου σε ένα ηλεκτρικό διπλό στρώμα και έχουν ηλεκτρόδια συνήθως από γραφένιο ή ενεργό άνθρακα.
- τους ψευδοπυκνωτές, που αποθηκεύουν το φορτίο μόνο σε περιορισμένη περιοχή στην επιφάνειά τους και έχουν ηλεκτρόδια αγώγιμα πολυμερή ή οξείδια μετάλλου.
- τους υβριδικούς υπερπυκνωτές που αξιοποιούν και τους δύο μηχανισμούς, δηλαδή οι υβριδικοί υπερπυκνωτές έχουν ένα ηλεκτρόδιο από οξείδια του μετάλλου και ένα από ενεργό άνθρακα.

Οι υπερπυκνωτές διπλής στρώσης αντέχουν εκατομμύρια κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης λόγω του τρόπου που αποθηκεύουν τα φορτία σε ένα διπλό στρώμα στην επιφάνεια του κάθε ηλεκτροδίου [3]. Το πρώτο στρώμα που είναι κοντά στο ηλεκτρόδιο λειτουργεί σαν διηλεκτρικό, ενώ στο δεύτερο συγκεντρώνονται τα φορτία. Επειδή αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα και στα δύο ηλεκτρόδια του υπερπυκνωτή, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο πυκνωτών εντός του.

Οι ψευδοπυκνωτές χρησιμοποιούν οξείδια μετάλλων στο ενεργό ηλεκτρόδιό τους και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο των οξειδοαναγωγικών επιφανειακών αντιδράσεων και αποθηκεύουν πολύ περισσότερη ενέργεια από τους υπερπυκνωτές διπλής στρώσης.

Τέλος, οι υβριδικοί υπερπυκνωτές εμφανίζουν τα χαρακτηριστικά τόσο των υπερπυκνωτών διπλής στρώσης όσο και των ψευδοπυκνωτών, και ως εκ τούτου οι επιδόσεις τους βρίσκονται στο ενδιάμεσο.

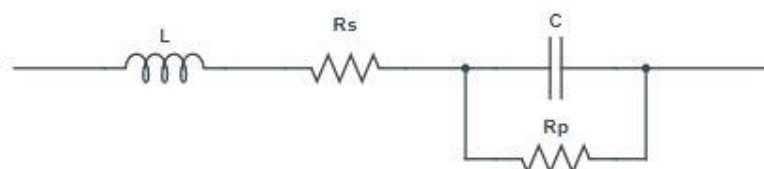
2.1.8 Σύγκριση υπερπυκνωτών με μπαταρίες

Οι υπερπυκνωτές σε σύγκριση με τις μπαταρίες εμφανίζουν πολύ καλύτερη λειτουργικότητα σε πολλούς τομείς, όπως οι κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης, η πυκνότητα ισχύος, η αξιοπιστία τους και η λειτουργία σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μια ενδεικτική σύγκριση μεταξύ υπερπυκνωτών και μπαταριών φαίνεται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1. Σύγκριση υπερπυκνωτών και μπαταριών.		
Λειτουργία	Υπερπυκνωτής	Μπαταρία
Διάρκεια ζωής (σε έτη)	10 έως 15	5 έως 10
Κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης	έως 10^6	500 έως 10^3
Τάση στοιχείου	2.3 έως 2.75 V	3.6 έως 3.7 V
Ενεργειακή πυκνότητα (Whkg^{-1})	0.1 έως 5	120 έως 240
Πυκνότητα ισχύος (Wkg^{-1})	έως 10^4	1000 έως 3000
Κόστος για κάθε Wh	17 έως 20 €	0.5 έως 1 €
Χρόνοι φόρτισης (sec)	1 έως 10	10^3 έως 10^5

2.1.9 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή

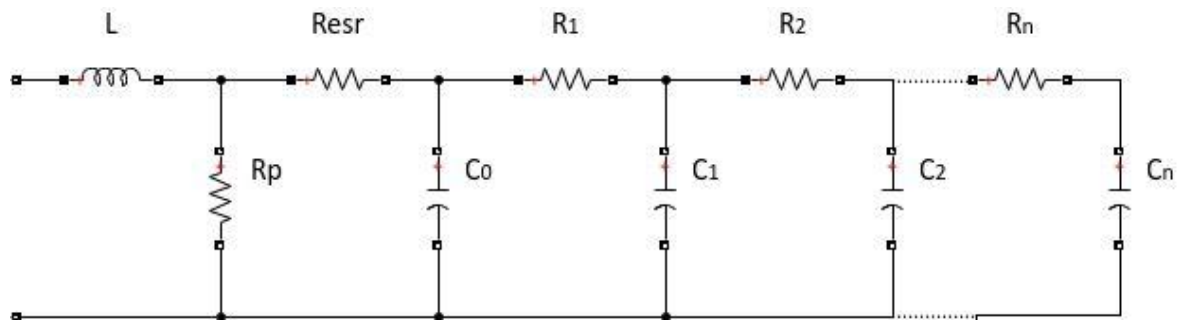
Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τους συμβατικούς πυκνωτές μπορεί να εφαρμοστεί και στους υπερπυκνωτές [4].



Σχήμα 2-5. Ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή.

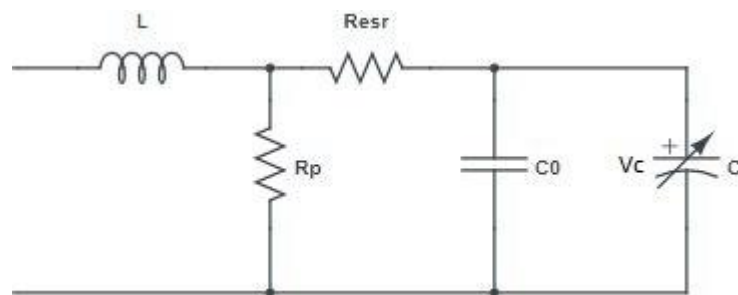
Το Σχήμα 2-5 παρουσιάζει ένα ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή. Σ' αυτό υπάρχουν τέσσερα ηλεκτρικά στοιχεία, δηλαδή μια χωρητικότητα C, μια αντίσταση σειράς R_s , μια παράλληλη αντίσταση R_p , και ένα πηνίο σε σειρά L. Όσο διαρκεί η φάση της φόρτισης/εκφόρτισης, η αντίσταση σειράς, η οποία ονομάζεται επίσης ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR), συμβάλλει στην απώλεια ενέργειας. Με τον ίδιο τρόπο επιδρά στην απώλεια ενέργειας η αντίσταση ρεύματος διαρροής, που είναι η παράλληλη αντίσταση R_p , λόγω της αυτοεκφόρτισης του υπερπυκνωτή.

Το Σχήμα 2-6 παρουσιάζει μια πιο ακριβή απεικόνιση του ισοδύναμου κυκλώματος του υπερπυκνωτή.



Σχήμα 2-6. Πιο ακριβής απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος υπερπυκνωτή.

Το κλασικό μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-7 είναι το απλούστερο από τα μοντέλα υπερπυκνωτή.



Σχήμα 2-7. Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή.

Το Σχήμα 2-7 παρουσιάζει την ισοδύναμη αντίσταση σειράς R_{esr} , που συμβάλλει στην απώλεια ενέργειας κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση ενός υπερπυκνωτή, την ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση R_p , που προσομοιώνει την απώλεια ενέργειας λόγω της αυτοεκφόρτισης του υπερπυκνωτή, καθώς και το πηνίο L , που προκύπτει κυρίως από τη φυσική κατασκευή του υπερπυκνωτή και είναι συνήθως πολύ μικρό. Η αντίσταση R_p είναι πάντα υψηλότερη από την R_{esr} .

2.2 Εξισορρόπηση τάσης (balancing)

2.2.1 Σημασία ύπαρξης κυκλωμάτων εξισορρόπησης τάσεων

Ο μέσος υπερπυκνωτής έχει μέγιστη τάση φόρτισης μεταξύ 2.5 και 2.7 V. Για πολλές εφαρμογές αυτή η χαμηλή τάση δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, οπότε η συνήθης πρακτική είναι η τοποθέτηση πολλαπλών υπερπυκνωτών σε σειρά.

Οι υπερπυκνωτές μπορεί να έχουν διαφορά στη χωρητικότητα, την ισοδύναμη αντίσταση σειράς και το ρεύμα διαρροής, ακόμα και αν ανήκουν στην ίδια σειρά παραγωγής. Για τις αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών αυτών των τιμών και χαρακτηριστικών ευθύνονται είτε η γραμμή παραγωγή τους, είτε η διαφορετική μεταβολή της χωρητικότητας τους με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είτε η αλλοίωσή τους κατά την πάροδο του χρόνου, με

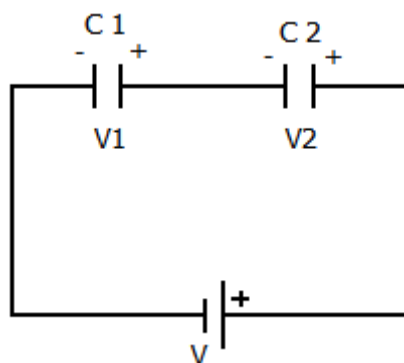
αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ανισορροπία στις τάσεις των υπερπυκνωτών που συνδέονται σε σειρά.

Εξαιτίας αυτού ενδέχεται η συνολική τάση της συστοιχίας υπερπυκνωτών να κατανεμηθεί άνισα μεταξύ των επιμέρους υπερπυκνωτών κατά τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης, και έτσι να παρουσιαστούν υπερτάσεις σε ορισμένους υπερπυκνωτές της συστοιχίας. Γι' αυτόν το λόγο, είναι σημαντικό να διατηρείται η τάση σε οποιονδήποτε υπερπυκνωτή κάτω από τη μέγιστη συνιστώμενη τάση λειτουργίας. Διαφορετικά, μπορεί να μειωθεί η διάρκεια ζωής του υπερπυκνωτή εξαιτίας της αποσύνθεσης του ηλεκτρολύτη ή της αύξησης της ισοδύναμης αντίστασης σειράς (ESR) [5].

2.2.2 Διαδικασία εξισορρόπησης τάσης

Ο βασικότερος παράγοντας που συντελεί στην ανισορροπία τάσεων λειτουργίας είναι η διαφορά χωρητικότητας μεταξύ των υπερπυκνωτών, καθώς κατά τη σύνδεση τους σε σειρά ένα στοιχείο με χαμηλότερη χωρητικότητα θα φορτιστεί σε υψηλότερη τάση. Οι τιμές χωρητικότητας υπερπυκνωτών μπορεί να διαφέρουν έως και $\pm 20\%$ από υπερπυκνωτή σε υπερπυκνωτή. Για παράδειγμα, σε μια ομάδα υπερπυκνωτών είναι δυνατό να βρεθεί ένα στοιχείο ονομαστικής τάσης 2.7 V με τιμή χωρητικότητας 100 F δίπλα σε ένα στοιχείο με τιμή χωρητικότητας 127 F. Εάν αυτά τα δύο στοιχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση 5 V, είναι δυνατό στο ένα από τα δύο η τάση να ανέλθει στα 2.2 V, ενώ στο δεύτερο η τάση να φτάσει τα 2.8 V, που αποτελεί τιμή εκτός προδιαγραφών λειτουργίας.

Πιο αναλυτικά:



Σχήμα 2-8. Υπερπυκνωτές σε σειρά.

Δεδομένα: $V = 5V$, $C_1 = 100F$, $C_2 = 127F$.

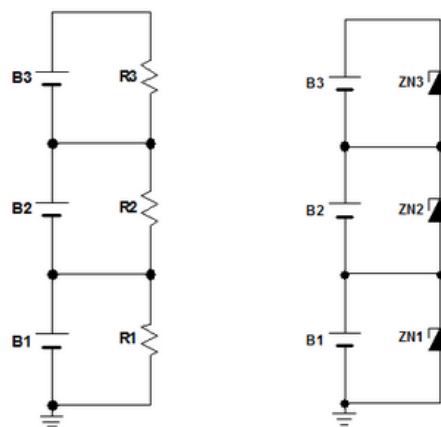
Η ολική χωρητικότητα C είναι: $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

Για τη συνδεσμολογία σειράς ισχύει: $Q = V \cdot C = V_1 \cdot C_1 = V_2 \cdot C_2$

$$\text{οπότε: } V_1 = V \cdot \frac{C}{C_1} = V \cdot \frac{\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}{C_1} = V \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

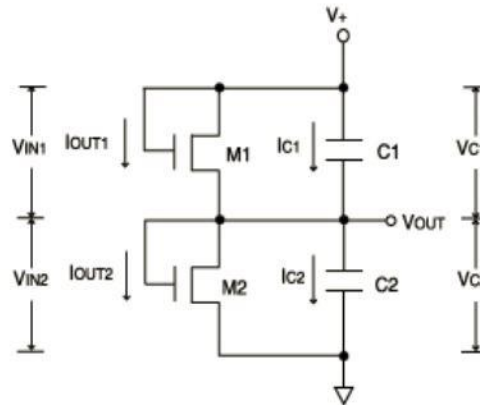
$$\text{Άρα: } V_1 = V \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} = 5 \cdot \frac{127}{100 + 127} = 2.8 \text{ V} > 2.7 \text{ V}, \text{ εκτός προδιαγραφών.}$$

Ο συνήθης τρόπος αντιμετώπισης αυτών των ανισορροπιών είναι η τοποθέτηση ενός κυκλώματος εξισορρόπησης παράλληλα με τη συστοιχία υπερπυκνωτών (**παθητική εξισορρόπηση** με αντιστάσεις ή διόδους Zener), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-9. Η παθητική εξισορρόπηση είναι απλή στην κατασκευή, έχει μικρό κόστος και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες η φόρτιση/εκφόρτιση των υπερπυκνωτών δεν είναι συχνή και γίνεται με σταθερή τιμή. Μια τέτοια τεχνική τοποθετεί μια αντίσταση παράκαμψης παράλληλα με κάθε υπερπυκνωτή, με τιμή τέτοια ώστε να απομακρύνει το ρεύμα διαρροής του στοιχείου. Όταν οι αντιστάσεις που συνδέονται παράλληλα με τους υπερπυκνωτές έχουν την ίδια τιμή, οι υπερπυκνωτές με υψηλότερες τάσεις θα εκφορτίζονται μέσω της εξωτερικής αντίστασης με ταχύτερο ρυθμό συγκριτικά με τους υπερπυκνωτές με χαμηλότερες τάσεις. Αυτό βοηθά στην ομοιόμορφη κατανομή της συνολικής τάσης σε ολόκληρη τη σειρά υπερπυκνωτών [5].



Σχήμα 2-9. Κύκλωμα παθητικής εξισορρόπησης με α) αντιστάσεις και β) διόδους Zener [6].

Από την άλλη, για εφαρμογές χαμηλής ισχύος με συνεχή φόρτιση/εκφόρτιση των υπερπυκνωτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα εξισορρόπησης ενεργού τάσης αντί για ένα δίκτυο αντιστάσεων (**ενεργητική εξισορρόπηση**), το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2-10. Το ενεργό κύκλωμα εξισορρόπησης συνήθως αντλεί πολύ λιγότερο ρεύμα σε κατάσταση ισορροπίας και απαιτεί μεγαλύτερες τιμές ρεύματος μόνο όταν υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή τάσης σε ολόκληρη την σειρά υπερπυκνωτών.



Σχήμα 2-10. Κύκλωμα ενεργητικής εξισορρόπησης με MOSFET [7].

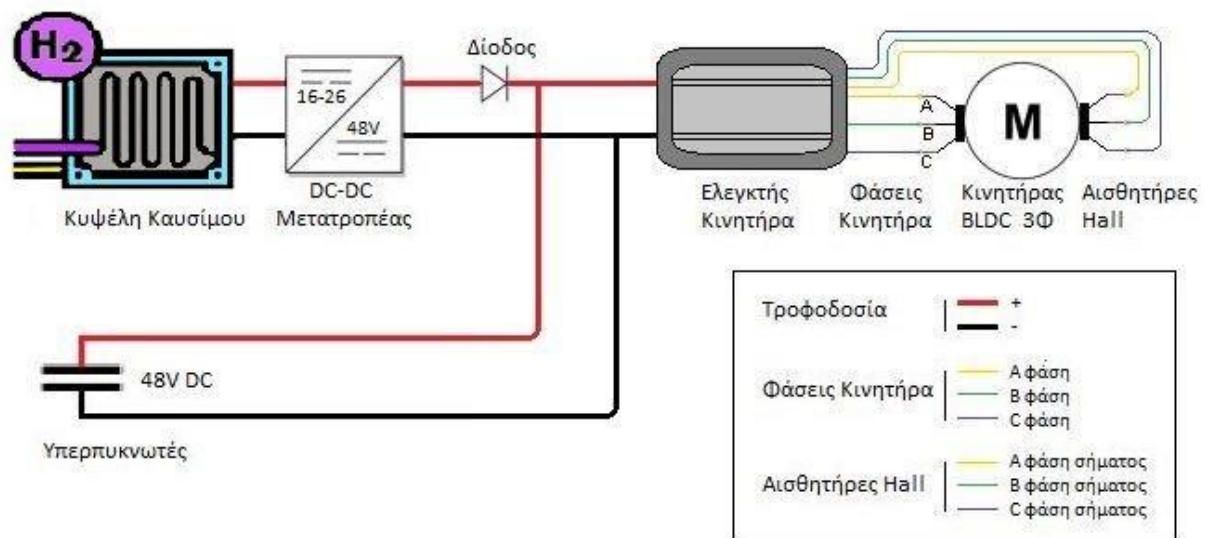
Το μειονέκτημα των κυκλωμάτων εξισορρόπησης είναι ότι είναι αναποτελεσματικά εάν υπάρχει υπερβολική διαφοροποίηση μεταξύ των κυψελών. Για να αποφεύγεται αυτό, απαιτείται από τους σχεδιαστές το ταίριασμα υπερπυκνωτών με παρόμοιες τιμές χωρητικότητας. Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα του Σχήματος 2-8 χρειάζεται ένας σχεδιαστής να ομαδοποιεί όλες τις κυψέλες με χωρητικότητα μεταξύ 100 και 110 F. Ομοίως, όλες οι κυψέλες με χωρητικότητα μεταξύ 120 και 130 F θα πρέπει να ταξινομούνται και να τοποθετούνται στην ίδια σειρά υπερπυκνωτών.

Μετά την ομαδοποίηση των υπερπυκνωτών, το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος κάθε υπερπυκνωτή για ρεύμα διαρροής. Οι κατασκευαστές συχνά δεν παρέχουν, ούτε εγγυώνται τιμές ρεύματος διαρροής, επομένως οι σχεδιαστές πρέπει να προσδιορίζουν αυτήν την παράμετρο πριν την τοποθέτηση ενός υπερπυκνωτή σε ένα κύκλωμα για εξισορρόπηση. Μια τυπική μέθοδος για τη μέτρηση του ρεύματος διαρροής είναι η τροφοδοσία του υπερπυκνωτή με μια μικρή αντίσταση, όπως 100 Ω στα 2.7 V επί 96 ώρες. Μόλις φορτιστεί πλήρως ο υπερπυκνωτής, τυχόν υπολειπόμενο ρεύμα που ανιχνεύεται είναι το ρεύμα διαρροής του [5].

3. Περιγραφή του Ηλεκτρικού Συστήματος του Οχήματος

3.1 Ηλεκτρικό Σύστημα

Το ηλεκτρικό σύστημα ενός οχήματος FCEV απεικονίζεται με μια κλειστή αγώγιμη διαδρομή μεταξύ όλων των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων του. Βασικός σκοπός του είναι η διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη τη διαδρομή, από την παραγωγή στην κυψέλη καυσίμου έως την αποθήκευση και μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας, ώστε να προσφέρει αξιόπιστη λειτουργία του οχήματος.



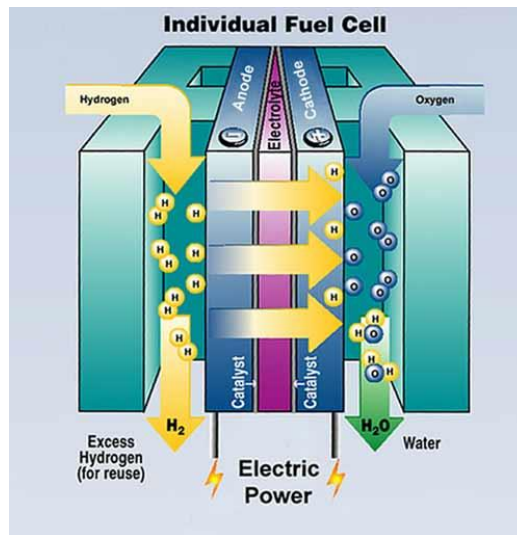
Σχήμα 3-1. Συνδεσμολογία ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος.

Το Σχήμα 3-1 παρουσιάζει το ηλεκτρικό σύστημα του οχήματος. Η κυψέλη καυσίμου, μετατρέπει το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτώντας, μέσω του μετατροπέα DC-DC και μιας διόδου, και το όχημα και τη συστοιχία υπερπυκνωτών. Ο μετατροπέας DC-DC ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση της κυψέλης καυσίμου, έτσι ώστε να τροφοδοτεί τον ελεγκτή κινητήρα με σταθερή τάση 48 V, ενώ η δίοδος ανακόπτει τα ανάστροφα ρεύματα προς την κυψέλη καυσίμου. Παράλληλα με τον μετατροπέα DC-DC είναι συνδεδεμένο το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η συστοιχία υπερπυκνωτών. Η συστοιχία αυτή, ενώ δεν είναι επαρκής για την πλήρη κάλυψη των αναγκών του οχήματος, μπορεί εντούτοις να εξισορροπεί την ενέργεια που παρέχεται από την κυψέλη καυσίμου (καταμερισμός φορτίου), ή ακόμα και να εξασφαλίζει την τροφοδότηση του φορτίου κατά την περίοδο της αιχμής (επιτάχυνση του οχήματος). Ο ελεγκτής κινητήρα τροφοδοτεί τον κινητήρα με ηλεκτρική τάση κατάλληλης συχνότητας ανάλογα με την ταχύτητα του οχήματος και φορτίζει τους υπερπυκνωτές με την παραγόμενη μέσω της πέδησης ηλεκτρική

ενέργεια. Τέλος, ο τριφασικός κινητήρας Brushless DC (BLDC), είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και μεγάλη διάρκεια ζωής, που εξασφαλίζει την αξιόπιστη και αποδοτική κίνηση του οχήματος.

3.2 Κυψέλη Καυσίμου

Οι ηλεκτροχημικές διατάξεις μέσα από τις οποίες παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από τη συνεχή μετατροπή της χημικής ενέργειας ενός καυσίμου με τη χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα, ονομάζονται κυψέλες καυσίμου. Το κυριότερο καύσιμό τους είναι το υδρογόνο (H_2). Πρέπει να επισημανθεί ότι μια τέτοια κυψέλη καυσίμου χαρακτηρίζεται από χαμηλές εκπομπές ρύπων και μεγάλη απόδοση.



Σχήμα 3-2. Κυψέλη καυσίμου H_2 [8].

Το Σχήμα 3-2 παρουσιάζει τα στοιχεία που αντιδρούν κατά τη μετατροπή της χημικής ενέργειας και τα παράγωγά τους, καθώς και την κίνηση των ιόντων μέσα στη κυψέλη.

Ανάμεσα στις γνωστές κυψέλες καυσίμου ευρύτερα γνωστή είναι αυτή με μεμβράνη ηλεκτρολύτη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM), η οποία βρίσκεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου της κυψέλης. Η άνοδος της κυψέλης (αρνητικό ηλεκτρόδιο) τροφοδοτείται με υδρογόνο το οποίο, όταν έρθει σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη, διασπάται σε ηλεκτρόνια και σε θετικά ιόντα υδρογόνου:



Τα ηλεκτρόνια κινούνται στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα και συναντούν την κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο), αφού η μεμβράνη της κυψέλης επιτρέπει μόνο τη διέλευση των θετικών ιόντων υδρογόνου. Τα θετικά ιόντα του υδρογόνου ενώνονται με το οξυγόνο του αέρα, που τροφοδοτεί την κάθοδο, και με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να παράγεται νερό:



Η ηλεκτρική τάση που παράγεται από τις παραπάνω αντιδράσεις είναι της τάξεως των 0.7 V. Γι' αυτόν το λόγο, είναι αναγκαία η σύνδεση ενός μεγάλου αριθμού κυψελών καυσίμου σε σειρά, ώστε να παράγονται μεγαλύτερες τάσεις.

Η Κυψέλη Καυσίμου που χρησιμοποιεί το όχημα της ομάδας TUCer είναι τεχνολογίας μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) της εταιρίας Ballard. Πρόκειται για το μοντέλο FCgen-1020ACS, με ισχύ 1.2 kW και συστοιχία 28 κελιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3. Κυψέλη Καυσίμου FCgen-1020ACS [9].

Είναι αερόψυκτη, δηλαδή ο αέρας που τροφοδοτεί την κάθοδό της, για να σχηματίσει νερό αντιδρώντας με τα ιόντα του υδρογόνου, παράλληλα ψύχει και την κυψέλη. Η κυψέλη καυσίμου FCgen-1020ACS έχει σχεδιαστεί για να εξαλείφει την ανάγκη για ύγρανση του οξυγόνου. Τα βασικά χαρακτηριστικά της εν λόγω κυψέλης καυσίμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1 [9].

Πίνακας 3-1. Χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου FCgen-1020ACS.

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Αριθμός κελιών	28
Συνολική ισχύς	1.2 kW
Ονομαστική τάση	683 mV/cell
Συνολική ονομαστική τάση	19.124 V
Εύρος τάσης	0.5 V/cell έως 1 V/cell
Ονομαστικό ρεύμα	65 A
Μέγιστο ρεύμα	75 A
Καύσιμο	H ₂ 99.95% καθαρότητα
Πίεση τροφοδοσίας καυσίμου	0.16 έως 0.56 bar
Ροή καυσίμου	0.559 slpm/cell
Οξειδωτικό/ψυκτικό	αέρας
Ροή ψυκτικού	50 slpm/cell
Θερμοκρασία λειτουργίας	– 40 έως 52 °C
Θερμοκρασία εκκίνησης	≥ – 10 έως 52 °C
Βάρος	11.0 kg

3.3 Μετατροπéας DC-DC

Ο μετατροπέας DC-DC (converter) αποτελεί ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό του ρεύματος από συνεχές σε συνεχές διαφορετικού πλάτους. Σε έναν μετατροπέα DC-DC ανύψωσης-υποβιβασμού (Buck-Boost converter) υπάρχει η δυνατότητα η ηλεκτρική τάση εξόδου να είναι είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη από την τάση εισόδου.

Ο μετατροπέας DC-DC ανύψωσης-υποβιβασμού που χρησιμοποιεί το όχημα για να σταθεροποιεί την τάση στην είσοδο του ελεγκτή κινητήρα είναι της εταιρίας Elecdan Converters και έχει τη δυνατότητα να επιτύχει ισχύ έως και 2.8 kW έχοντας σταθερά μια απόδοση 96%, για τάση εισόδου από 8 έως 60 V και εξόδου από 0 έως 60 V, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4 [10]. Έχει δυνατότητα λειτουργίας σε σταθερή τάση ή σταθερό ρεύμα και η είσοδός του δέχεται οποιαδήποτε πηγή DC τάσης, υπό την προϋπόθεση ότι παρέχει τάση μεταξύ 8 V και 60 V.



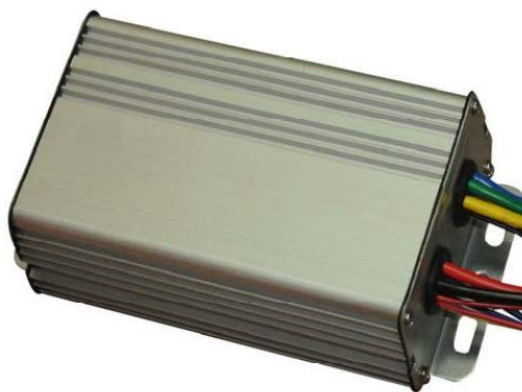
Σχήμα 3-4. Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης-υποβιβασμού [10].

Η είσοδος του μετατροπέα του συγκεκριμένου οχήματος μπορεί να δεχτεί τάσεις από 14 έως 28 V από την κυψέλη καυσίμου και ανυψώνει την ηλεκτρική τάση κρατώντας την σταθερή στην τιμή των 48 V στην έξοδό του, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η φόρτιση των υπερπυκνωτών και η τροφοδοσία του ελεγκτή κινητήρα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του μετατροπέα DC-DC εμφανίζει ο Πίνακας 3-2.

Πίνακας 3-2. Χαρακτηριστικά μετατροπέα DC-DC.	
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Τάση εισόδου	8 V έως 60 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	50 A
Τάση εξόδου	0 V έως 60 V
Μέγιστη ισχύς εισόδου	3 kW
Μέγιστη ισχύς εξόδου	2.88 kW
Συχνότητα μεταγωγής	275 kHz
Θερμοκρασία λειτουργίας	– 40 έως 85 °C
Βάρος	0.330 kg

3.4 Ελεγκτής κινητήρα

Ο ελεγκτής κινητήρα είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που ελέγχει τον κινητήρα BLDC με ανάδραση αισθητήρα Hall, δηλαδή ρυθμίζει την ταχύτητα του κινητήρα στέλνοντας εναλλασσόμενο ρεύμα κατάλληλης συχνότητας. Ο ελεγκτής κινητήρα του Σχήματος 3-5, έχει ως βασικά χαρακτηριστικά αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3.



Σχήμα 3-5. Ελεγκτής κινητήρα.

Πίνακας 3-3. Χαρακτηριστικά ελεγκτή κινητήρα.	
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Μέγιστη τάση	90 V
Εύρος τάσης εισόδου	36 V / 48 V / 60 V / 72 V
Όριο ρεύματος	28 A
Τάση διακοπής λειτουργίας	< 31.5 V
Βάρος	0.45 kg

3.5 Κινητήρας brushless DC (BLDC)

Ο κινητήρας BLDC ονομάζεται επίσης σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη DC που ως προς τη μοντελοποίηση παρουσιάζει ομοιότητες με ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες [11]. Είναι ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα μεταγωγής (εναλλαγής του μαγνητικού πεδίου στις περιελίξεις του στάτη). Ο συγκεκριμένος κινητήρας διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες, όπως αθόρυβη λειτουργία, καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, είναι καταλληλότερος για εφαρμογές στις οποίες υπάρχουν περιορισμοί στον χώρο και στο βάρος, λόγω της μεγαλύτερης παρεχόμενης ροπής σε σχέση με το μέγεθος του κινητήρα.

Για να περιστραφεί ο κινητήρας BLDC, οι περιελίξεις του στάτη πρέπει να ενεργοποιούνται με τη σειρά. Γι' αυτό είναι σημαντικό να είναι γνωστή η θέση του ρότορα, ώστε να γίνει αντιληπτό ποια περιέλιξη ενεργοποιείται. Η θέση του ρότορα ανιχνεύεται χρησιμοποιώντας αισθητήρες Hall που είναι ενσωματωμένοι στον στάτη.

Ο κινητήρας BLDC που χρησιμοποιεί το όχημα διαθέτει τρεις αισθητήρες Hall στο εσωτερικό του στάτη, και συγκεκριμένα στο μη-κινούμενο άκρο του κινητήρα. Κάθε φορά που οι μαγνητικοί πόλοι του ρότορα διέρχονται κοντά στους αισθητήρες Hall, αυτοί μεταδίδουν ένα σήμα, υψηλό ή χαμηλό, ανάλογα με τον πόλο (N ή S) που περνά. Έτσι, είναι εφικτό να προσδιορίζεται η ακριβής ακολουθία εναλλαγής με συνυπολογισμό αυτών των τριών σημάτων των αισθητήρων Hall.

Για τη διασφάλιση της ομαλής και αποδοτικής λειτουργίας του οχήματος, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει ο κινητήρας παρέχεται από την κυψέλη καυσίμου κυρίως και από τους υπερπυκνωτές σε περιόδους αιχμής. Οπότε, είναι απαραίτητο η ισχύς του κινητήρα να είναι μικρότερη από την ισχύ της κυψέλης καυσίμου. Από την αναγκαιότητα αυτής της συνθήκης και, εφόσον οι κινητήρες BLDC εμφανίζουν σαφή πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους κινητήρες DC με ψήκτρες, επιλέχθηκε τελικά ο κινητήρας BLDC της MAC Motor ισχύος 1 kW με τάση λειτουργίας 48 V (Σχήμα 3-6).



Σχήμα 3-6. Κινητήρας BLDC.

Οι αποδόσεις του συγκεκριμένου κινητήρα BLDC παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4.

Πίνακας 3-4. Απόδοση κινητήρα BLDC.

Α/Α	Τάση	Ρεύμα	Ισχύς εισόδου	Ροπή	Ταχύτητα	Ισχύς εξόδου	Απόδοση
	V	A	W	Nm	rpm	W	%
1	48.59	1.859	90.32	0.41	339.8	14.68	16.3
2	48.59	2.135	103.7	0.85	336.8	30.04	29
3	48.59	3.626	176.2	2.92	329.1	100.8	57.2
4	48.59	4.192	203.7	3.8	326.3	150	73.6
5	48.58	6.181	300.3	6.7	316.6	222	73.9
6	48.58	6.799	330.3	7.6	313.9	250	75.7
7	48.58	7.241	351.8	8.3	312	270	76.7
8	48.58	7.903	383.9	9.3	309.1	300	78.1
9	48.58	9.537	463.3	11.84	302	374	80.8
10	48.58	13.4	650.8	18.08	286.3	541.8	83.3
11	48.57	17.63	856.5	25.2	271.2	715.5	83.5
12	48.57	22.04	1070	32.71	257.9	883.3	82.5
13	48.56	25.51	1239	38.56	248.1	1000	80.7
14	48.56	26.58	1291	40.36	245.1	1036	80.2
15	48.55	31.54	1532	48.19	234	1181	77.1
16	48.55	35.65	1731	55.82	223.8	1308	75.6
17	48.55	40.56	1969	63.02	214.5	1415	71.9

3.6 Υπερπυκνωτές

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.1, οι υπερπυκνωτές είναι το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος.

3.6.1 Το προηγούμενο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές

Το προηγούμενο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος αποτελείται από δώδεκα υπερπυκνωτές BMOD0058 E016 C02 της εταιρίας Maxwell, που συνδέονται σε τέσσερις σειρές των τριών, έτσι ώστε να εξασφαλίζουν ηλεκτρική τάση εξόδου 48 V.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας BMOD0058 E016 C02 είναι κατασκευασμένο με έξι (6) στοιχεία ηλεκτροχημικών υπερπυκνωτών διπλής στρώσης (EDLC) σε σειρά. Τα στοιχεία είναι τοποθετημένα σε ηλεκτρονική πλακέτα με παθητική εξισορρόπηση και ολόκληρη η διάταξη συσκευάζεται σε ένα άκαμπτο πλαστικό περίβλημα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-7. Τα βασικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-5.



Σχήμα 3-7. Υπερπυκνωτές BMOD0058 E016 C02 της Maxwell.

Πίνακας 3-5. Χαρακτηριστικά του BMOD0058 E016 C02 της Maxwell.	
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Χωρητικότητα	58 F
Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)	22 mΩ
Μέγιστη ονομαστική τάση	16 V
Ρεύμα διαρροής	25 mA
Μέγιστο συνεχές ρεύμα	23 A
Μέγιστο ρεύμα αιχμής	190 A
Μέγιστη ενέργεια ανά cell	0.35 Wh
Συνολική ενέργεια	2.1 Wh
Βάρος	0.63 kg

Κάθε υπερπυκνωτής έχει ονομαστική τάση 2.7 V και χωρητικότητα 350 F. Η ισοδύναμη χωρητικότητα και αντίσταση σειράς για μια μονάδα BMOD0058 E016 C02 υπολογίζεται με τις παρακάτω σχέσεις:

- συνολική χωρητικότητα (C_R)

$$C_R = C_{CELL} \cdot \frac{\text{αριθμός παραλληλων γραμμών}}{\text{αριθμός υπερπυκνωτών σε σειρά}} \quad (3.3)$$

- ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)

$$ESR = ESR_{CELL} \cdot \frac{\text{αριθμός υπερπυκνωτών σε σειρά}}{\text{αριθμός παράλληλων γραμμών}} \quad (3.4)$$

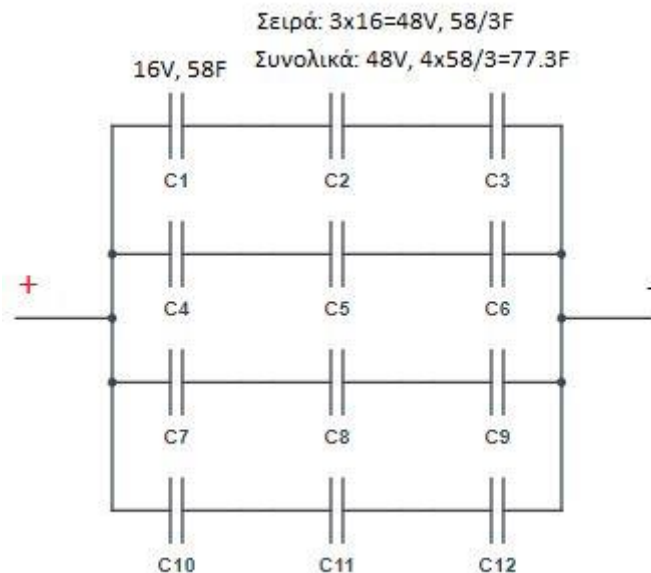
Αφού ο αριθμός παράλληλων γραμμών είναι ίσος με 1 και ο αριθμός υπερπυκνωτών είναι ίσος με 6, τότε η συνολική χωρητικότητα της μονάδας BMOD0058 E016 C02 είναι:

$$C_R = C_{CELL} \cdot \frac{1}{6} = 350 \cdot \frac{1}{6} = 58.3 \text{ F}$$

και η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)

$$ESR_R = ESR_{CELL} \cdot \frac{6}{1} = 3.66 \text{ m}\Omega \cdot 6 = 22 \text{ m}\Omega$$

Η συνδεσμολογία του προηγούμενου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3-8. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών.

Αφού ο αριθμός παράλληλων γραμμών είναι ίσος με 4 και ο αριθμός των μονάδων BMOD0058 είναι ίσος με 3, τότε ισχύει:

- συνολική χωρητικότητα του συστήματος

$$C = C_R \cdot \frac{4}{3} = 58 \cdot \frac{4}{3} = 77.3 \text{ F}$$

- ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)

$$ESR = ESR_R \cdot \frac{3}{4} = 22 \text{ m}\Omega \cdot \frac{3}{4} = 16.5 \text{ m}\Omega$$

- συνολική ηλεκτρική τάση των υπερπυκνωτών

$$V = V_R \cdot 3 = 16 \cdot 3 = 48 \text{ V}$$

- συνολικό ηλεκτρικό ρεύμα

$$I = I_R \cdot 4 = 23 \cdot 4 = 92 \text{ A}$$

$$I_{\text{αιχμής}} = I_{R_{\text{αιχμής}}} \cdot 4 = 190 \cdot 4 = 760 \text{ A}$$

- συνολική ενέργεια

$$E = E_R \cdot 12 = 2.1 \cdot 12 = 25.2 \text{ Wh}$$

Τα συνολικά χαρακτηριστικά του προηγούμενου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται στον Πίνακα 3-6.

Πίνακας 3-6. Χαρακτηριστικά μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.	
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Χωρητικότητα	77.3 F
Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)	16.5 mΩ
Μέγιστη ονομαστική τάση	48 V
Μέγιστο συνεχές ρεύμα	92 A
Μέγιστο ρεύμα αιχμής	760 A
Συνολική ενέργεια	25.2 Wh
Βάρος	7.56 kg

3.6.2 Το νέο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές

Το νέο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος αποτελείται από εβδομήντα δύο υπερπυκνωτές BCAP0450 P270 S18 της εταιρίας Maxwell, που συνδέονται ανά έξι σχηματίζοντας τέσσερις σειρές των 3 εξάδων, έτσι ώστε να εξασφαλίζουν ηλεκτρική τάση εξόδου 48.6 V.

Το στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας BCAP0450 P270 S18 είναι ένας ισχυρός υπερπυκνωτής, τεχνολογίας διπλής στρώσης (EDLC), σε κυλινδρικό κουτί με ακροδέκτες τύπου snap-in και παρέχει ενέργεια σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς (Σχήμα 3-9). Τα βασικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-7.



Σχήμα 3-9. Υπερπυκνωτής, BCAP0450 P270 S18 της Maxwell.

Πίνακας 3-7. Χαρακτηριστικά του BCAP0450 P270 S18 της Maxwell.	
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Χωρητικότητα	450 F
Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)	2.8 mΩ
Μέγιστη ονομαστική τάση	2.7 V
Ρεύμα διαρροής	1.0 mA
Μέγιστο συνεχές ρεύμα	46 A
Μέγιστο ρεύμα αιχμής	240 A
Μέγιστη ενέργεια ανά cell	0.45 Wh
Βάρος	0.075 kg

Κάθε υπερπυκνωτής έχει ονομαστική τάση 2.7 V και χωρητικότητα 450 F. Η ισοδύναμη χωρητικότητα και αντίσταση σειράς για μια μονάδα BCAP0450 P270 S18 υπολογίζεται με τις σχέσεις (3.3) και (3.4).

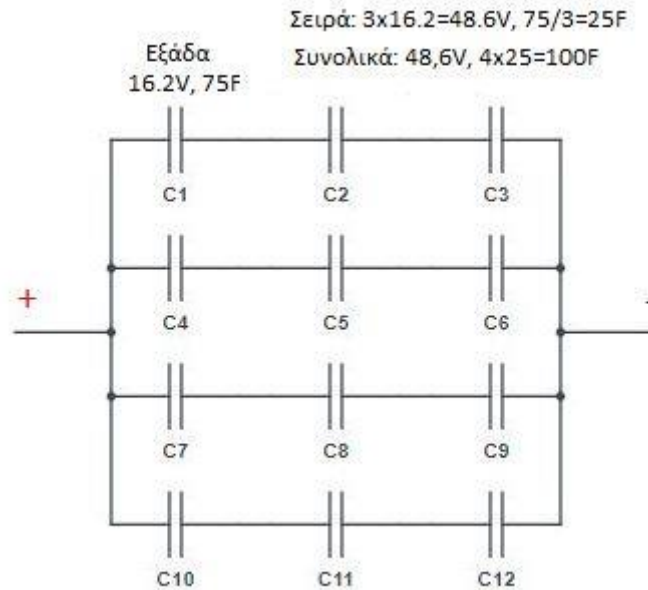
Για μια εξάδα, αφού ο αριθμός παράλληλων γραμμών είναι ίσος με 1 και ο αριθμός υπερπυκνωτών είναι ίσος με 6, τότε η συνολική χωρητικότητα της μονάδας BCAP0450 P270 S18 είναι:

$$C_R = C_{CELL} \cdot \frac{1}{6} = 450 \cdot \frac{1}{6} = 75 \text{ F}$$

και η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)

$$ESR_R = ESR_{CELL} \cdot \frac{6}{1} = 2.8 \text{ m}\Omega \cdot 6 = 16.8 \text{ m}\Omega$$

Η συνδεσμολογία εξάδων υπερπυκνωτών του νέου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-10.



Σχήμα 3-10. Συνδεσμολογία υπερπυκνωτών ανά εξάδες.

Αφού ο αριθμός παράλληλων γραμμών είναι ίσος με 4 και ο αριθμός των μονάδων BCAP0450 P270 S1 είναι ίσος με 3 εξάδες, τότε ισχύει:

- συνολική χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας

$$C = C_R \cdot \frac{4}{3} = 75 \cdot \frac{4}{3} = 100 \text{ F}$$

- ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)

$$ESR = ESR_R \cdot \frac{3}{4} = 16.8 \text{ m}\Omega \cdot \frac{3}{4} = 12.6 \text{ m}\Omega$$

- συνολική ηλεκτρική τάση των υπερπυκνωτών

$$V = V_R \cdot 3 = 16.2 \cdot 3 = 48.6 \text{ V}$$

- συνολικό ηλεκτρικό ρεύμα

$$I = I_R \cdot 4 = 46 \cdot 4 = 184 \text{ A}$$

$$I_{\text{αιχμής}} = I_{R_αιχμής} \cdot 4 = 240 \cdot 4 = 960 \text{ A}$$

- συνολική ενέργεια

$$E = E_R \cdot 72 = 0.45 \cdot 72 = 32.4 \text{ Wh}$$

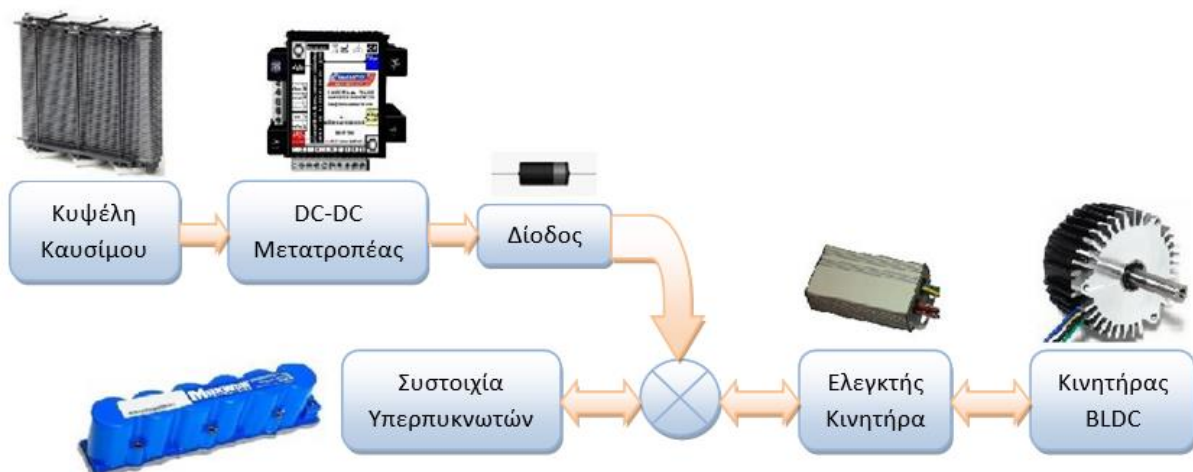
Τα συνολικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-8.

Πίνακας 3-8. Χαρακτηριστικά μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.	
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Χωρητικότητα	100 F
Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)	12.6 mΩ
Μέγιστη ονομαστική τάση	48.6 V
Μέγιστο συνεχές ρεύμα	184 A
Μέγιστο ρεύμα αιχμής	960 A
Συνολική ενέργεια	32.4 Wh
Βάρος	5.4 kg

4. Προσομοίωση του Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας με Υπερπυκνωτές σε Περιβάλλον Simulink

4.1 Λειτουργικό διάγραμμα

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές είναι ένα από τα ηλεκτρικά στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος. Στην παρούσα εργασία μοντελοποιείται, μελετάται και προσομοιώνεται με το Simulink της MathWorks, πάντα σε συνδυασμό με το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα, με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης χωρητικότητας και συνδεσμολογίας της συστοιχίας των υπερπυκνωτών.

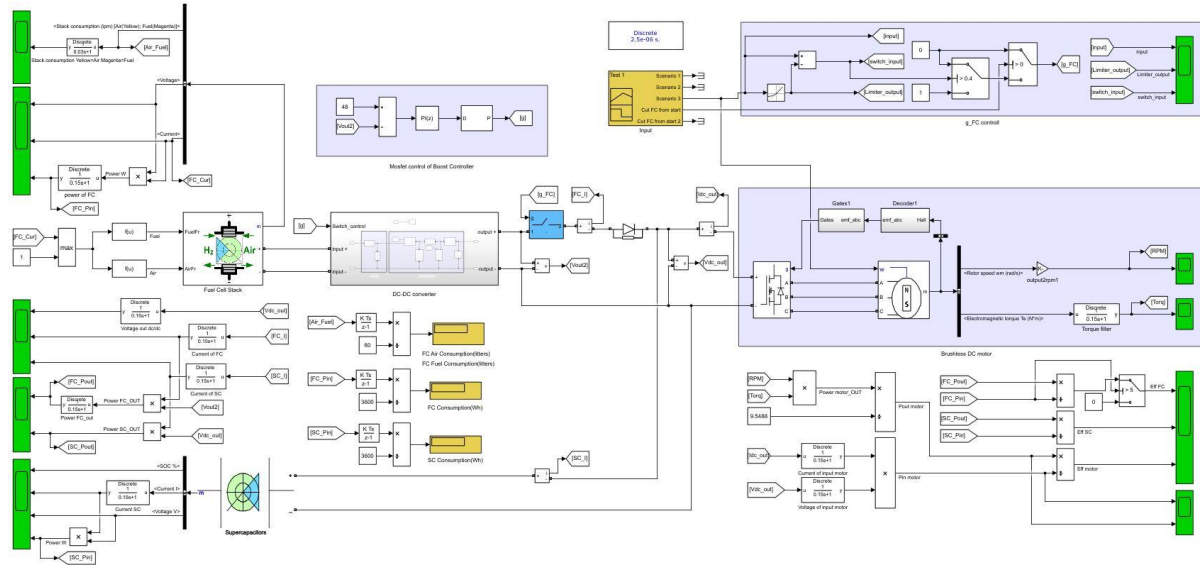


Σχήμα 4-1. Λειτουργικό διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος.

Το Σχήμα 4-1 παρουσιάζει το ηλεκτρικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Τα έξι ηλεκτρικά στοιχεία του είναι η κυψέλη καυσίμου, που είναι η βασική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο όχημα, ο μετατροπέας DC-DC, που ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου στην κατάλληλη τιμή, η δίοδος για τη διακοπή των ανάστροφων ρευμάτων προς την κυψέλη, η συστοιχία υπερπυκνωτών, που αποθηκεύει την ενέργεια, ο ελεγκτής, που οδηγεί τον κινητήρα, και ο κινητήρας που δίνει κίνηση στο όχημα.

4.2 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού συστήματος με Matlab/Simulink

Το Σχήμα 4-2 παρουσιάζει το ηλεκτρικό σύστημα, όπως αυτό μοντελοποιείται με το λογισμικό πακέτο Simulink. Η μοντελοποίηση του καθενός από τα έξι ηλεκτρικά στοιχεία αναλύεται διεξοδικά παρακάτω.

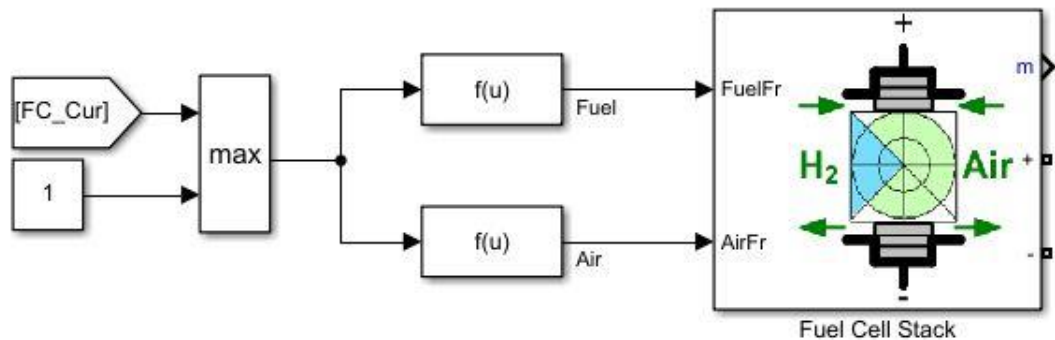


Σχήμα 4-2. Μοντελοποίηση ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος σε Matlab/Simulink.

4.2.1 Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Stack)

Γενικό μοντέλο κυψέλης καυσίμου

Η μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-3 βασίστηκε στο λεπτομερές μοντέλο που παρουσιάζει το Σχήμα 4-4 [12].



Σχήμα 4-3. Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου.

Στο μπλοκ Α (Σχήμα 4-4) ο ρυθμός μετατροπής (χρησιμοποίησης) του υδρογόνου ($U_{f_{H_2}}$) και αντιστοίχως του οξυγόνου ($U_{f_{O_2}}$) υπολογίζονται με τις παρακάτω σχέσεις [12]:

$$U_{f_{H_2}} = \frac{60000 \cdot N \cdot R \cdot T \cdot i_{fc}}{F \cdot z \cdot P_{fuel} \cdot V_{lpm(fuel)} \cdot x\%} \quad (4.1)$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{2 \cdot z \cdot F \cdot P_{air} \cdot V_{lpm(air)} \cdot y\%} \quad (4.2)$$

όπου:

i_{fc} = Στιγμαία τιμή ρεύματος

z = Αριθμός κινούμενων ηλεκτρονίων (είναι ο αριθμός ηλεκτρονίων που ελευθερώνονται κατά την διάσπαση ενός μορίου υδρογόνου)

T = Θερμοκρασία λειτουργίας (K)

$R = 8.3145$ (J/(molK))

$F = 96485$ (As/mol)

P_{fuel} = Απόλυτη πίεση τροφοδοσίας καυσίμου (atm)

P_{air} = Απόλυτη πίεση παροχής αέρα (atm)

$V_{lpm(fuel)}$ = Ρυθμός ροής καυσίμου (l/min)

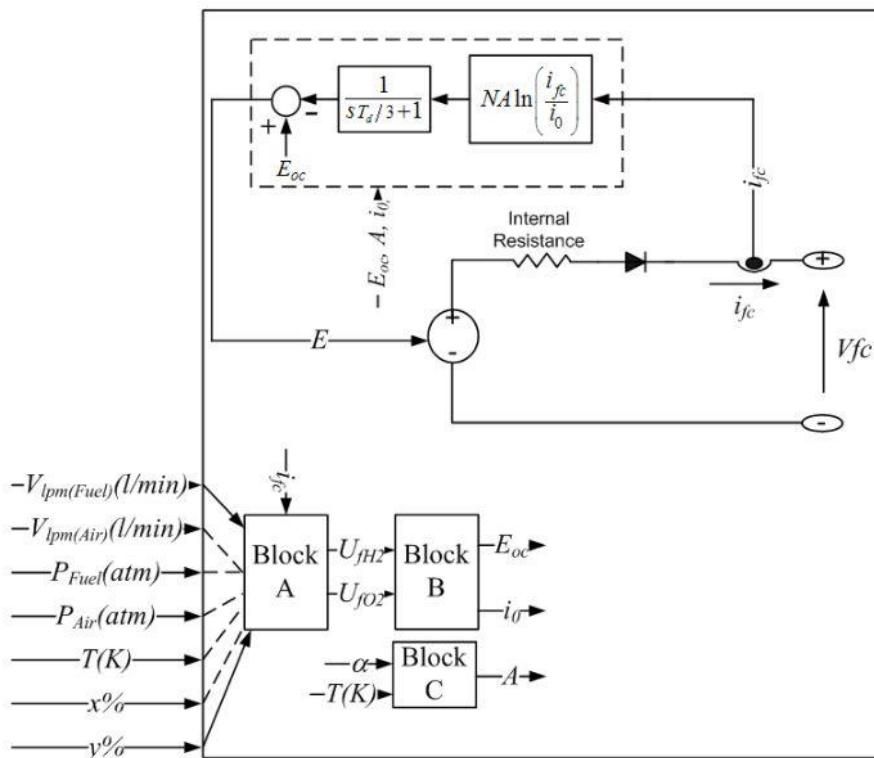
$V_{lpm(air)}$ = Ρυθμός ροής αέρα (l/min)

x = Ποσοστό υδρογόνου στο καύσιμο (%)

y = Ποσοστό οξυγόνου στον αέρα (%)

N = Αριθμός κελιών

Η σταθερή τιμή 60000 προκύπτει από τη μετατροπή του μεγέθους του ρυθμού ροής από liter/min σε m^3/s [1 (liter/min) = $1/60000$ (m^3/s)].



Σχήμα 4-4. Λεπτομερές μοντέλο Fuel Cell Stack [12].

Οι ονομαστικοί ρυθμοί μετατροπής των αερίων υπολογίζονται ως εξής [12]:

$$U_{fH_2} = \frac{n_{nom} \cdot \Delta h^0(H_2O(gas)) \cdot N}{z \cdot F \cdot V_{nom}} \quad (4.3)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T_{nom} \cdot N \cdot I_{nom}}{2 \cdot z \cdot F \cdot P_{air_{nom}} \cdot V_{lpm(air)_{nom}} \cdot y\%} \quad (4.4)$$

όπου:

n_{nom} = Ονομαστική απόδοση low heating value (LHV) της κυψέλης καυσίμου (%)

$\Delta h^0(H_2O(gas)) = 241.83 \times 10^3$ (J/mol)

V_{nom} = Ονομαστική τάση (V)

I_{nom} = Ονομαστικό ρεύμα (A)

$V_{lpm(air)_{nom}}$ = Ονομαστικός ρυθμός ροής αέρα (l/min)

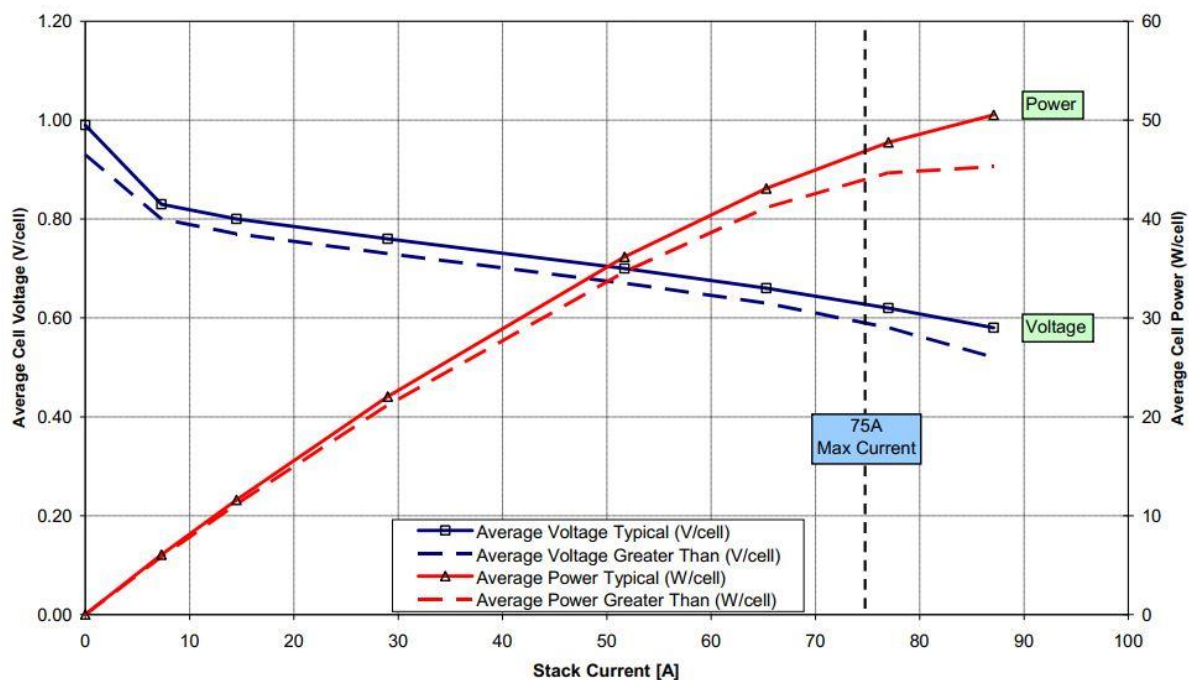
$P_{air_{nom}}$ = Ονομαστική απόλυτη πίεση παροχής αέρα (Pa)

T_{nom} = Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας (K)

Η ονομαστική απόδοση LHV της κυψέλης καυσίμου (%) υπολογίζεται ως εξής [12]:

$$n_{nom} = \frac{z \cdot F \cdot V_{nom}}{\Delta h^0(H_2O(gas)) \cdot N} \quad (4.5)$$

Οι τιμές των παραμέτρων της μοντελοποίησης υπολογίζονται συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου FCgen-1020ACS που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1 με τη καμπύλη τάσης ρεύματος της κυψέλης καυσίμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5. Καμπύλη τάσης ρεύματος της κυψέλης καυσίμου FCgen-1020ACS.

Παράμετροι μοντελοποίησης της κυψέλης καυσίμου

Η ονομαστική ισχύς της κυψέλης καυσίμου 28 κελιών είναι 1.2 kW, το ονομαστικό ρεύμα 65 A, το μέγιστο ρεύμα 75 A και η ονομαστική τάση 19.124 V.

Οι υπόλοιπες παράμετροι που εμφανίζονται στο Σχήμα 4-6 υπολογίζονται ως εξής [12]:

- η ηλεκτρική τάση σε 0 A και 1 A υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης-ρεύματος, οπότε $V_{0} = 0.99 \cdot 28 = 27.72 \text{ V}$ και $V_{1} = 0.96 \cdot 28 = 26.88 \text{ V}$ [$V_0(\text{V})$, $V_1(\text{V})$] = [27.72, 26.88].
- το ονομαστικό σημείο λειτουργίας: [$I_{\text{nom}}(\text{A})$, $V_{\text{nom}}(\text{V})$] = [65, 19.124].
- το μέγιστο σημείο λειτουργίας: για $I_{\text{end}} = 75 \text{ A}$ υπολογίζουμε την ηλεκτρική τάση από την καμπύλη τάσης-ρεύματος (Σχήμα 4-5) οπότε $V_{\text{end}} = 0.667 \cdot 28 = 18.66 \text{ V}$.
- η ονομαστική απόδοση LHV της κυψέλης καυσίμου, υπολογίζεται από τον τύπο (4.5):

$$n_{\text{nom}} = \frac{z \cdot F \cdot V_{\text{nom}}}{\Delta h^0(\text{H}_2\text{O}(\text{gas})) \cdot N} = \frac{2 \cdot 96485 \cdot 19.124}{241.83 \cdot 10^3 \cdot 28} \approx 0.54 \text{ ή } 54\%$$

- ο ονομαστικός ρυθμός ροής αέρα: $V_{\text{ipm}(\text{air})_{\text{nom}}} = 28 * 50 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 1400 \frac{\text{l}}{\text{min}}$
- η απόλυτη πίεση του καυσίμου υπολογίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα της ατμοσφαιρικής πίεσης (1 bar) και της πίεσης τροφοδοσίας καυσίμου όπως μετρήθηκε με το μανόμετρο (0.16 έως 0.56 bar): [Fuel (bar), Air (bar)] = [1.56, 1].
- η ονομαστική σύνθεση (%) του O_2 και του H_2O στον αέρα καθορίζεται από την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου στο Simulink ως 21% για το O_2 και 1% για το H_2O στον αέρα ($[\text{H}_2 \text{ O}_2 \text{ H}_2\text{O}(\text{Air})] = [99.95, 21, 1]$) [12].

Σχήμα 4-6. Παράμετροι μοντελοποίησης της κυψέλης καυσίμου.

Μοντελοποίηση του ρυθμού ροής καυσίμου και αέρα στην είσοδο του Fuel Cell

Η μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής καυσίμου $V_{lpm(fuel)}$ (l/min) στην πρώτη από τις δυο εισόδους της κυψέλης καυσίμου προσδιορίζεται με βάση την σχέση (4.1) ως εξής:

$$V_{lpm(fuel)} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{z \cdot F \cdot P_{fuel} \cdot U_{fH_2} \cdot x\%} \quad (4.6)$$

Στον τύπο (4.6) είναι άγνωστη η απόλυτη πίεση τροφοδοσίας καυσίμου P_{fuel} (atm) και ο ρυθμός μετατροπής (χρησιμοποίησης) του υδρογόνου U_{fH_2} , οπότε υπολογίζονται με την ακόλουθη διαδικασία. Ο ρυθμός μετατροπής (χρησιμοποίησης) του υδρογόνου U_{fH_2} από τον τύπο (4.3):

$$U_{fH_2} = \frac{n_{nom} \cdot \Delta h^0(H_2O(gas)) \cdot N}{z \cdot F \cdot V_{nom}} = \frac{0.54 \cdot 241.83 \cdot 10^3 \cdot 28}{2 \cdot 96485 \cdot 19.124} = 0.9908$$

Η απόλυτη πίεση τροφοδοσίας καυσίμου P_{fuel} (atm) υπολογίζεται από τον τύπο (4.1), θέτοντας στη θέση του i_{fc} το ονομαστικό ρεύμα και στη θέση $V_{lpm(fuel)}$ το $V_{lpm(fuel)_{nom}} = 0.5 \cdot 28 = 14 \frac{l}{min}$ (0.5 slpm/cell στα 65 A):

$$\begin{aligned} P_{fuel} &= \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot I_{nom}}{z \cdot F \cdot U_{fH_2} \cdot V_{lpm(fuel)_{nom}} \cdot x\%} = \\ &= \frac{60000 \cdot 8.3145 \cdot (273 + 52) \cdot 28 \cdot 65}{2 \cdot 96485 \cdot 0.9908 \cdot 101325 \cdot 14 \cdot 0.9995} = 1.088 \end{aligned}$$

όπου η τιμή 101325 προκύπτει από τη μετατροπή της πίεσης από atm σε pascals.

Έτσι, η μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής καυσίμου $V_{lpm(fuel)}$ (l/min) που τίθεται στην πρώτη είσοδο της κυψέλης φαίνεται στο Σχήμα 4-7.

Parameters
Expression:
$60000 \cdot 8.3145 \cdot (273 + 52) \cdot 28 \cdot u(1) / (2 \cdot 96485 \cdot (1.088 \cdot 101325) \cdot 0.9908 \cdot 0.9995)$

Σχήμα 4-7. Μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής καυσίμου στην πρώτη είσοδο της κυψέλης.

Η μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής αέρα $V_{lpm(air)}$ (l/min) στη δεύτερη από τις εισόδους της κυψέλης προσδιορίζεται με βάση την σχέση (4.2) ως εξής:

$$V_{lpm(air)} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{2 \cdot z \cdot F \cdot P_{air} \cdot U_{fO_2} \cdot \gamma\%} \quad (4.7)$$

Στον τύπο (4.7) δεν είναι γνωστή η απόλυτη πίεση τροφοδοσίας αέρα P_{air} (atm) και ο ρυθμός μετατροπής (χρησιμοποίησης) του οξυγόνου U_{fO_2} , οπότε υπολογίζονται με την παρακάτω διαδικασία. Ως ρυθμός μετατροπής (χρησιμοποίησης) του οξυγόνου U_{fO_2} καθορίζεται από την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου στο Simulink ο ρυθμός 50% (όπως συμβαίνει συνήθως στις περισσότερες κυψέλες καυσίμου) [12].

Η απόλυτη πίεση τροφοδοσίας αέρα P_{air} (atm) εξάγεται από τον τύπο (4.4):

$$P_{air} = \frac{60000 \cdot R \cdot T_{nom} \cdot N \cdot I_{nom}}{2 \cdot z \cdot F \cdot U_{fO_2} \cdot V_{lpm(air)_{nom}} \cdot 0.21} =$$

$$= \frac{60000 \cdot 8.3145 \cdot (273 + 52) \cdot 28 \cdot 65}{2 \cdot 2 \cdot 96485 \cdot 0.5 \cdot 101325 \cdot 1400 \cdot 0.21} = 0.05133$$

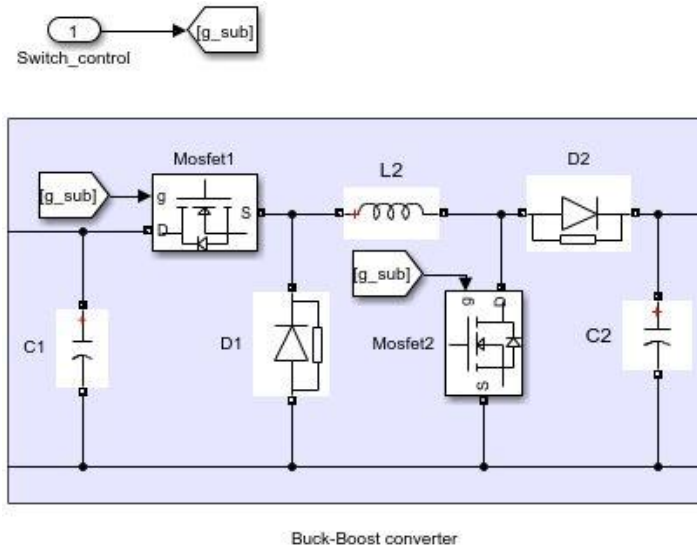
Έτσι, η μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής αέρα $V_{lpm(air)}$ (l/min) που τίθεται στη δεύτερη είσοδο της κυψέλης φαίνεται στο Σχήμα 4-8.

Parameters
Expression:
$60000 \cdot 8.3145 \cdot (273 + 52) \cdot 28 \cdot u(1) / (4 \cdot 96485 \cdot (0.05133 \cdot 101325) \cdot 0.5 \cdot 0.21)$

Σχήμα 4-8. Μαθηματική σχέση του ρυθμού ροής αέρα στη δεύτερη είσοδο της κυψέλης.

4.2.2 Μοντελοποίηση DC-DC μετατροπέα

Το Σχήμα 4-9 απεικονίζει τη μοντελοποίηση του μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης (Buck-Boost converter).



Σχήμα 4-9. Μοντελοποίηση μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης (Buck-Boost converter).

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία του μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-9. Παράγει μια τάση εξόδου που είναι της ίδιας πολικότητας με την τάση εισόδου. Στη λειτουργία Buck-Boost, κατά τη διάρκεια του κύκλου ενεργοποίησης τα MOSFET είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένα και οι δύο διόδους ταυτόχρονα απενεργοποιημένες ενώ κατά τη διάρκεια του κύκλου απενεργοποίησης συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.

Επειδή η συχνότητα μεταγωγής του μετατροπέα του οχήματος είναι πολύ υψηλή ($f_s = 275\text{kHz}$), για την προσομοίωση χρησιμοποιείται συχνότητα $f_s = 40\text{ kHz}$ ώστε να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση της προσομοίωσης από το Simulink.

Για τη μοντελοποίηση του μετατροπέα χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες παράμετροι του Simulink με ελάχιστες τροποποιήσεις [13] για τα MOSFET και τις διόδους, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-10.

MOSFET	DIODE
Parameters	Parameters
FET resistance Ron (Ohms) :	Resistance Ron (Ohms) :
<input type="text" value="1e-3"/>	<input type="text" value="0.001"/>
Internal diode inductance Lon (H) :	Inductance Lon (H) :
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Internal diode resistance Rd (Ohms) :	Forward voltage Vf (V) :
<input type="text" value="1e-3"/>	<input type="text" value="0.525"/>
Internal diode forward voltage Vf (V) :	Initial current Ic (A) :
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Initial current Ic (A) :	Snubber resistance Rs (Ohms) :
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="500"/>
Snubber resistance Rs (Ohms) :	Snubber capacitance Cs (F) :
<input type="text" value="1e6"/>	<input type="text" value="inf"/>
Snubber capacitance Cs (F) :	
<input type="text" value="inf"/>	

Σχήμα 4-10. Παράμετροι μοντελοποίησης για τα MOSFET και τις διόδους.

Υπολογισμός πηνίου και πυκνωτή του μετατροπέα DC-DC

Για τον υπολογισμό του πηνίου και του πυκνωτή λαμβάνονται υπόψη [13]:

$V_{out} = 48 \text{ V}$, τάση εξόδου

$V_D = 0.525 \text{ V}$, τάση διόδου

$V_{in} = 18.66 \text{ V}$, ελάχιστη τάση εισόδου, δηλαδή η τάση του FC για ρεύμα 75 A

$\bar{I}_{out} = 12.92 \text{ A}$, μέσο ρεύμα εξόδου, δηλαδή η μέση τιμή των ρευμάτων εισόδου στον κινητήρα από τον Πίνακα 3-4 για ισχύς εξόδου από 222 W έως 1000 W.

$f_s = 40 \text{ kHz}$, συχνότητα μεταγωγής

Υπολογισμοί:

- κύκλος λειτουργίας (duty cycle)

$$D = \frac{V_{out} + V_D}{V_{out} + V_{in} + V_D} = \frac{48 + 0.525}{48 + 18.66 + 0.525} = 0.722$$

- μέσο ρεύμα πηνίου

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{I}_{out}}{1 - D} = \frac{12.92}{1 - 0.722} = 46.47 \text{ A}$$

- διακύμανση ρεύματος πηνίου

$$\Delta I_L = 0.3 \cdot \bar{I}_L = 0.3 \cdot 46.47 = 13.94 \text{ A}$$

- ελάχιστη τιμή αυτεπαγωγής του πηνίου του μετατροπέα DC-DC

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_L} = \frac{18.66 \cdot 0.722}{40000 \cdot 13.94} = 24.2 \mu\text{H}$$

Επειδή αυτή είναι η ελάχιστη τιμή για το πηνίο του μετατροπέα DC-DC, τελικά επιλέγεται τιμή αυτεπαγωγής 30 μH (Σχήμα 4-11)

- χωρητικότητα του πυκνωτή του μετατροπέα DC-DC

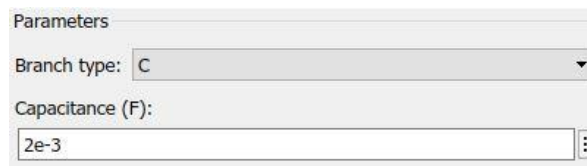
$$C = \frac{\bar{I}_{out} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{out}} = \frac{12.92 \cdot 0.722}{40000 \cdot 0.2} = 1.17 \text{ mF}$$

λαμβάνοντας υπόψη $\Delta V_{out} = 0.2 \text{ V}$ ως διακύμανση της τάσης εξόδου. Τελικά επιλέγεται τιμή χωρητικότητας 2 mF (Σχήμα 4-12).



Σχήμα 4-11. Τιμή αυτεπαγωγής πηνίου του μετατροπέα DC-DC.

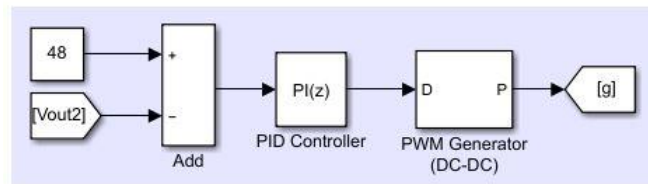
..



Σχήμα 4-12. Τιμή χωρητικότητας πυκνωτή του μετατροπέα DC-DC.

Μοντελοποίηση ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης

Για τη μοντελοποίηση του κυκλώματος ελέγχου των MOSFET και προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή σταθερή ηλεκτρική τάση 48 V στην έξοδο του μετατροπέα DC-DC, χρησιμοποιείται στην αρχή το μπλοκ Sum, έπειτα ένας ελεγκτής PI και στο τέλος μια γεννήτρια PWM, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-13.



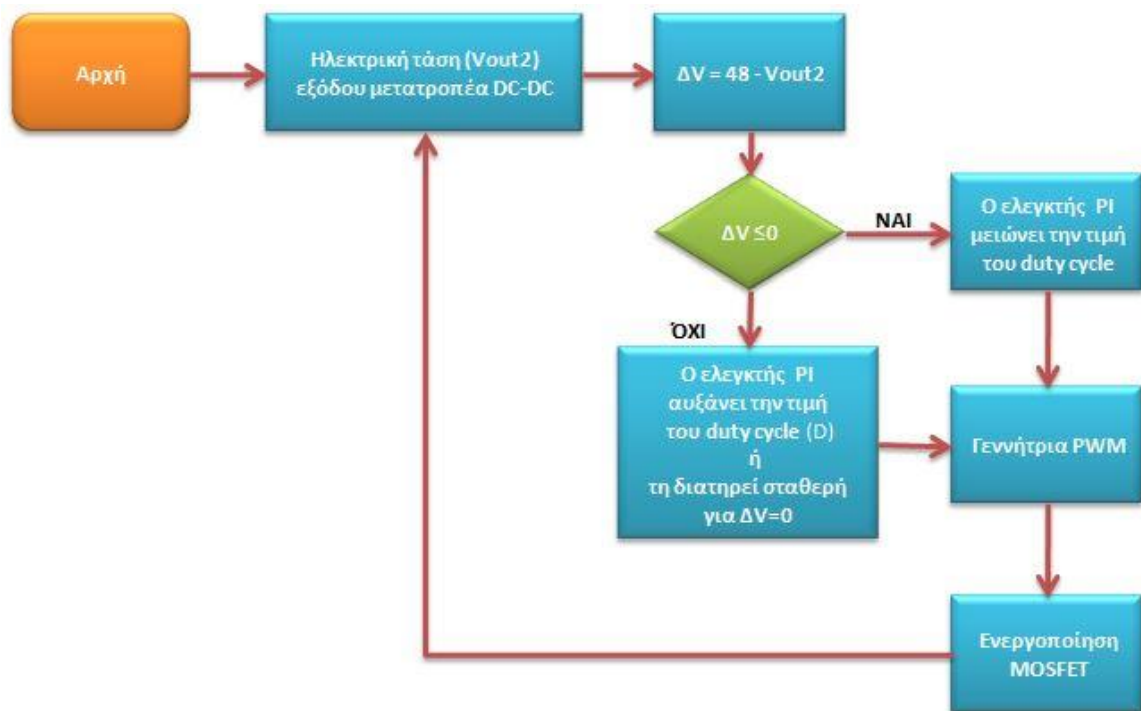
Σχήμα 4-13. Ελεγκτής MOSFET του μετατροπέα DC-DC.

Το μπλοκ Sum εκτελεί αφαίρεση της ηλεκτρικής τάσης εξόδου του μετατροπέα DC-DC από μια σταθερή επιθυμητή τιμή τάσης. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης γίνεται η είσοδος του ελεγκτή PI, στον οποίο ρυθμίζεται τόσο ο χρόνος δειγματοληψίας όσο και το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος με χρήση της μεθόδου Ziegler–Nichols (Σχήμα 4-14). Τέλος, το σήμα (duty cycle) από την έξοδο του ελεγκτή PI γίνεται η είσοδος στη γεννήτρια PWM, η οποία εξάγει έναν παλμό για την ενεργοποίηση του διακόπτη MOSFET και στην οποία ρυθμίζεται τόσο ο χρόνος δειγματοληψίας όσο και η συχνότητα μεταγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15.

Σχήμα 4-14. Ρύθμιση ελεγκτή PI.

Σχήμα 4-15. Παράμετροι γεννήτριας PWM.

Το διάγραμμα ροής που εμφανίζεται στο Σχήμα 4-16 εξηγεί τη λειτουργία του ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης.



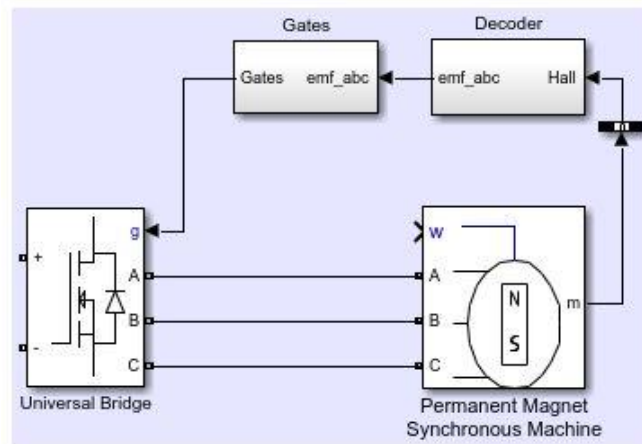
Σχήμα 4-16. Διάγραμμα ροής ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα DC-DC.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-16, η τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC αφαιρείται από μια σταθερή επιθυμητή τιμή τάσης (τάση λειτουργίας του ελεγκτή κινητήρα). Αν η διαφορά τους είναι αρνητική, δηλαδή η τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή τάση, τότε ο ελεγκτής PI δίνει τιμή (duty cycle) μικρότερη από την προηγούμενη του. Η τιμή αυτή πηγαίνει στη γεννήτρια PWM που ενεργοποιεί κατάλληλα τα MOSFET, ώστε να πάρουμε τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC μικρότερη από την προηγούμενη τιμή του. Αν η διαφορά τους είναι θετική, δηλαδή η τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC είναι μικρότερη από την επιθυμητή τάση, τότε ο ελεγκτής PI δίνει τιμή (duty cycle) μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή του και με την ίδια διαδικασία παίρνουμε τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC μεγαλύτερη από την προηγούμενη. Τέλος, αν η διαφορά τους είναι μηδέν, δηλαδή η τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC είναι ίση με την επιθυμητή τάση, τότε ο ελεγκτής PI δίνει τιμή (duty cycle) ίδια με την προηγούμενη τιμή του και αντιστοίχως παίρνουμε τιμή τάσης εξόδου του μετατροπέα DC-DC ίδια με την προηγούμενη.

4.2.3 Μοντελοποίηση ελεγκτή κινητήρα και κινητήρα BLDC

Ο κινητήρας BLDC μοντελοποιείται ως σύγχρονος τριφασικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Machine, PMSM) χωρίς ψήκτρες, που τροφοδοτείται από έναν μετατροπέα τάσης DC/AC (αντιστροφέας, inverter) έξι βημάτων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-17. Τα σήματα των πυλών του παράγονται με την

αποκωδικοποίηση των σημάτων Hall του κινητήρα. Η τριφασική έξοδος του μετατροπέα εφαρμόζεται στις περιελίξεις του στάτη του μπλοκ PMSM [14].



Σχήμα 4-17. Μοντελοποίηση κινητήρα BLDC.

Παράμετροι μοντελοποίησης του κινητήρα BLDC

Τριφασικός αντιστροφέας MOSFET

Το μπλοκ Universal Bridge υλοποιεί έναν αντιστροφέα ισχύος τριών φάσεων που αποτελείται από έξι διακόπτες ισχύος MOSFET συνδεδεμένους σε τοπολογία γέφυρας. Οι παράμετροι λειτουργίας φαίνονται στο Σχήμα 4-18.

Parameters	
Number of bridge arms:	3
Snubber resistance Rs (Ohms)	5000
Snubber capacitance Cs (F)	1e-6
Power Electronic device	MOSFET / Diodes
Ron (Ohms)	1e-3
Measurements	None

Σχήμα 4-18. Παράμετροι λειτουργίας του τριφασικού αντιστροφέα.

Σύγχρονος τριφασικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM)

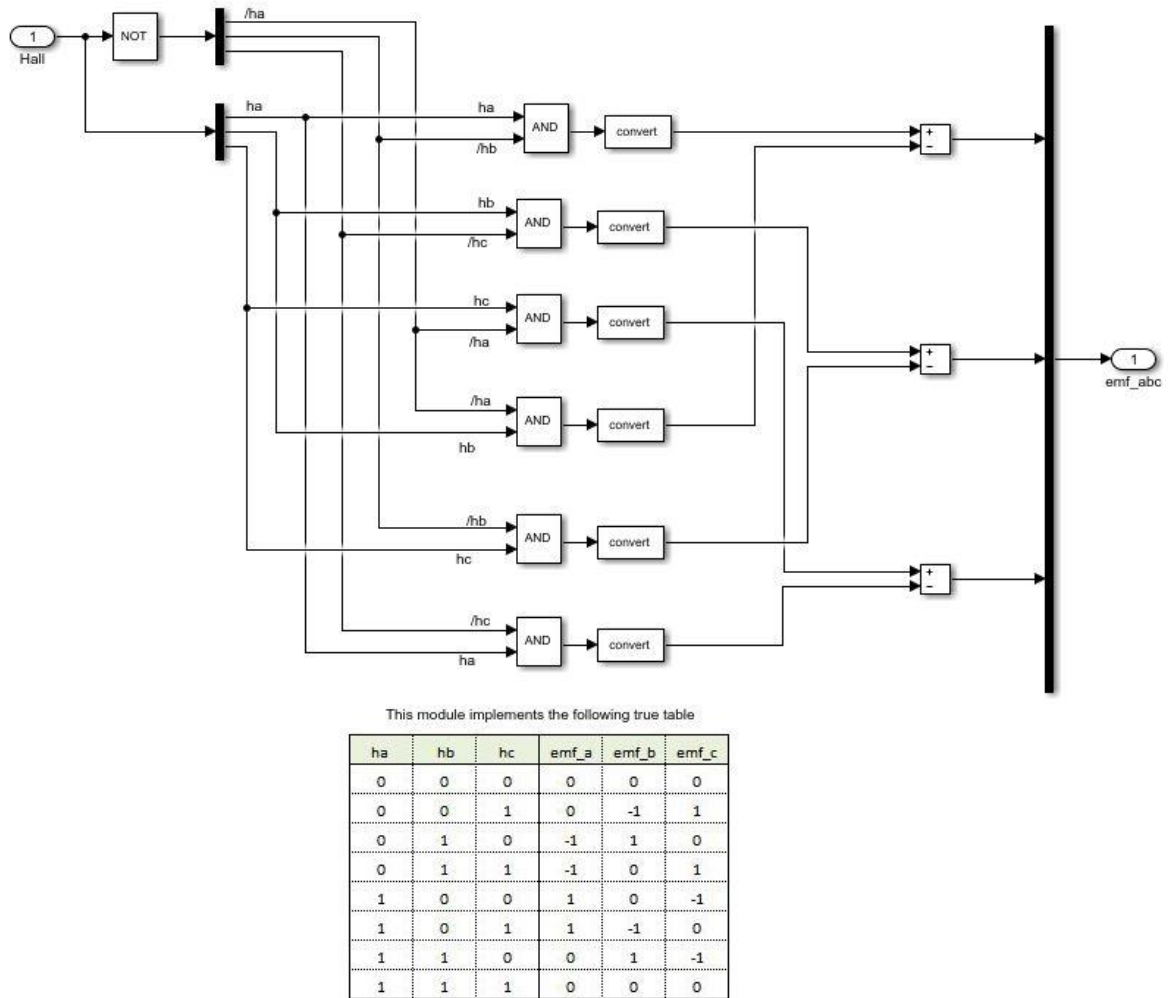
Το μπλοκ Σύγχρονης Μηχανής Μόνιμου Μαγνήτη υλοποιεί μια τριφασική σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη. Βάσει των μετρήσεων της αντίστασης και της αυτεπαγωγής μιας

φάσης στο στάτη και των προδιαγραφών του κινητήρα (όπως ο αριθμός ζευγών πόλων κ.λπ.), οι παράμετροι λειτουργίας του PMSM είναι αυτές που φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 4-19.

Σχήμα 4-19. Παράμετροι λειτουργίας σύγχρονου τριφασικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

Αποκωδικοποιητής

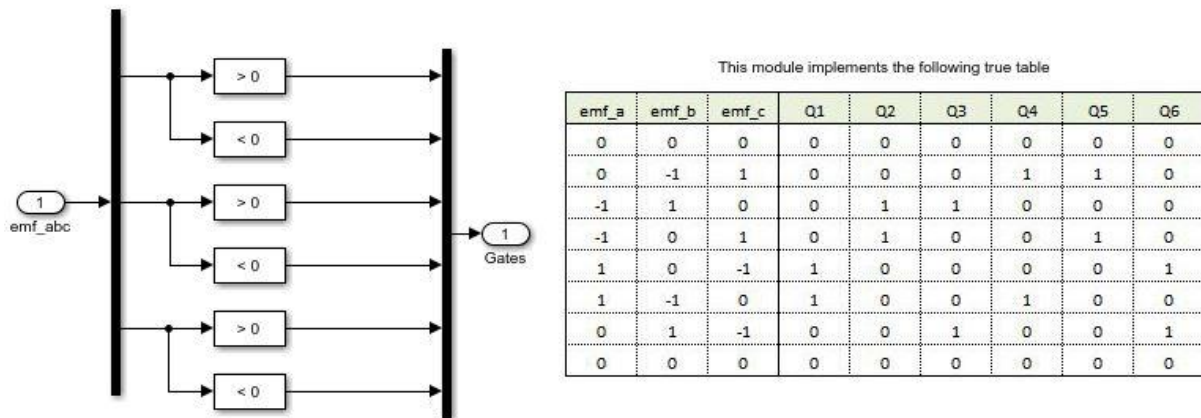
Ο αποκωδικοποιητής δέχεται τα σήματα από τους αισθητήρες Hall του κινητήρα BLDC και μετά την αποκωδικοποίηση στέλνει στο μπλοκ Gates τρία σήματα το emf_a, emf_b και emf_c. Η μοντελοποίηση του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-20.



Σχήμα 4-20. Μοντελοποίηση αποκωδικοποιητή κινητήρα BLDC [14].

Πύλες (Gates)

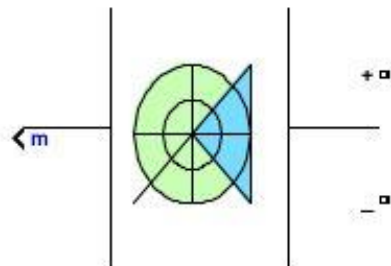
Το μπλοκ Gates δέχεται τα σήματα από τον αποκωδικοποιητή, τα επεξεργάζεται και τα στέλνει στον τριφασικό αντιστροφέα (inverter). Δηλαδή, αν το πρώτο σήμα από την έξοδο του αποκωδικοποιητή emf_a είναι μηδέν τα Q1 και Q2 παίρνουν τιμή μηδέν, ενώ, αν είναι θετικό, τότε το Q1 παίρνει τιμή ένα και το Q2 παίρνει τιμή μηδέν. Τέλος, αν το σήμα είναι αρνητικό, τότε το Q1 παίρνει τιμή μηδέν και το Q2 παίρνει τιμή ένα. Ομοίως επεξεργάζεται και τα σήματα του αποκωδικοποιητή emf_b και emf_c, δίνοντας ανάλογες τιμές. Η μοντελοποίηση του μπλοκ Gates φαίνεται στο Σχήμα 4-21.



Σχήμα 4-21. Μοντελοποίηση του μπλοκ Gates κινητήρα BLDC [14].

4.2.4 Μοντελοποίηση συστοιχίας υπερπυκνωτών

Το μπλοκ Supercapacitor υλοποιεί ένα γενικό μοντέλο, παραμετροποιημένο για να αντιπροσωπεύει τους πιο δημοφιλείς τύπους υπερπυκνωτών (Σχήμα 4-22).



Σχήμα 4-22. Μοντέλο Simulink συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Παράμετροι συστοιχίας υπερπυκνωτών

- Ονομαστική χωρητικότητα (F): καθορίζει την ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας των υπερπυκνωτών σε Farad.
- Ισοδύναμη αντίσταση σειράς DC (Ohm): καθορίζει την εσωτερική αντίσταση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών σε Ohms.
- Ονομαστική τάση (V): καθορίζει την ονομαστική τάση συστοιχίας των υπερπυκνωτών σε Volt.
- Αριθμός πυκνωτών σειράς: καθορίζει τον αριθμό των πυκνωτών σειράς που αναπαρίστανται.

- Αριθμός παράλληλων πυκνωτών: καθορίζει τον αριθμό των παράλληλων πυκνωτών που αναπαρίστανται.
- Αρχική τάση (V): καθορίζει την αρχική τάση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών σε Volt.
- Θερμοκρασία λειτουργίας (°C): καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας της συστοιχίας των υπερπυκνωτών.

Βάσει των χαρακτηριστικών της νέας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές του οχήματος σύμφωνα με τον Πίνακα 3-8, τίθενται οι παράμετροι όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 4-23.

Parameters	Stern	Self-discharge
Rated capacitance (F)	100	
Equivalent DC series resistance (Ohms)	12.6e-3	
Rated voltage (V)	48.6	
Number of series capacitors	18	
Number of parallel capacitors	4	
Initial voltage (V)	48.56	
Operating temperature (Celsius)	25	

Σχήμα 4-23. Παράμετροι νέας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές.

4.2.5 Αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας του οχήματος

Στην παράγραφο 3.1 αναφέρεται ότι μια μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπερπυκνωτές μπορεί να εξισορροπεί την παροχή ενέργειας που τροφοδοτείται από την κυψέλη καυσίμου ή ακόμα και να εξασφαλίζει την τροφοδότηση του φορτίου κατά την περίοδο της αιχμής, δηλαδή στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος.

Για τους παραπάνω λόγους προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας αλγορίθμων διαχείρισης της ενέργειας του οχήματος, που υλοποιούνται για τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του, που προσομοιώνουν την κίνηση του.

Για την μελέτη των αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας κάτω από διαφορετικές συνθήκες κίνησης του οχήματος επιλέχθηκαν τρία σενάρια λειτουργίας (drive cycle). Το πρώτο από αυτά τα τρία σενάρια προσομοιώνει τον συνδυασμό αστικής και αγροτικής οδήγησης (Σχήμα 5-1), το δεύτερο την αστική οδήγηση (Σχήμα 5-19) και το τρίτο το ξεκίνημα, το

σταμάτημα και την σταθερή πορεία του οχήματος κατά τη διάρκεια ενός αγώνα (Σχήμα 5-36).

Σε επίπεδο ροής ενέργειας και οι τρεις αλγόριθμοι λειτουργούν ως εξής:

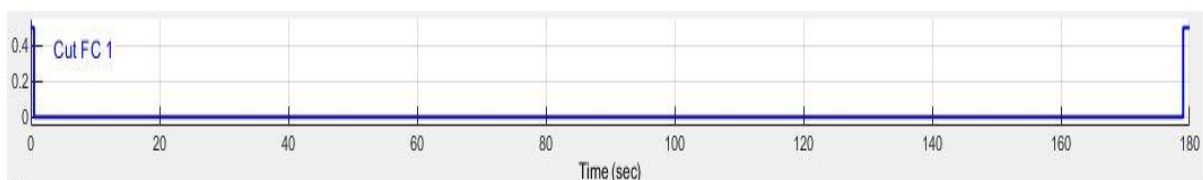
- Στο ξεκίνημα, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος ενέργεια παρέχει στον κινητήρα μόνο η συστοιχία υπερπυκνωτών.
- Καθ' όλη την υπόλοιπη διάρκεια της κίνησης, ενέργεια στον κινητήρα του οχήματος παρέχουν ταυτόχρονα και η κυψέλη καυσίμου και η συστοιχία υπερπυκνωτών. Όταν όμως η συστοιχία υπερπυκνωτών εκφορτιστεί (τάση < 48 V), ενέργεια στον κινητήρα παρέχει μόνο η κυψέλη καυσίμου, η οποία παράλληλα φορτίζει και τη συστοιχία υπερπυκνωτών, ώστε να μπορούν να παρέχουν εκ νέου ενέργεια στο όχημα.

Οι τρεις αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας διαφέρουν μόνο στον τρόπο με τον οποίο διακόπτεται η παροχή ενέργειας της κυψέλης καυσίμου προς τον κινητήρα και την συστοιχία υπερπυκνωτών.

Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #1

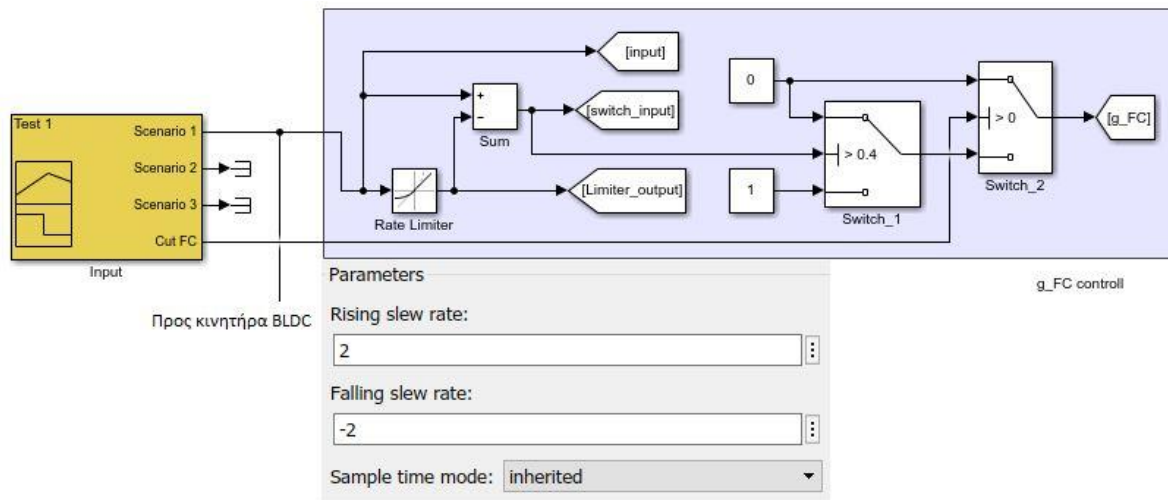
Για τον πρώτο αλγόριθμο η διακοπή παροχής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς τον κινητήρα και την συστοιχία υπερπυκνωτών επιτυγχάνεται με την χρήση ενός ελεγχόμενου διακόπτη (switch). Για την υλοποίησή του, συνδυάζονται και λειτουργούν τρία τμήματα.

Το πρώτο από τα τρία αυτά τμήματα του μοντέλου που τον υλοποιεί είναι το σήμα διακοπής cut FC (Σχήμα 4-24), που για τιμές μεγαλύτερες του μηδενός διακόπτει την παροχή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς τον κινητήρα κατά την εκκίνηση και κατά το σταμάτημα του οχήματος.



Σχήμα 4-24. Σήμα διακοπής cut FC.

Στο Σχήμα 4-25 φαίνεται το δεύτερο τμήμα, που είναι το κύκλωμα ελεγκτή του διακόπτη (g_FC switch control) το οποίο δέχεται το σήμα διακοπής cut FC, όπως και το σήμα από το σενάριο λειτουργίας του κινητήρα (σε rad/sec) και αφού τα επεξεργαστεί δίνει τιμή μηδέν ή ένα στον ελεγχόμενο διακόπτη.

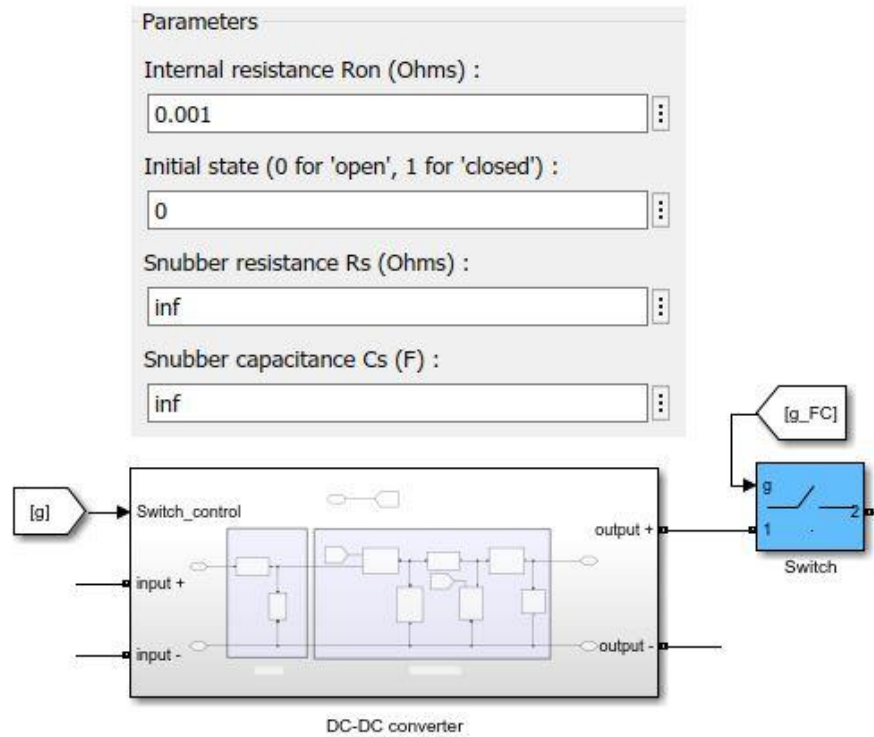


Σχήμα 4-25. Κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-25, το σήμα από τα σενάρια λειτουργίας πηγαίνει σε έναν περιοριστή ρυθμού (Rate Limiter) και σε ένα μπλοκ Sum, που εκτελεί για κάθε χρονική στιγμή αφαίρεση της ταχύτητας του σεναρίου από την ταχύτητα του σεναρίου όπως αυτή εξέρχεται από τον περιοριστή. Το σήμα από την έξοδο του μπλοκ Sum οδηγείται στον πρώτο από τους διακόπτες επιλογής σήματος (Switch_1).

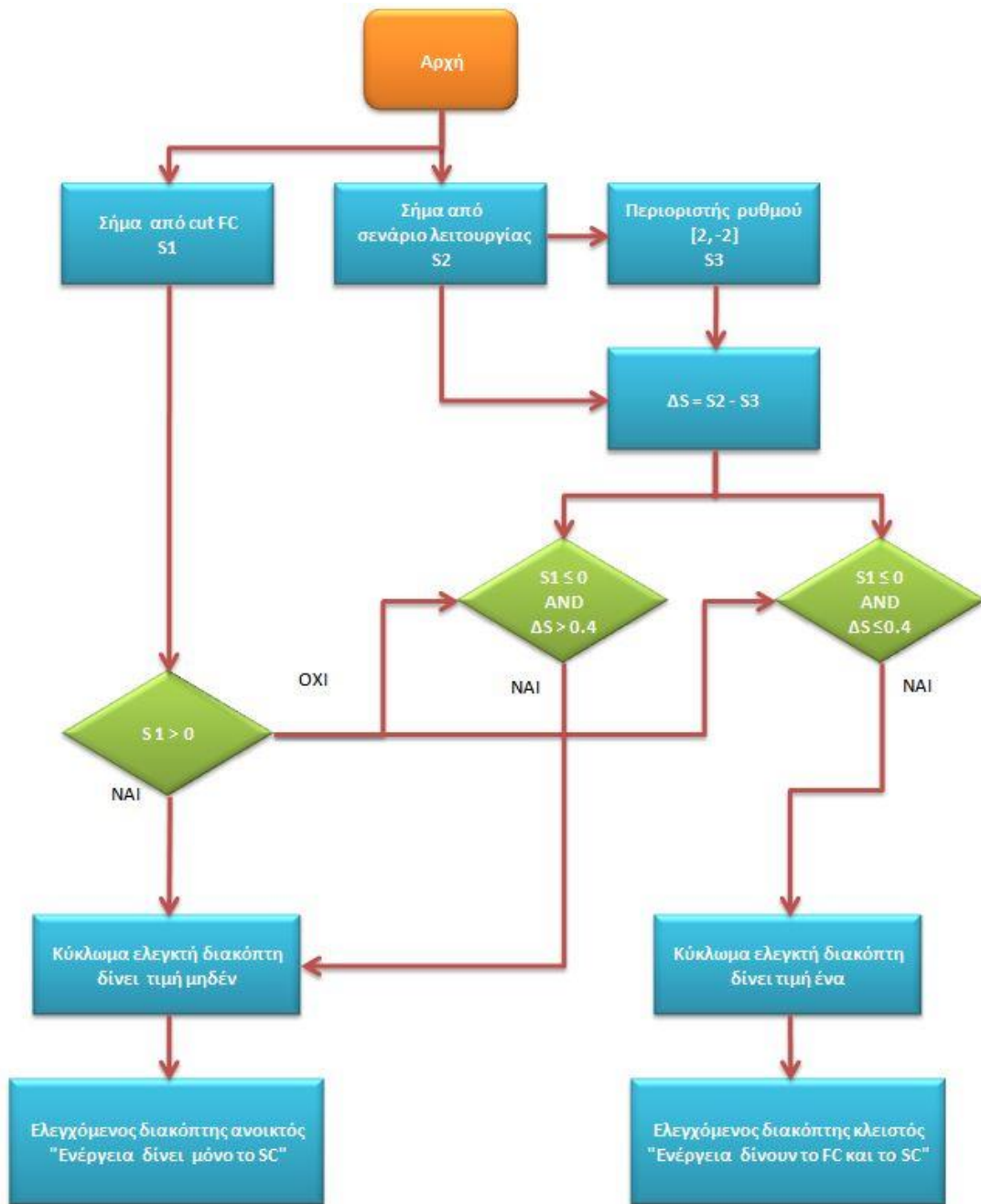
Στη συνέχεια, στον πρώτο από τους δύο διακόπτες επιλογής (Switch_1), αν το σήμα της εισόδου ελέγχου είναι μεγαλύτερο από 0.4 rad/sec, δηλαδή επιταχύνει το όχημα, στην έξοδό του επιλέγεται τιμή μηδέν, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση επιλέγεται τιμή ίση με ένα. Στον δεύτερο διακόπτη επιλογής (Switch_2) που δέχεται το σήμα διακοπής cut FC, αν αυτό είναι μεγαλύτερο του μηδενός, επιλέγεται τιμή μηδέν, και σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση προκύπτει η τιμή της εξόδου του πρώτου διακόπτη (μηδέν ή ένα).

Το τρίτο και τελευταίο τμήμα του μοντέλου που υλοποιεί τον αλγόριθμο είναι ένας ελεγχόμενος διακόπτης (switch) αμέσως μετά την έξοδο του μετατροπέα DC-DC, ο οποίος, όταν δεχθεί τιμή μηδέν από το κύκλωμα του ελεγκτή του διακόπτη, σταματά την παροχή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου στον κινητήρα, ενώ, αν δεχθεί τιμή ένα επιτρέπει την παροχή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς τον κινητήρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-26.



Σχήμα 4-26. Ελεγχόμενος διακόπτης με τις παραμέτρους του.

Το διάγραμμα ροής, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 4-27, εξηγεί τη λειτουργία του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.



Σχήμα 4-27. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

Στο Σχήμα 4-27, όταν το σήμα διακοπής cut FC ($S1$) είναι μεγαλύτερο του μηδενός, το κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη (Σχήμα 4-25) δίνει τιμή μηδέν, την οποία δέχεται ο ελεγχόμενος διακόπτης (Σχήμα 4-26). Αφού η τιμή είναι μηδέν, ο ελεγχόμενος διακόπτης ανοίγει, δηλαδή διακόπτει την παροχή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς τον κινητήρα και τη συστοιχία υπερπυκνωτών. Τότε ο κινητήρας τροφοδοτείται με ενέργεια μόνο από τη συστοιχία υπερπυκνωτών. Στην περίπτωση που το σήμα διακοπής cut FC είναι μηδέν και η διαφορά ΔS ανάμεσα στο σήμα του σεναρίου λειτουργίας ($S2$) και το σήμα του σεναρίου που εξέρχεται από τον περιοριστή ($S3$) είναι μεγαλύτερη από 0.4, το κύκλωμα ελεγκτή

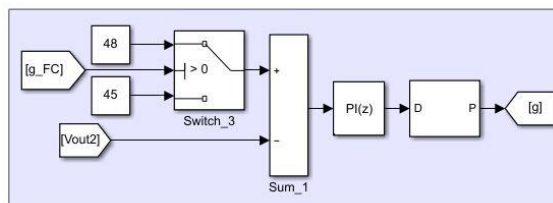
διακόπτη δίνει πάλι τιμή μηδέν και η τροφοδοσία γίνεται πάλι από τη συστοιχία υπερπυκνωτών. Όταν όμως η διαφορά ΔS είναι μικρότερη από 0.4 και το σήμα διακοπής cut FC είναι μηδέν, τότε το κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη δίνει τιμή ένα, την οποία δέχεται ο ελεγχόμενος διακόπτης και κλείνει. Τότε ο κινητήρας τροφοδοτείται με ενέργεια ταυτόχρονα από την κυψέλη καυσίμου και από τη συστοιχία υπερπυκνωτών (εφόσον αυτή έχει τάση 48 V).

Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #2

Για το δεύτερο αλγόριθμο η διακοπή παροχής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς τον κινητήρα και την συστοιχία υπερπυκνωτών επιτυγχάνεται με την ανάστροφη πόλωση της διόδου που βρίσκεται αμέσως μετά την έξοδο του μετατροπέα DC-DC. Πιο συγκεκριμένα, αν η τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC είναι χαμηλότερη της τάσης της συστοιχίας των υπερπυκνωτών η διόδος αυτή πολώνεται ανάστροφα με αποτέλεσμα τη διακοπή παροχής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς το υπόλοιπο κύκλωμα.

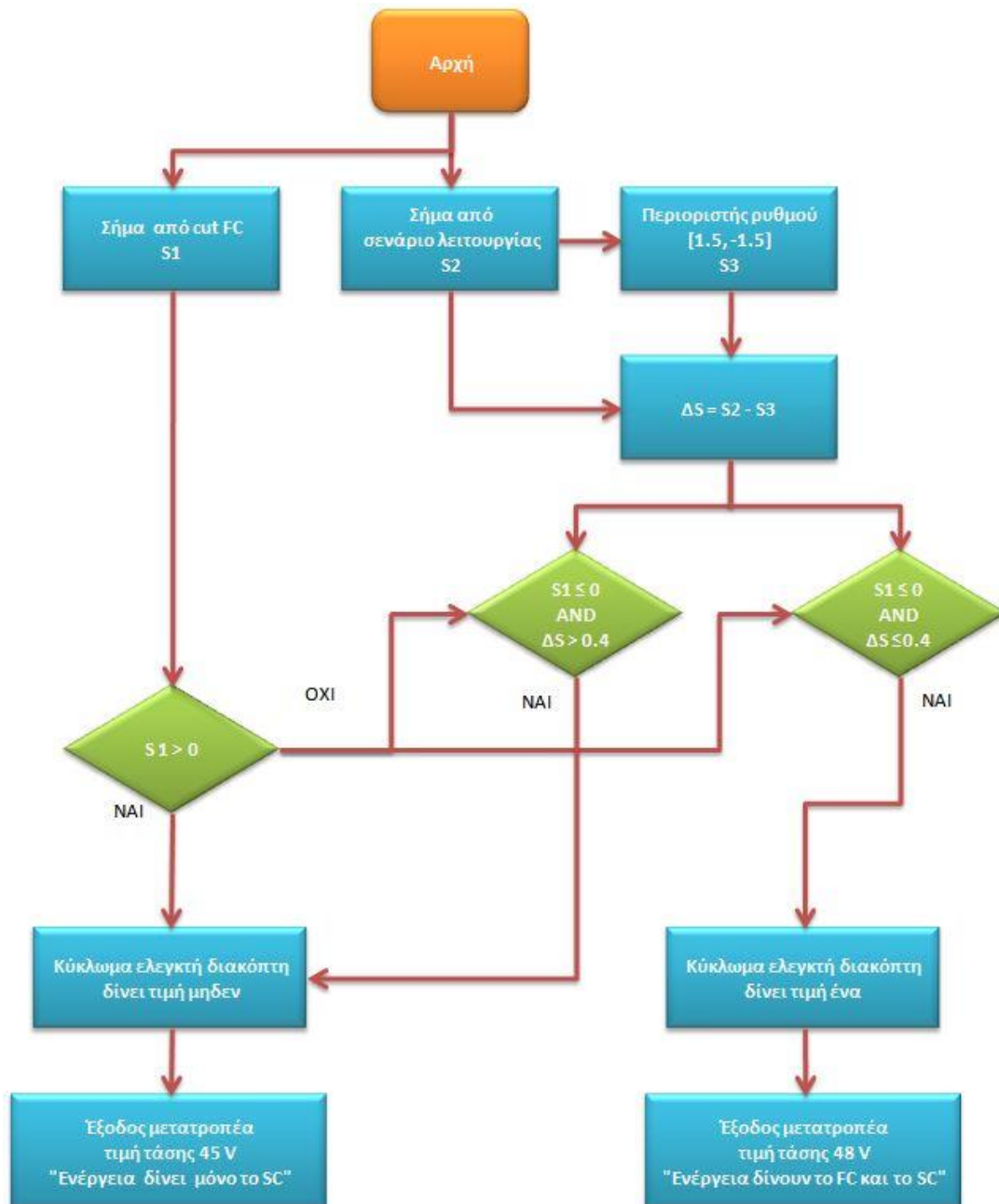
Ο αλγόριθμος που υλοποιείται αποτελείται και αυτός από τρία μέρη. Το πρώτο και δεύτερο μέρος του είναι ακριβώς ίδιο με το μοντέλο που υλοποιεί τον πρώτο αλγόριθμο, ενώ το τρίτο μέρος είναι ένας διακόπτης επιλογής (Switch_3). Αυτός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-28, τοποθετείται στην επάνω είσοδο του μπλοκ Sum_1 του ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα DC-DC.

Όταν διακόπτης επιλογής (Switch_3) δεχθεί τιμή ένα από το κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη (Σχήμα 4-25) επιλέγεται επιθυμητή τιμή τάσης εξόδου του μετατροπέα DC-DC τα 48 V που είναι και η τάση λειτουργίας του ελεγκτή κινητήρα. Αν δεχθεί τιμή μηδέν επιλέγεται επιθυμητή τιμή τάσης εξόδου του μετατροπέα DC-DC τα 45 V που είναι μία τιμή τάσης χαμηλότερη από την τιμή τάσης της συστοιχίας των υπερπυκνωτών και έτσι επιτυγχάνεται ανάστροφη πόλωση της διόδου.



Σχήμα 4-28. Ελεγκτής MOSFET του μετατροπέα DC-DC.

Το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 4-29 παρακάτω εξηγεί τη λειτουργία του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.



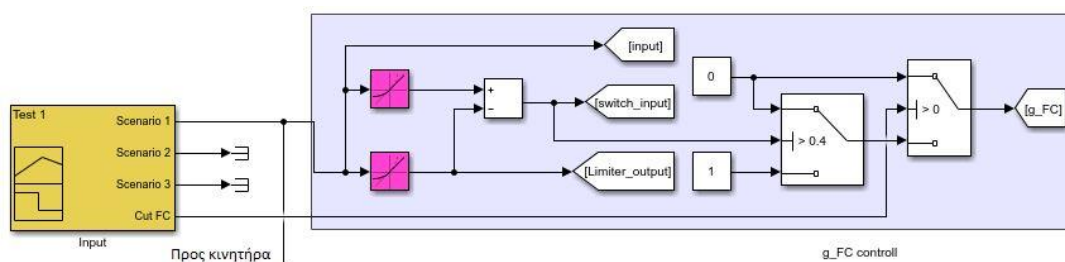
Σχήμα 4-29. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

Στο Σχήμα 4-29, όταν το σήμα διακοπής cut FC ($S1$) είναι μεγαλύτερο του μηδενός, το κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη (Σχήμα 4-25) δίνει τιμή μηδέν, την οποία δέχεται ο διακόπτης επιλογής του ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα DC-DC και δίνει τιμή 45 V. Οπότε ο μετατροπέας DC-DC δίνει στην έξοδο του τιμή τάσης 45 V, δηλαδή διακόπτει την παροχή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς τον κινητήρα, γιατί η συστοιχία υπερπυκνωτών έχει μεγαλύτερη τάση από το σύστημα κυψέλης καυσίμου και μετατροπέα DC-DC (ανάστροφη πόλωση διόδου). Άρα ο κινητήρας τροφοδοτείται με ενέργεια μόνο από τη συστοιχία υπερπυκνωτών. Στην περίπτωση που το σήμα διακοπής cut FC ($S1$) είναι μηδέν

και η διαφορά ΔS ανάμεσα στο σήμα του σεναρίου λειτουργίας (S_2) και στο σήμα του σεναρίου που εξέρχεται από τον περιοριστή (S_3) είναι μεγαλύτερη από 0.4, το κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη δίνει πάλι τιμή μηδέν και προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα. Όταν όμως η διαφορά ΔS είναι μικρότερη από 0.4 και το σήμα διακόπτη cut FC (S_1) είναι μηδέν, τότε το κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη δίνει τιμή ένα, την οποία δέχεται ο διακόπτης επιλογής του ελεγκτή MOSFET του μετατροπέα DC-DC και δίνει τιμή 48 V. Τότε ο κινητήρας τροφοδοτείται με ενέργεια και από την κυψέλη καυσίμου και από τη συστοιχία υπερπυκνωτών (εφόσον αυτή έχει τάση 48 V).

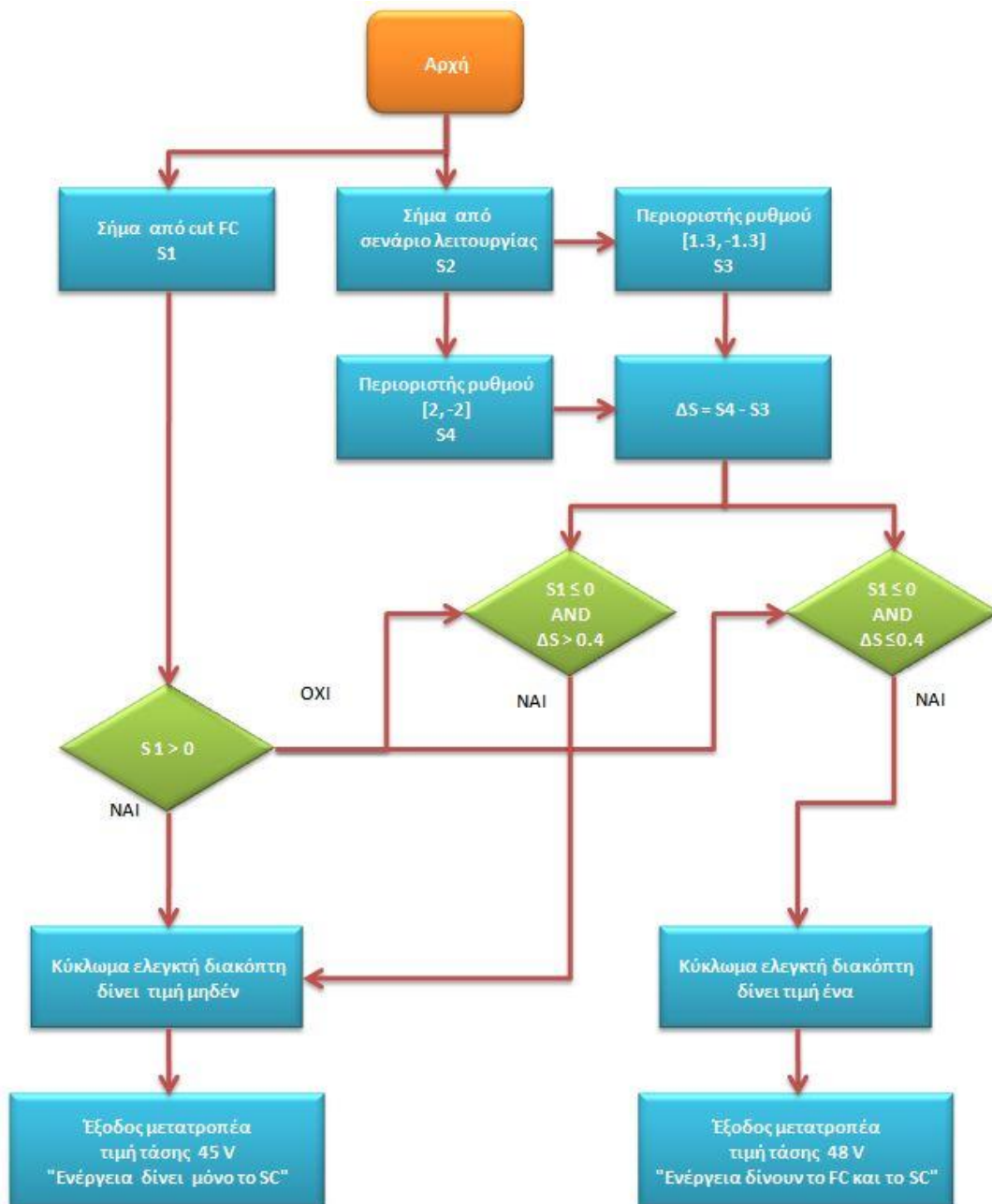
Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #3

Ο τρίτος αλγόριθμος είναι παρόμοιος με τον δεύτερο, με τη διαφορά ότι στον ελεγκτή του διακόπτη (g_FC switch control), όπως αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-30, προστίθεται ένας επιπλέον περιοριστής ρυθμού. Η προσθήκη του δεύτερου περιοριστή ρυθμού αυξάνει τα κατώφλια μη λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, με αποτέλεσμα να λειτουργεί περισσότερη ώρα η συστοιχία υπερπυκνωτών στις επιταχύνσεις του οχήματος.



Σχήμα 4-30. Νέο κύκλωμα ελεγκτή διακόπτη.

Το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 4-31 εξηγεί τη λειτουργία του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #3.



Σχήμα 4-31. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #3.

Στο Σχήμα 4-31 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #3 που είναι παρόμοιος με αυτόν του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2. Η μόνη διαφορά είναι η προσθήκη και δεύτερου περιοριστή στο σήμα του σεναρίου λειτουργίας του οχήματος. Επομένως, το σήμα ΔS είναι τώρα η διαφορά ανάμεσα στο σήμα του σεναρίου που εξέρχεται από τον δεύτερο περιοριστή ($S3$).

5. Αποτελέσματα προσομοίωσης Simulink

Μετά την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος και την εισαγωγή των παραμέτρων στο λογισμικό πακέτο Matlab/Simulink, ακολουθεί η μελέτη για την βελτιστοποίηση σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές του ηλεκτρικού οχήματος. Αυτό απαιτεί την επιλογή τεσσάρων διαφορετικού τύπου υπερπυκνωτών, που προσομοιώνονται σε τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας (drive cycle) του οχήματος για καθέναν από τους τρεις αλγορίθμους διαχείρισης ενέργειάς του.

Επιλέγονται τελικά οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι υπερπυκνωτών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1. Χαρακτηριστικά τεσσάρων τύπων υπερπυκνωτών.				
Χαρακτηριστικά	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
Ονομαστική χωρητικότητα	77.77 F	75 F	100 F	166.66 F
Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)	16.5 mΩ	16.8 mΩ	12.6 mΩ	4.14 mΩ
Ονομαστική τάση	48.6 V	48.6 V	48.6 V	48.6 V
Αποθηκευμένη ενέργεια	25.2 Wh	24.3 Wh	32.4 Wh	59.4 Wh
Βάρος	7.56 kg	5.04 kg	6.72 kg	8.88 kg
Χωρητικότητα ενός υπερπυκνωτή	350 F	450 F	450 F	3000 F
Τάση ενός υπερπυκνωτή	2.7 V	2.7 V	2.7 V	2.7 V
Αποθηκευμένη ενέργεια ενός υπερπυκνωτή στα 2.7 V	0.35 Wh	0.45 Wh	0.45 Wh	3.3 Wh
Αριθμός πυκνωτών	18 X 4	18 X 3	18 X 4	18
Κόστος	1468.62 €	555.00 €	740.00 €	1062.00 €

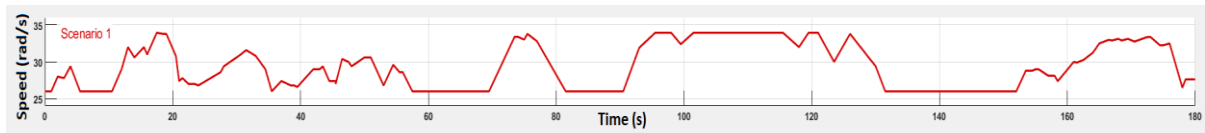
Ο υπολογισμός των τιμών του Πίνακα 5-1 για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 και 3 έγινε στην παράγραφο 3.6 από τις προδιαγραφές τους, με μόνη διαφορά ότι στο βάρος υπερπυκνωτών του τύπου 3 προστέθηκε και το βάρος από τις δώδεκα (μία ανά εξάδα υπερπυκνωτών) ηλεκτρονικές πλακέτες, δηλαδή $12 \cdot 0.110 = 1.32$ kg και συνολικά $72 \cdot 0.075 + 1.32 = 6.72$ kg. Ο ίδιος τρόπος υπολογισμού ακολουθήθηκε και για τους υπερπυκνωτές τύπου 2 (ίδιου τύπου με τους υπερπυκνωτές τύπου 3 αλλά με τρεις αντί για τέσσερις παράλληλες γραμμές) και αυτούς του τύπου 4 (18 υπερπυκνωτές 3000F μια σειρά, $3000/18=166.66$) [15].

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το Simulink για χρόνο 180 sec αναλύονται παρακάτω.

5.1 Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #1

5.1.1 Σενάριο λειτουργίας I

Το πρώτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1. Πρώτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1, προκύπτουν τρεις κυματομορφές, αυτή του ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου (FC), αυτή της ισχύος της κυψέλης καυσίμου και της ισχύος των υπερπυκνωτών (SC), καθώς και αυτή της κατάστασης φόρτισης των υπερπυκνωτών (state of charge SOC%).

Η κατάσταση φόρτισης υπολογίζεται από τον τύπο [16]:

$$SOC = \frac{Q_{init} - \int_0^t i(\tau) d\tau}{Q_{total}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

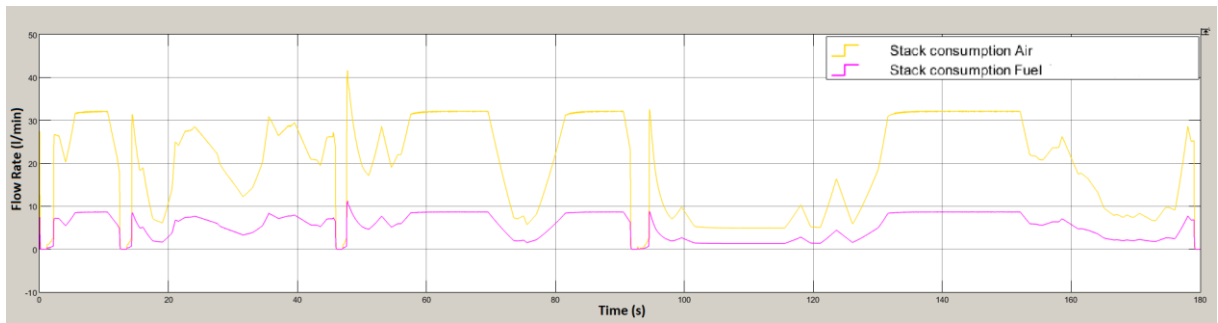
όπου:

Q_{init} = Αρχικό φορτίο (C)

Q_{total} = Συνολικό φορτίο (C), στα 48 V

$i(t)$ = στιγμιαίο ρεύμα συστοιχίας υπερπυκνωτών (A).

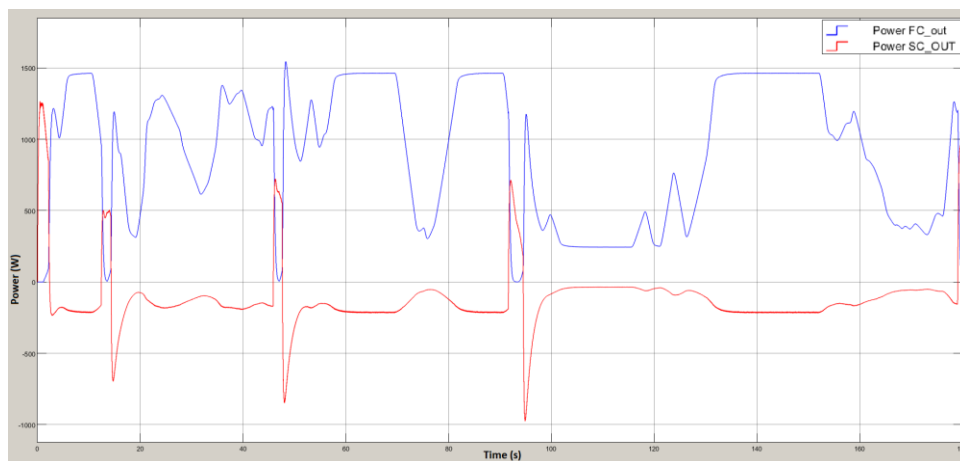
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-2. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-2 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής και στα δύο κυμαίνονται στα επιτρεπτά όρια της κυψέλης καυσίμου, όπως αυτά εμφανίζονται στον Πίνακα 3-1.

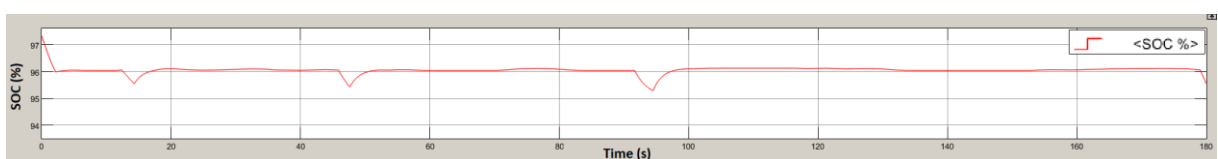
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-3. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και ισχύς υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-3 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου είναι μηδέν στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, όπως ορίζεται από τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1. Όταν η ισχύς της συστοιχίας υπερπυκνωτών έχει τιμή αρνητική, οι υπερπυκνωτές φορτίζονται.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 77.77 F.



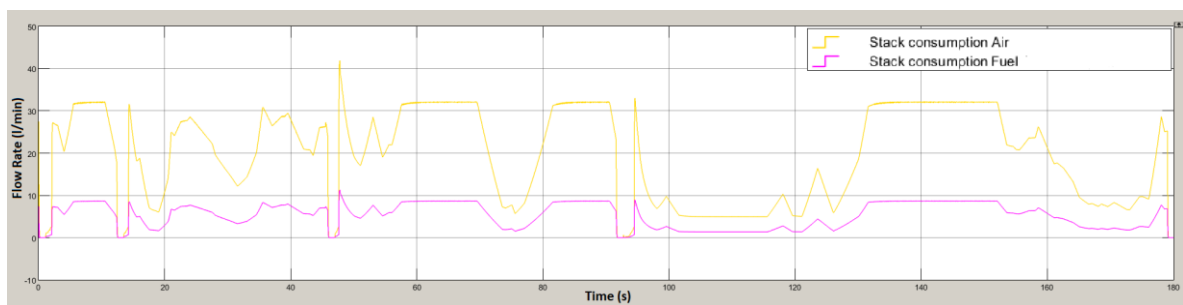
Σχήμα 5-4. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-4 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή στο 96%.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1.

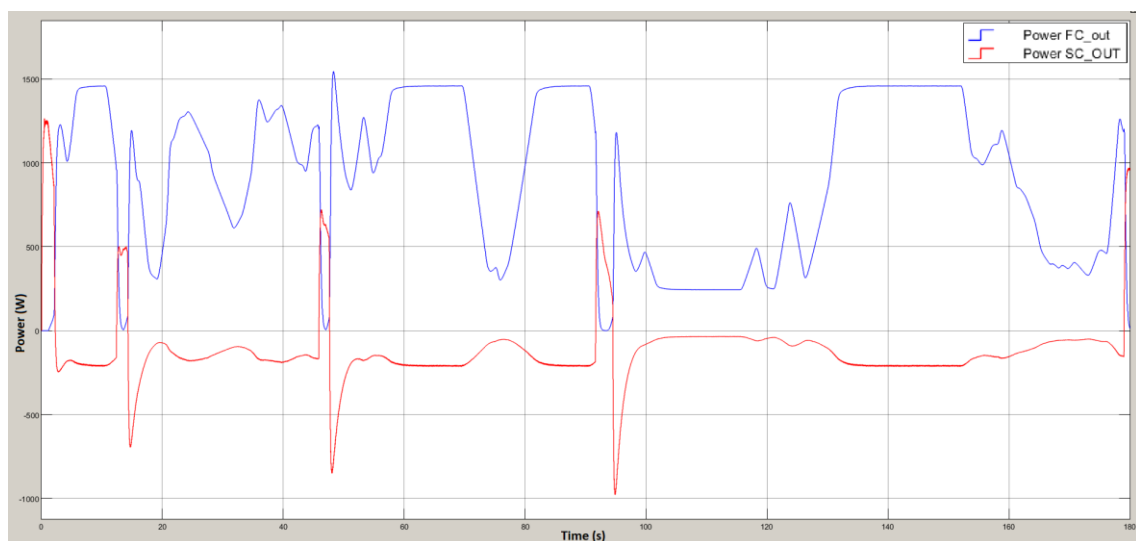
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 75 F.



Σχήμα 5-5. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-5 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με χρώμα κίτρινο και του υδρογόνου με χρώμα μωβ. Παρατηρείται ότι συγκριτικά με το Σχήμα 5-2 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου.

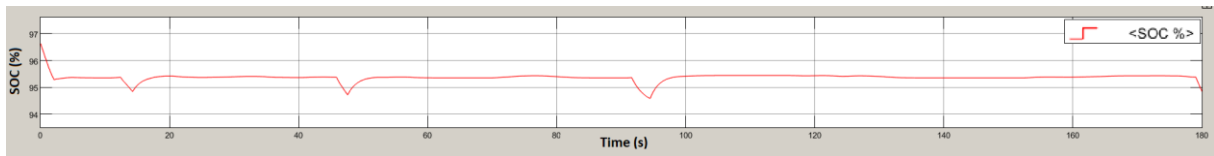
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 75 F.



Σχήμα 5-6. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-6 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που εμφανίζονται στο Σχήμα 5-3.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 75 F.



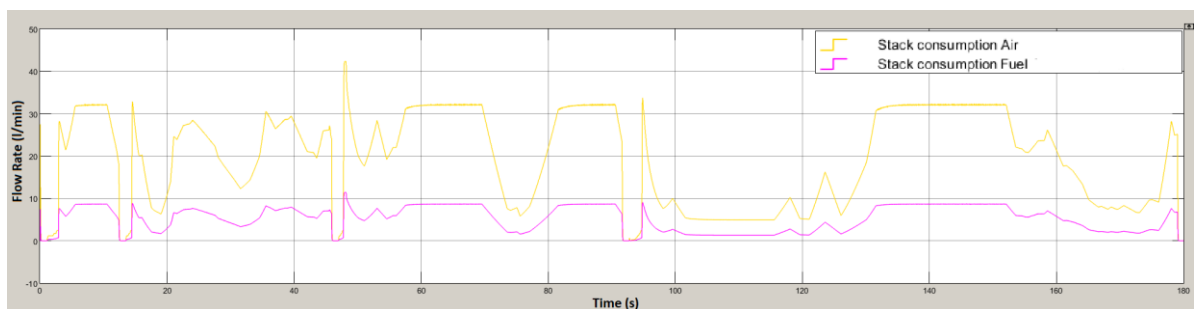
Σχήμα 5-7. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-7 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-4 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.4%, αλλά οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3, εκτός από τις τρεις κυματομορφές μελετώνται και αυτές α) της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου του κινητήρα, β) της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος FC, γ) της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC, δ) της τάσης εισόδου του κινητήρα και των ρευμάτων FC και SC και ε) της ροπής του κινητήρα.

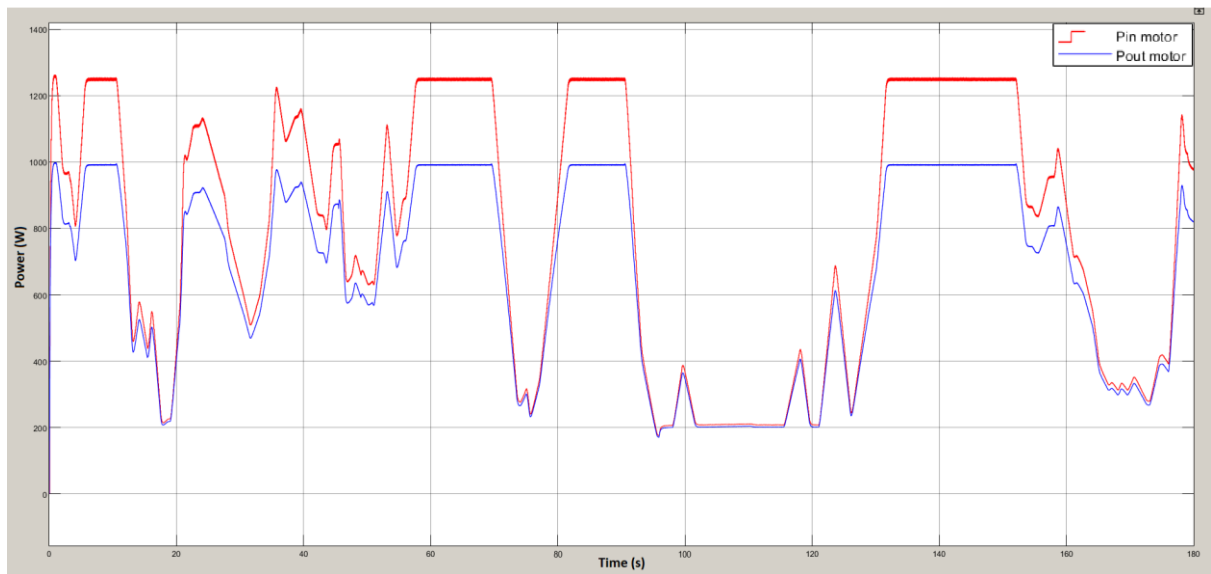
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 100 F.



Σχήμα 5-8. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-8 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών δεν εμφανίζονται διαφορές.

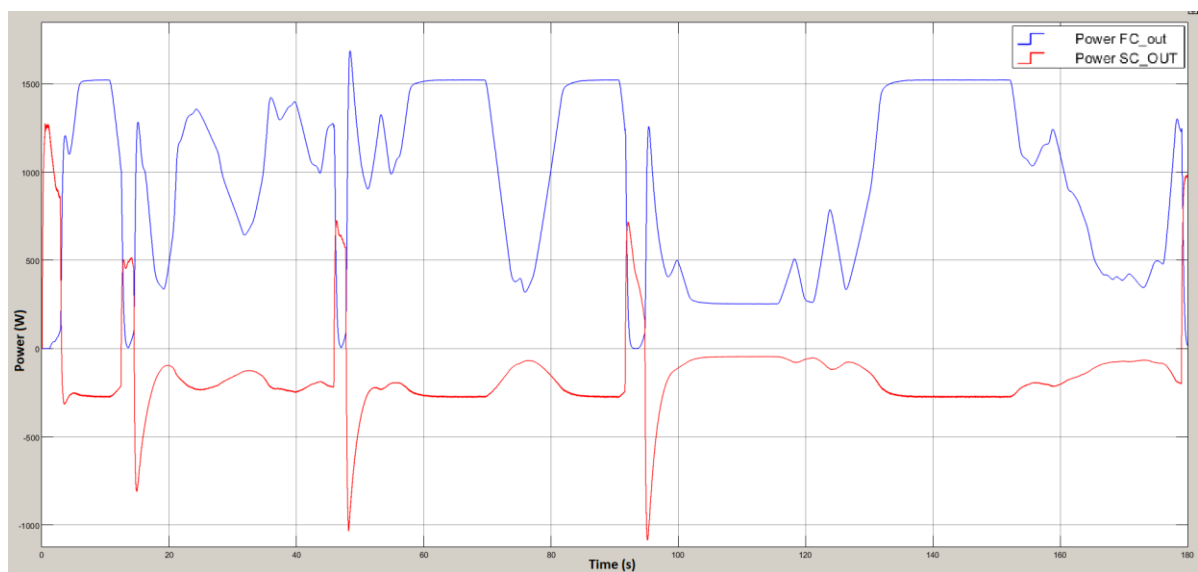
- Κυματομορφή ισχύος εισόδου και εξόδου του κινητήρα για C= 100 F.



Σχήμα 5-9. Ισχύς εισόδου και εξόδου του κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-9 παρουσιάζει την ισχύ εισόδου με κόκκινο χρώμα και την ισχύ εξόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς εισόδου είναι πάντοτε μεγαλύτερη της ισχύος εξόδου.

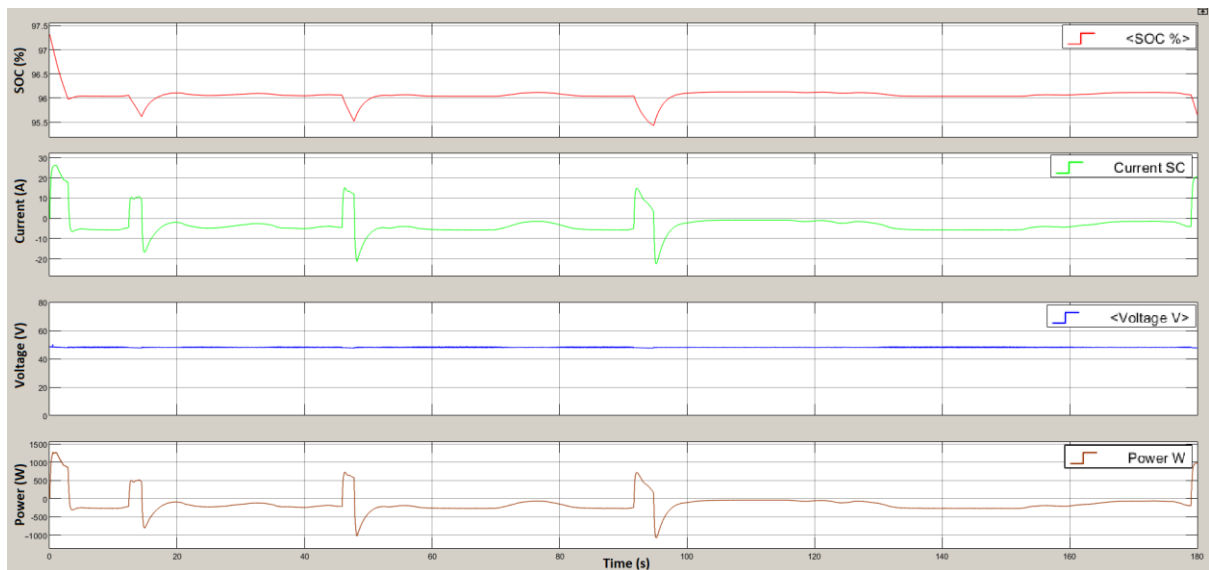
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-10. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-10 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών.

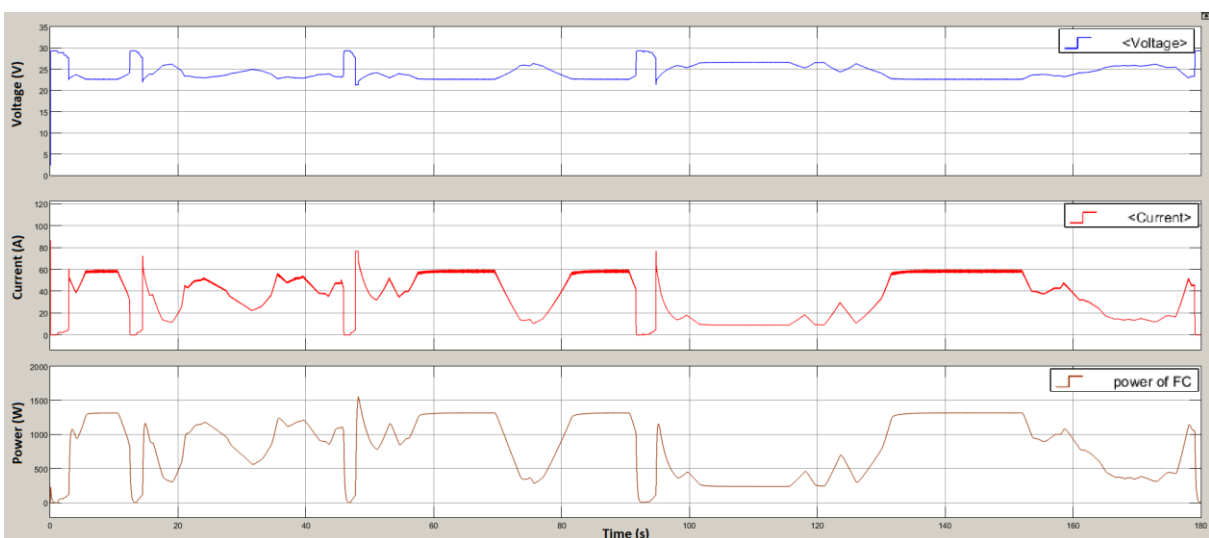
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-11. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-11 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών γιατί ενώ σταθεροποιείται κοντά στο 96% οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς έχουν και θετικές και αρνητικές τιμές. Οι υπερπυκνωτές στις θετικές τιμές δίνουν ενέργεια ενώ στις αρνητικές απορροφούν.

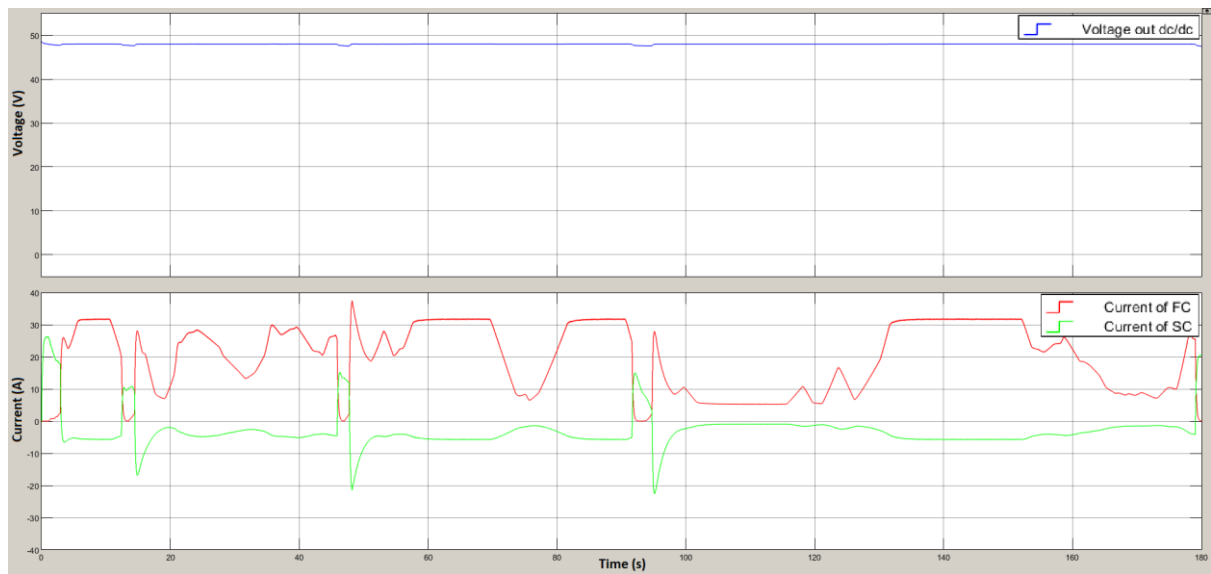
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-12. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-12 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Η ηλεκτρική τάση έχει μικρή διακύμανση μέσα στα επιτρεπτά όρια, ενώ το ρεύμα και η ισχύς δεν ξεφεύγουν από τα όρια της κυψέλης καυσίμου, όπως αυτά εμφανίζονται στον Πίνακα 3-1, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων.

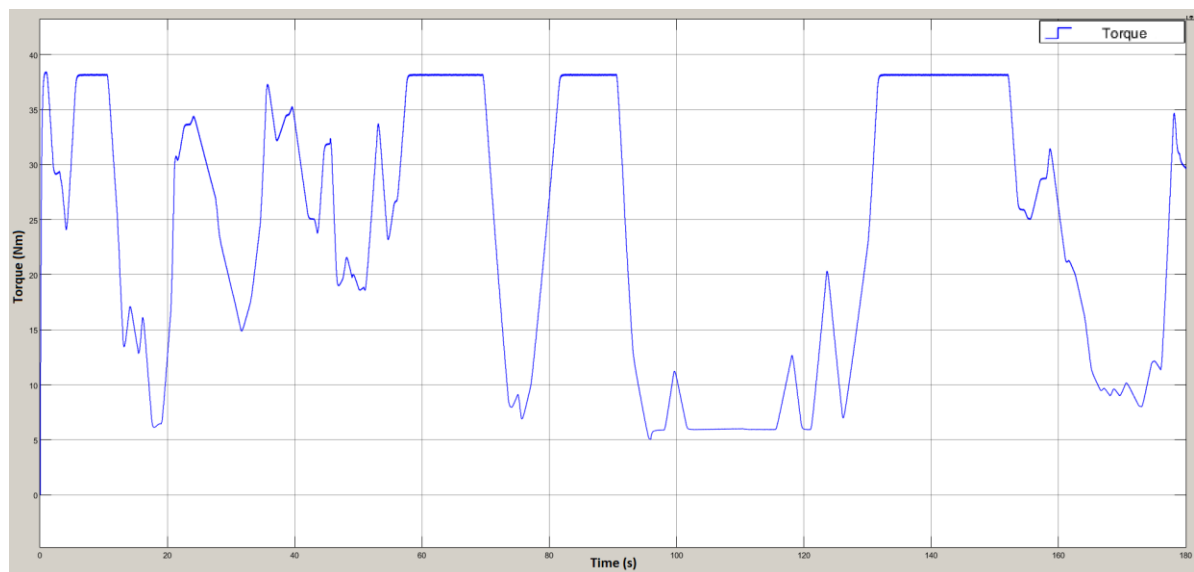
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-13. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-13 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία εμφανίζεται σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει με χρώμα κόκκινο το ρεύμα του FC και με πράσινο το ρεύμα του SC. Παρατηρείται ότι το ρεύμα του FC είναι στην εκκίνηση και στο σταμάτημα μηδέν, όπως ορίζεται από την αλγόριθμο λειτουργίας #1, καθώς και στις επιταχύνσεις του οχήματος. Όμως, το ρεύμα της συστοιχίας υπερπυκνωτών λειτουργεί με τον αντίθετο τρόπο, καθώς στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος είναι θετικό, ενώ στις άλλες περιπτώσεις είναι κάτω από μηδέν ή σχεδόν μηδέν.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



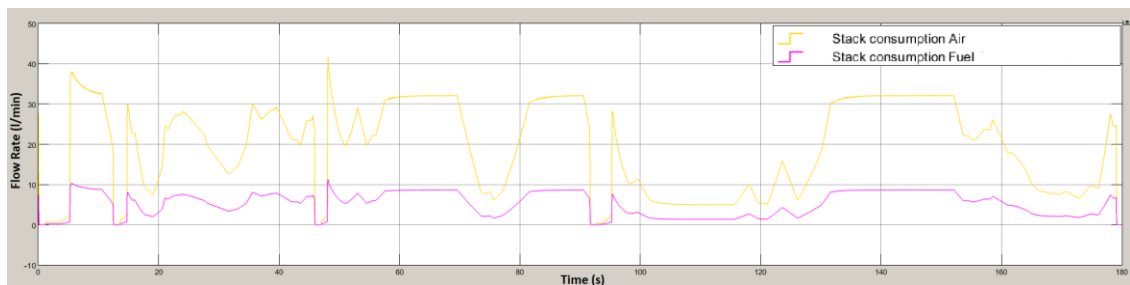
Σχήμα 5-14. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-14 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία κυμαίνεται στα επιτρεπτά όρια με βάση τις τιμές απόδοσης του κινητήρα, όπως αυτές εμφανίζονται στον Πίνακα 3-4.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1.

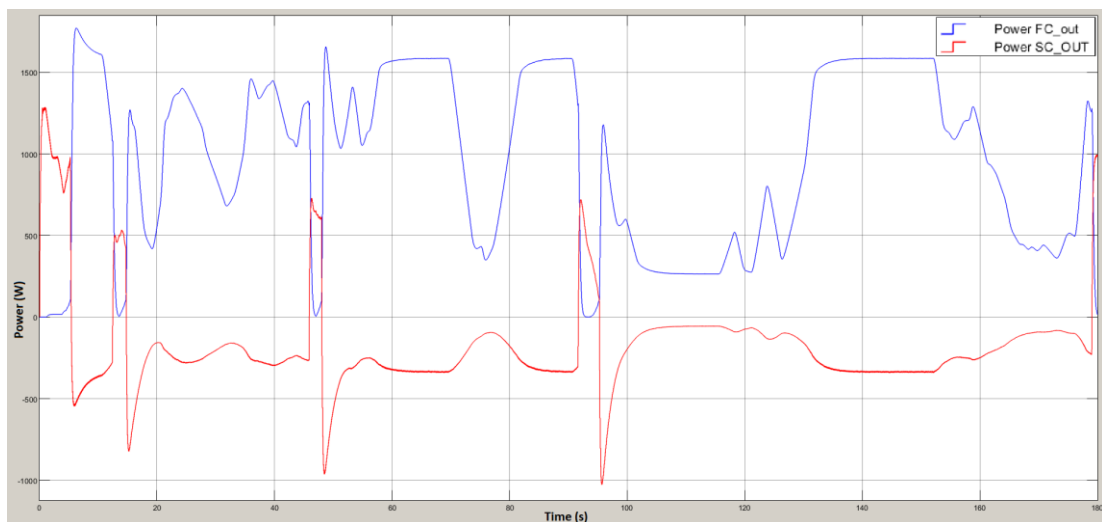
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-15. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-15 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις αλλά λιγότερη κατανάλωση.

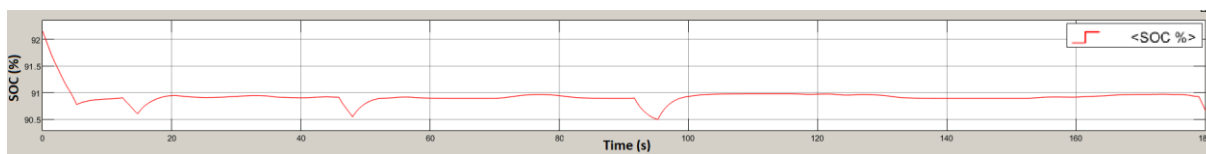
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-16. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-16 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις και η ισχύς του FC πέντε φορές ξεπερνά τα όρια της κυψέλης καυσίμου, όπως αυτά εμφανίζονται στον Πίνακα 3-1.

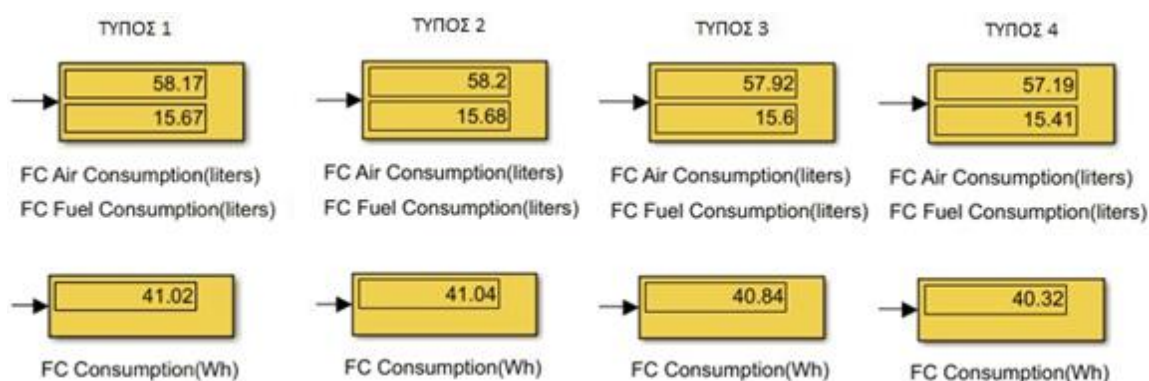
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-17. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-17 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή στο 91%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο I φαίνονται στο Σχήμα 5-18.



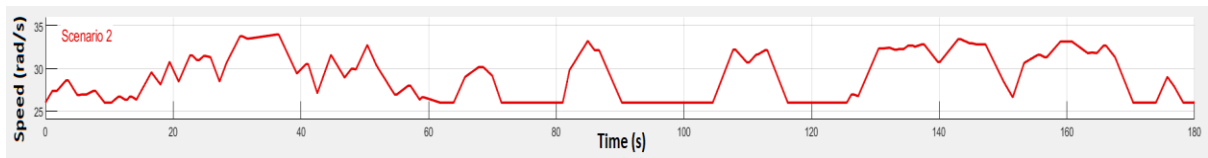
Σχήμα 5-18. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.05	95.53	15.67	41.02
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.09	94.82	15.68	41.04
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	1.92	95.65	15.60	40.84
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	1.78	90.67	15.41	40.32

5.1.2 Σενάριο λειτουργίας II

Το δεύτερο σενάριο λειτουργίας του οχήματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19.

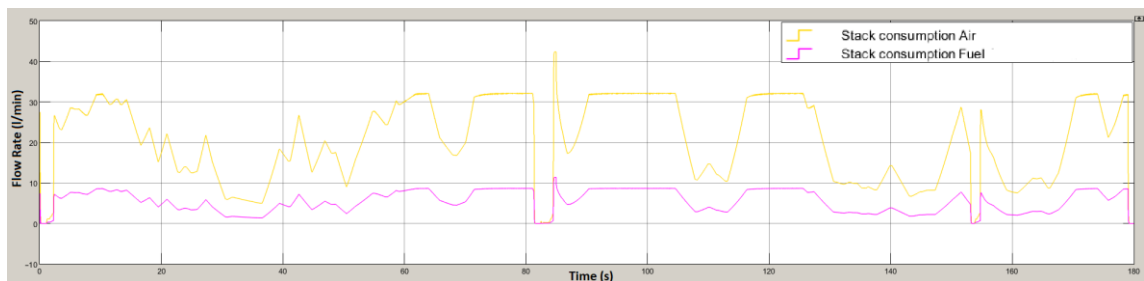


Σχήμα 5-19. Δεύτερο σενάριο λειτουργίας του οχήματος.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1 του σεναρίου Ι.

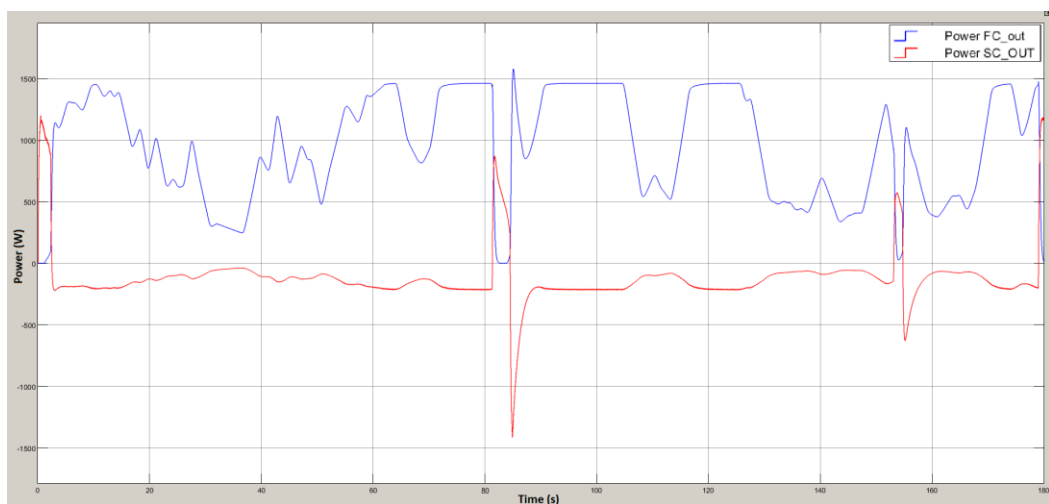
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 77.77$ F.



Σχήμα 5-20. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-20 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής και στα δύο κυμαίνονται στα επιτρεπτά όρια, αλλά με περισσότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τους ρυθμούς ροής του ίδιου τύπου του σεναρίου Ι.

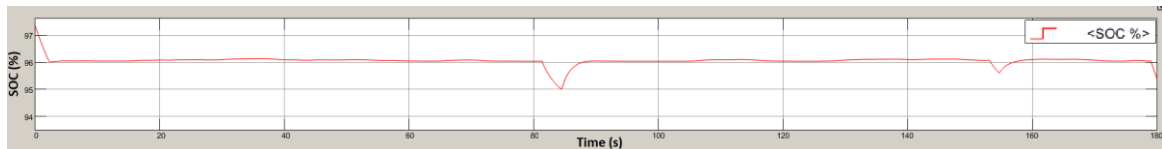
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 77.77$ F.



Σχήμα 5-21. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-21 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου είναι μηδέν στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος και έχει λιγότερες παύσεις λειτουργίας από τον αντίστοιχο τύπο του σεναρίου I.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 77.77 F.



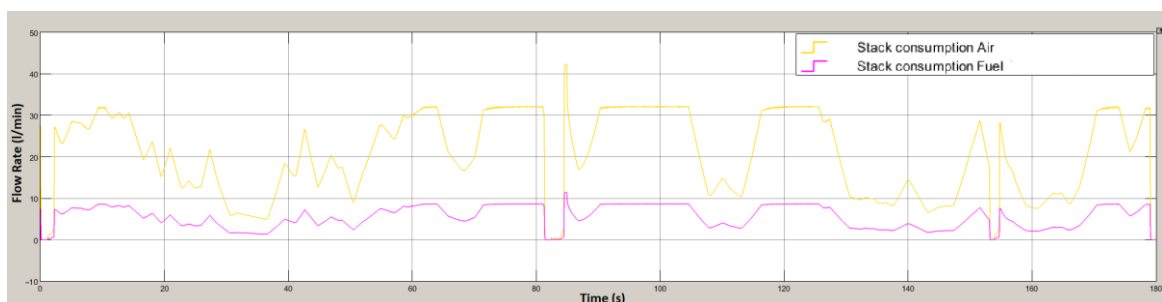
Σχήμα 5-22. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-22 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά εμφανίζει λιγότερες διακυμάνσεις από τον αντίστοιχο τύπο του σεναρίου I.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 2 του σεναρίου I.

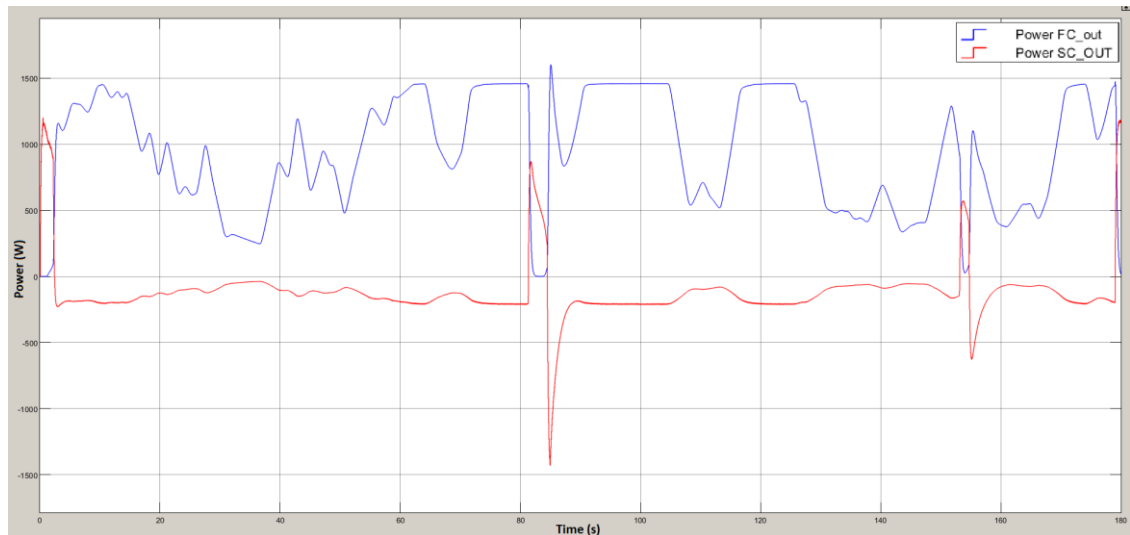
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 75 F.



Σχήμα 5-23. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-23 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-20 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου.

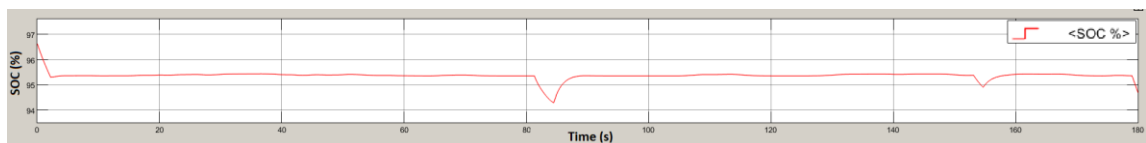
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 75 F.



Σχήμα 5-24. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-24 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που εμφανίζονται στο Σχήμα 5-21.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 75\text{ F}$.



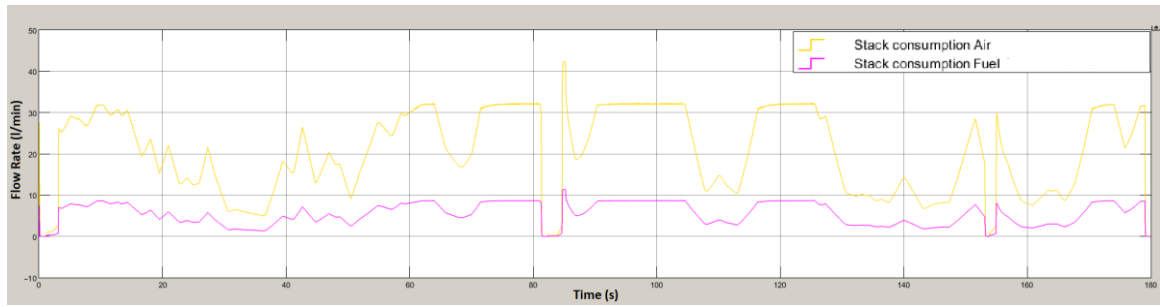
Σχήμα 5-25. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-25 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-22 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.3%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του τύπου 3 του σεναρίου I.

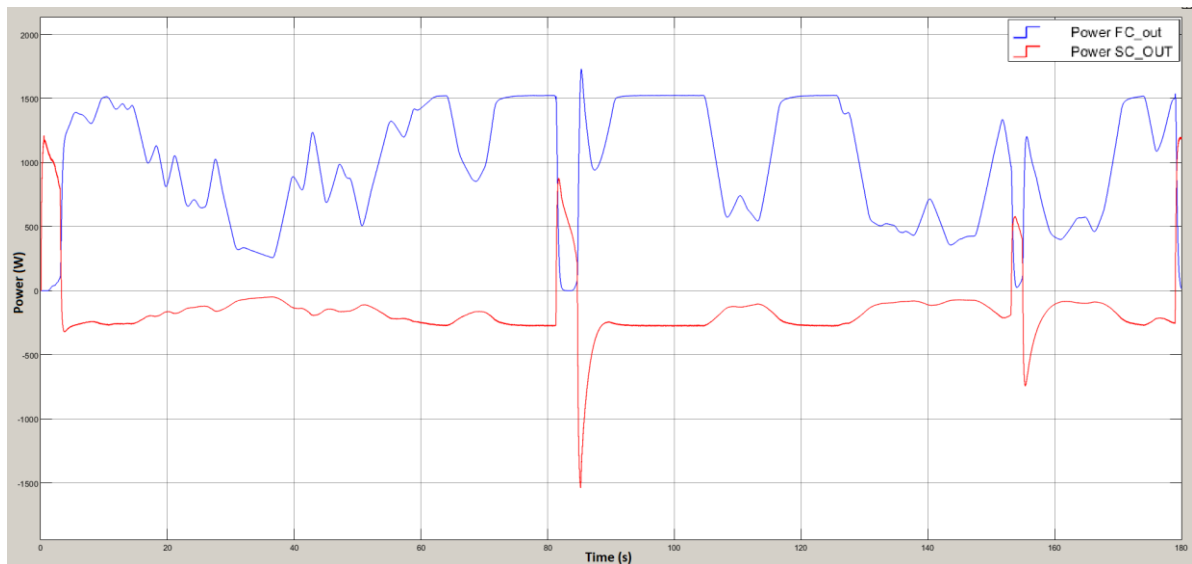
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 100\text{ F}$.



Σχήμα 5-26. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-26 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών δεν εμφανίζονται διαφορές.

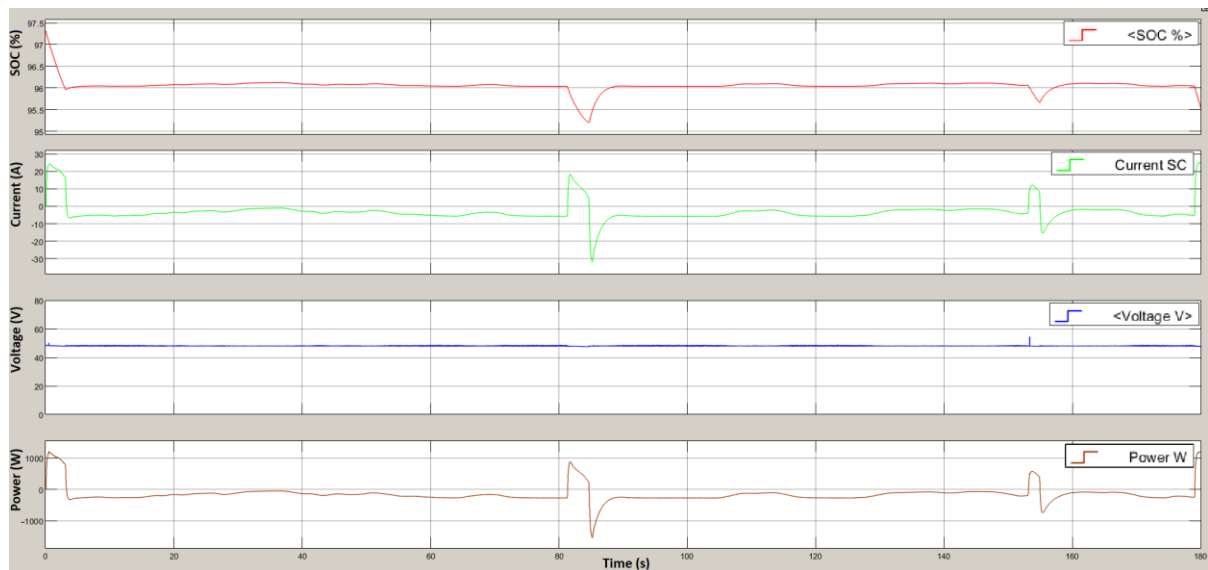
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-27. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-27 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών.

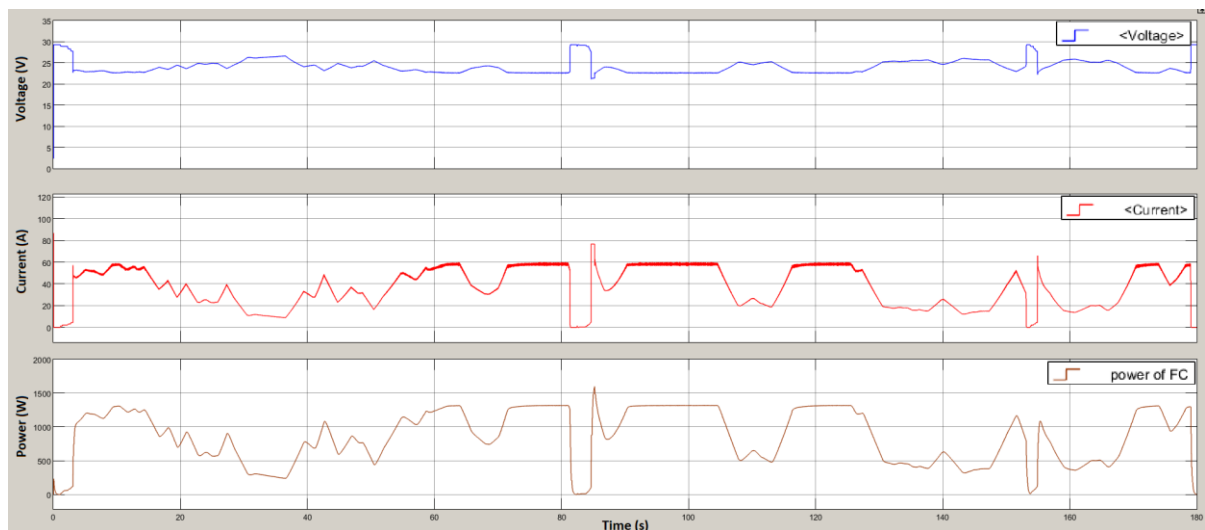
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-28. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-28 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών διότι σταθεροποιείται κοντά στο 96%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν λιγότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τον αντίστοιχο τύπο του σεναρίου I.

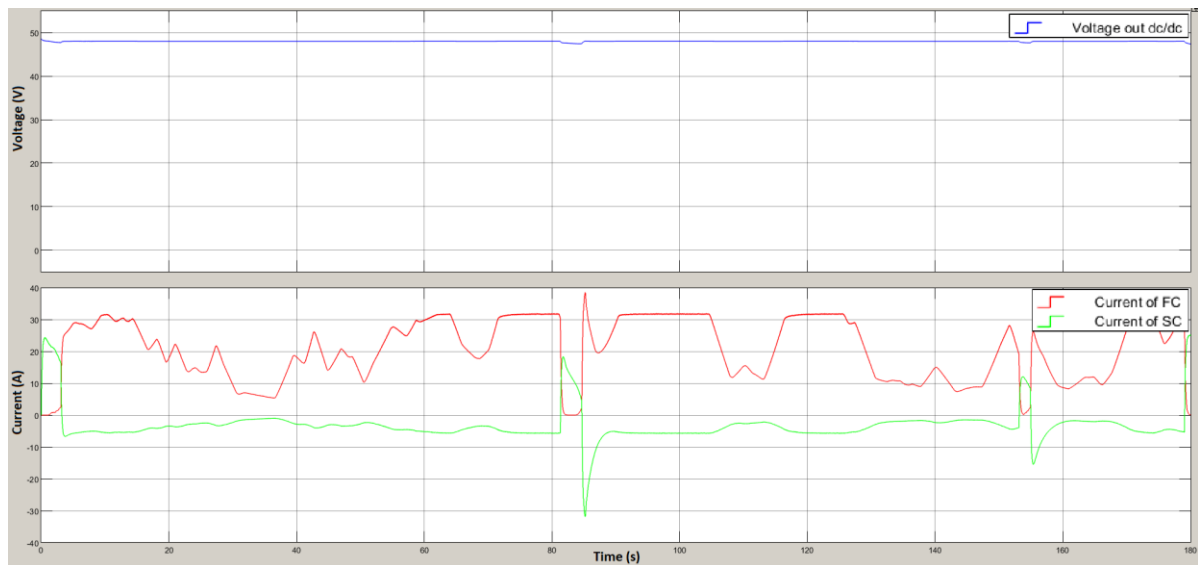
- Κυματομορφή , τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για C= 100 F.



Σχήμα 5-29. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-29 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Η ηλεκτρική τάση έχει μικρή διακύμανση στα επιτρεπτά όρια, ενώ το ρεύμα και η ισχύς δεν ξεφεύγουν από τα όρια εκτός μίας περίπτωσης.

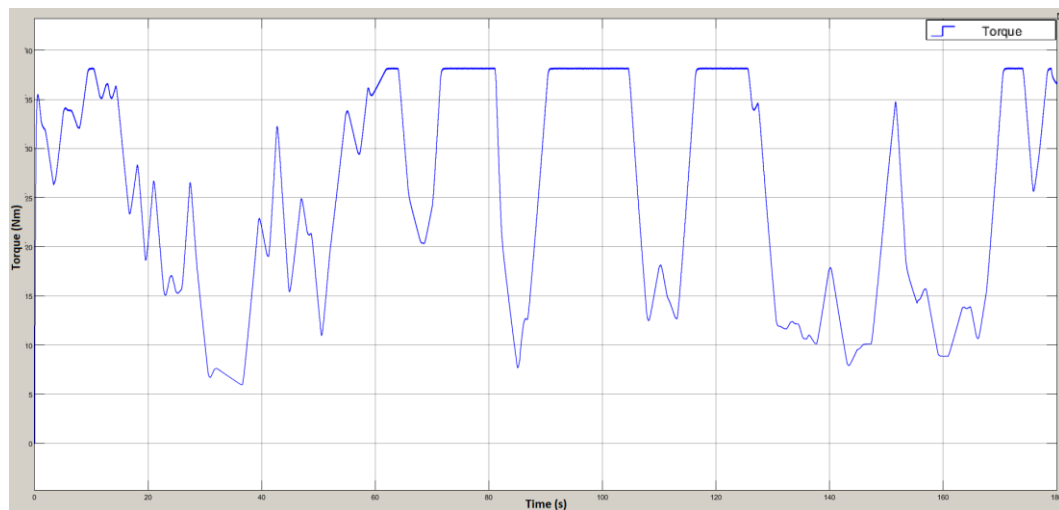
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-30. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-30 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία είναι σταθερή στα 48 V. Το ρεύμα του FC αποδίδεται με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι προκύπτουν παρόμοια λειτουργία με αυτή του σεναρίου I.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



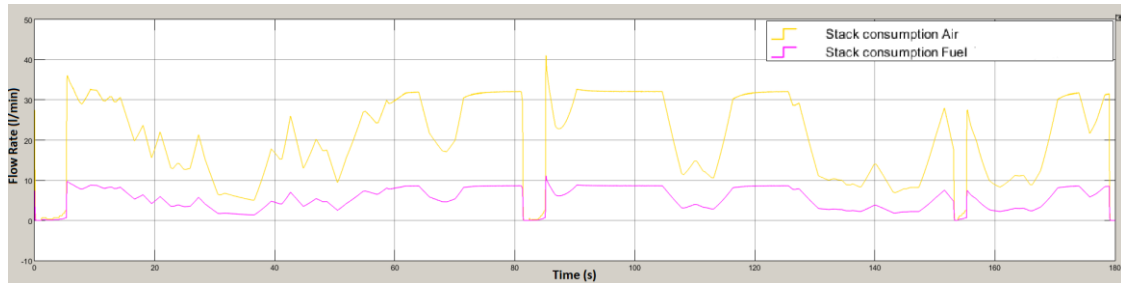
Σχήμα 5-31. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-31 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία κυμαίνεται στα επιτρεπτά όρια με βάση τις τιμές απόδοσης του κινητήρα, όπως αυτές εμφανίζονται στον Πίνακα 3-4.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 4 του σεναρίου I.

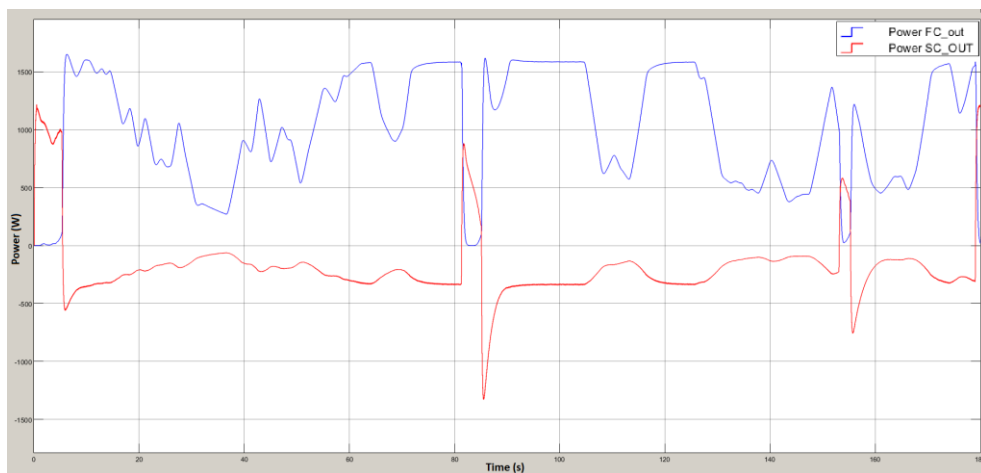
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-32. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-32 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις αλλά λιγότερη κατανάλωση.

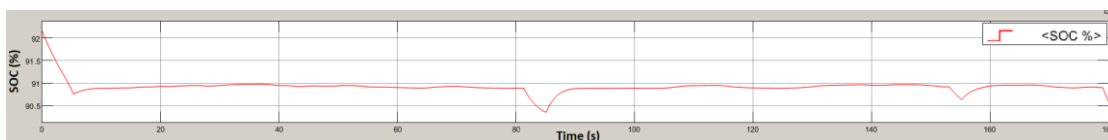
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-33. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-33 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις και η ισχύς του FC αρκετές φορές ξεπερνά τα όρια.

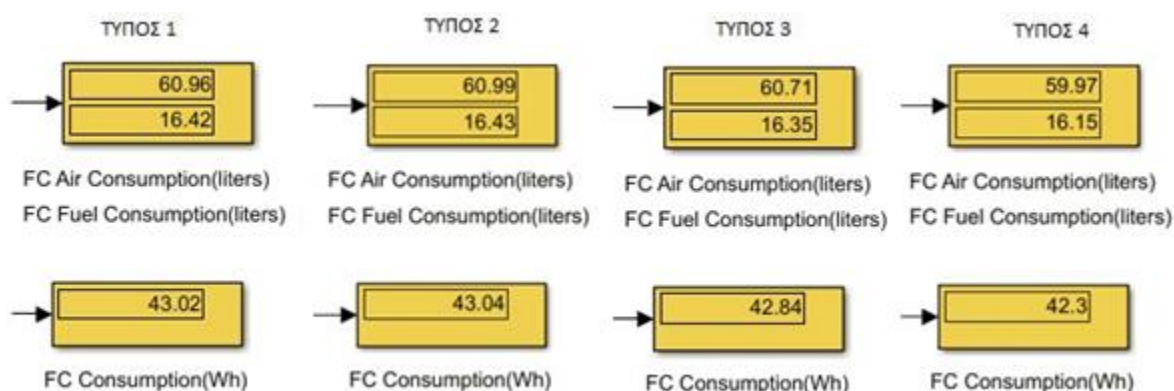
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-34. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-34 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή κοντά στο 91%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο II φαίνονται στο Σχήμα 5-35.



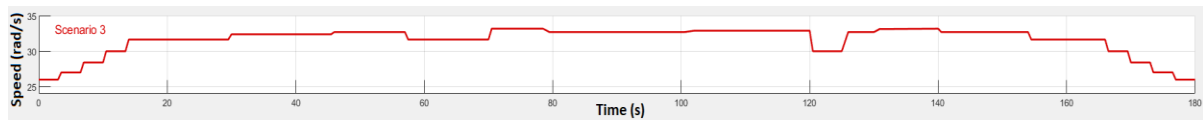
Σχήμα 5-35. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3. Αποτελέσματα σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.34	95.39	16.42	43.02
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.40	94.68	16.43	43.04
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.14	95.53	16.35	42.84
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	1.93	90.59	16.15	42.30

5.1.3 Σενάριο λειτουργίας III

Το τρίτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-36.

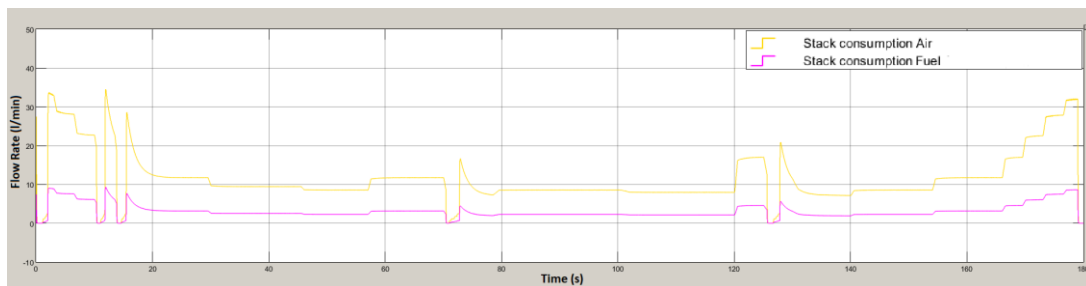


Σχήμα 5-36. Τρίτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1 του σεναρίου Ι.

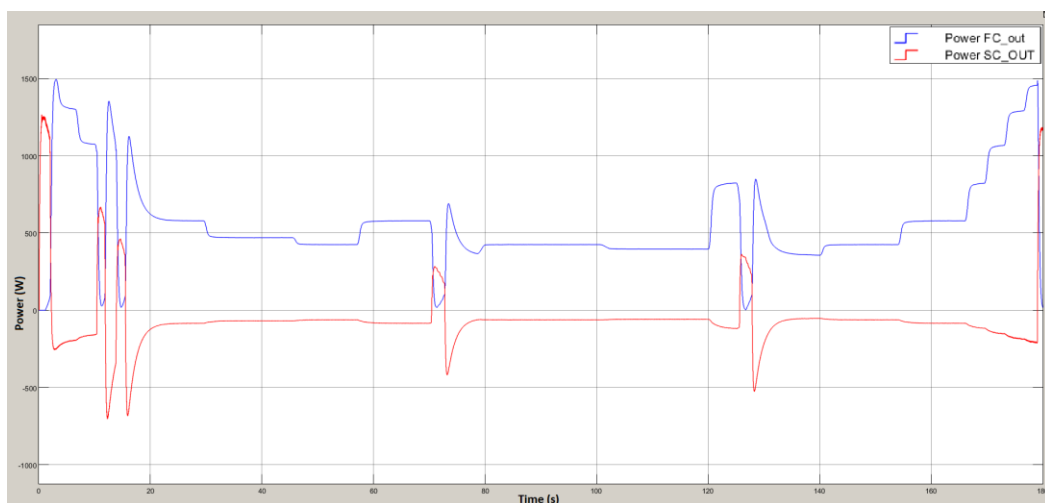
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-37. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-37 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής και στα δύο κυμαίνονται στα επιτρεπτά όρια, αλλά με λιγότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τους ρυθμούς ροής του ίδιου τύπου του σεναρίου Ι.

- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.

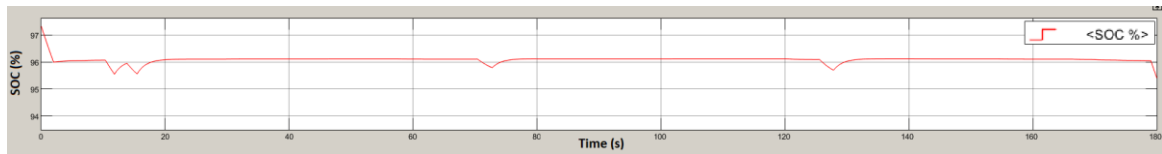


Σχήμα 5-38. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-38 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου

είναι μηδέν στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος και έχει περισσότερες παύσεις λειτουργίας από τον αντίστοιχο τύπο του σεναρίου II.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 77.77$ F.



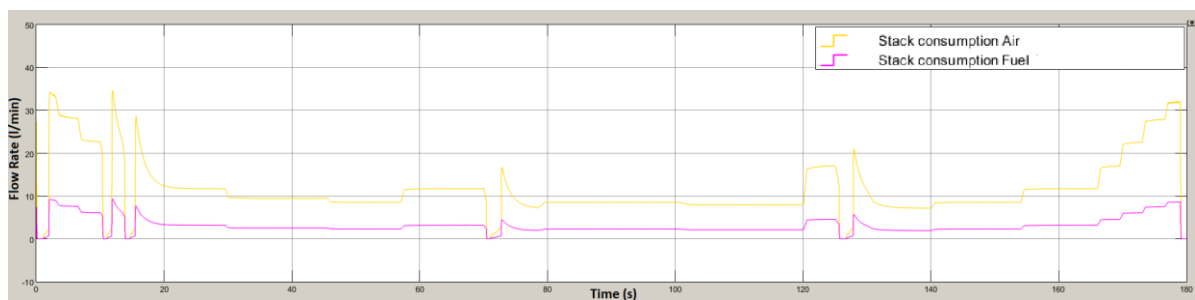
Σχήμα 5-39. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-39 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά εμφανίζει λιγότερες σε ένταση διακυμάνσεις από τον αντίστοιχο τύπο των σεναρίων I και II.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 2 του σεναρίου I.

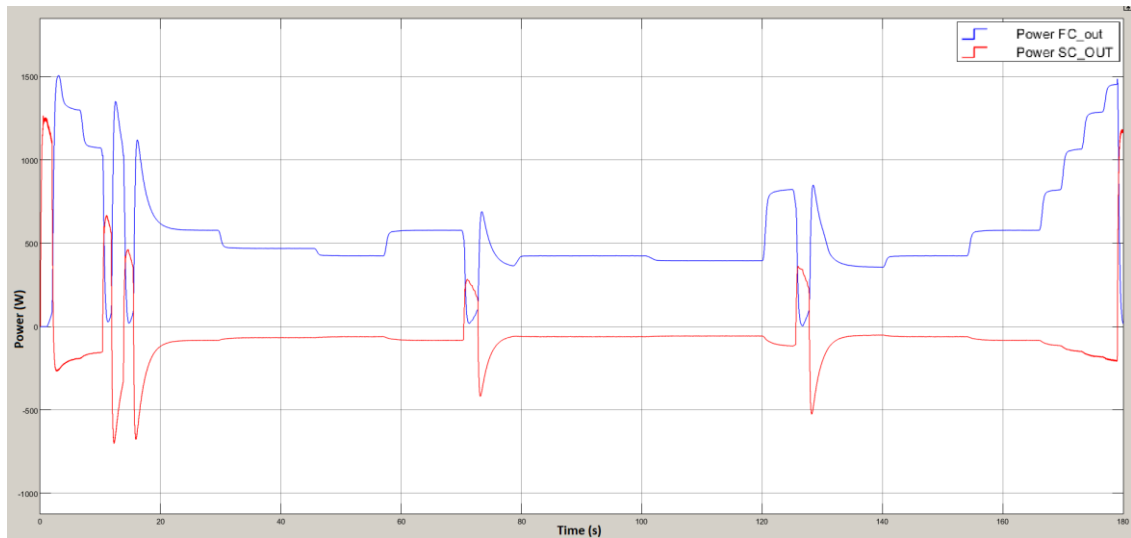
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 75$ F.



Σχήμα 5-40. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-40 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-37 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου.

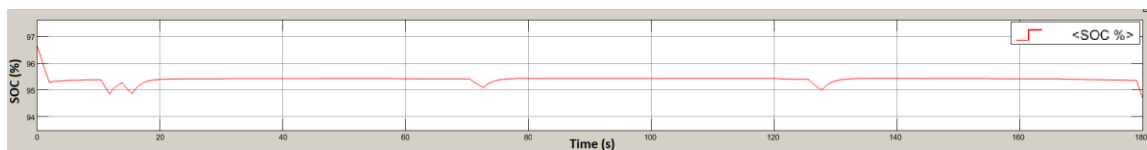
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 75$ F.



Σχήμα 5-41. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-41 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που εμφανίζονται στο Σχήμα 5-38.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 75\text{ F}$.



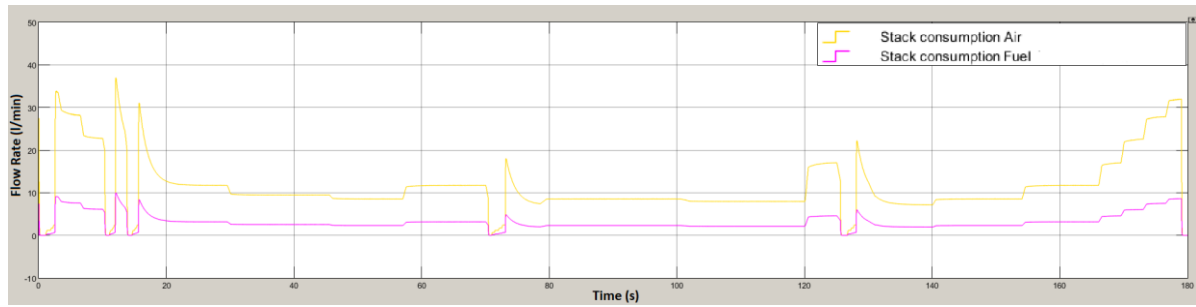
Σχήμα 5-42. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-42 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-39 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.4%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του τύπου 3 του σεναρίου I.

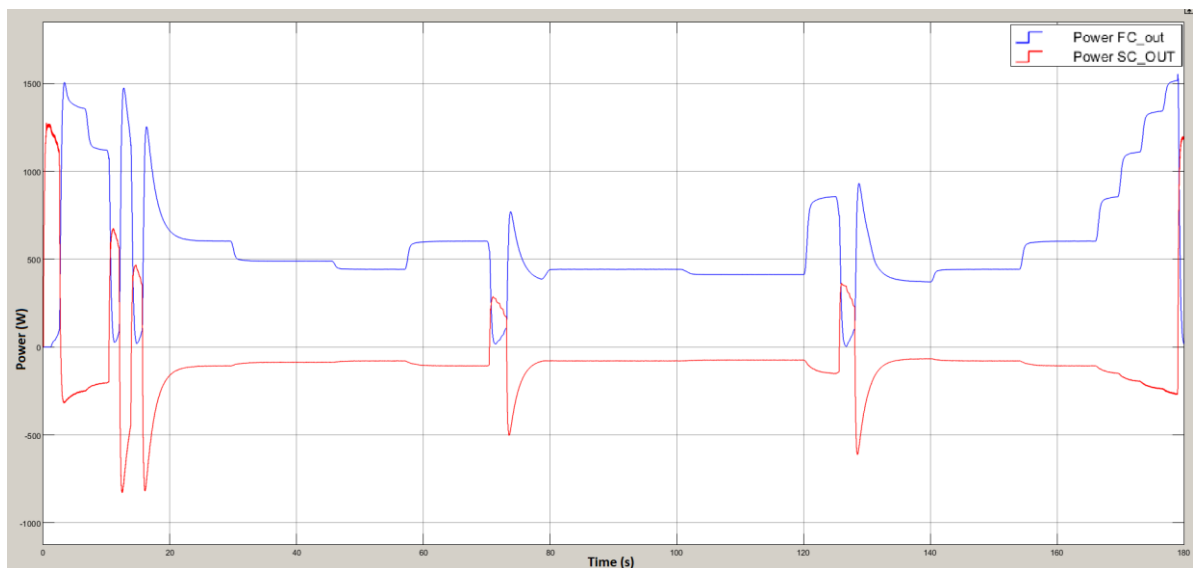
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 100\text{ F}$.



Σχήμα 5-43. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-43 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών δεν εμφανίζονται διαφορές.

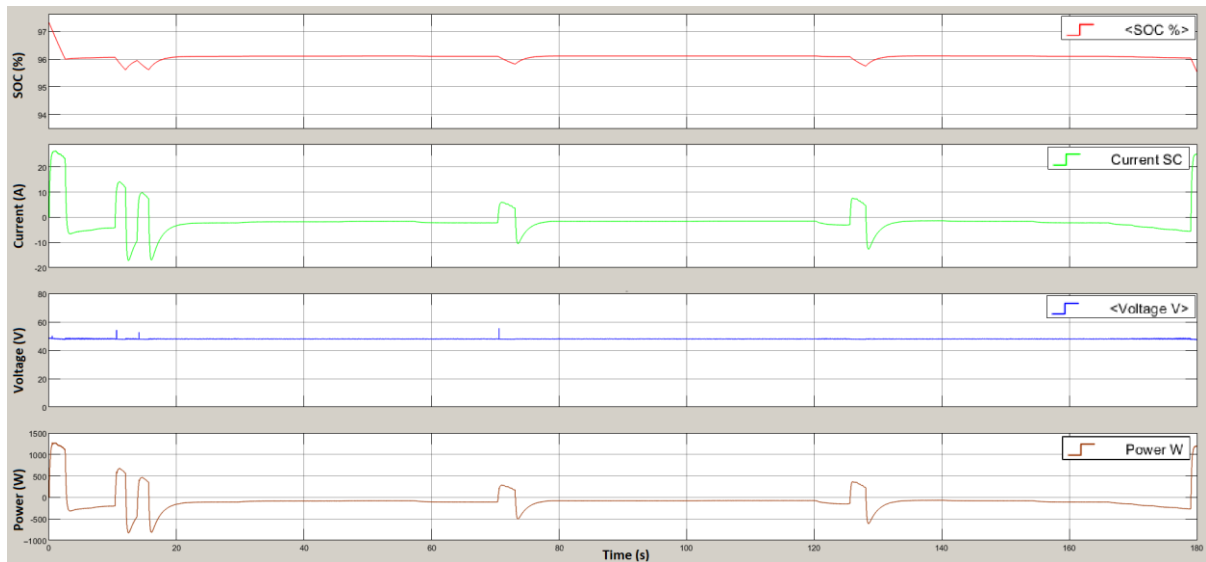
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-44. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-44 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών.

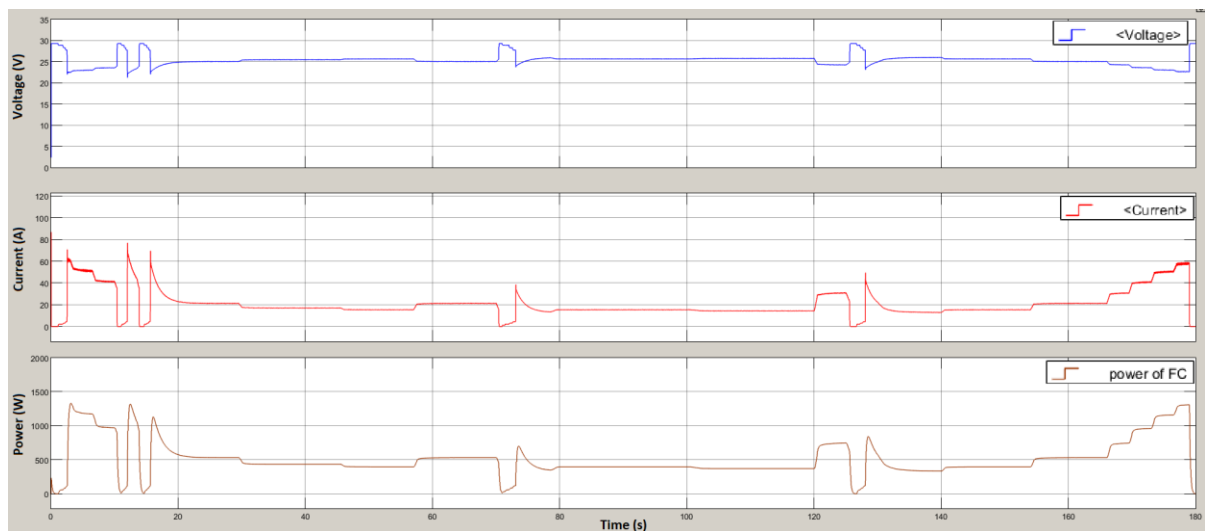
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-45. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-45 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών διότι σταθεροποιείται κοντά στο 96%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν περισσότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τον αντίστοιχο τύπο του σεναρίου II.

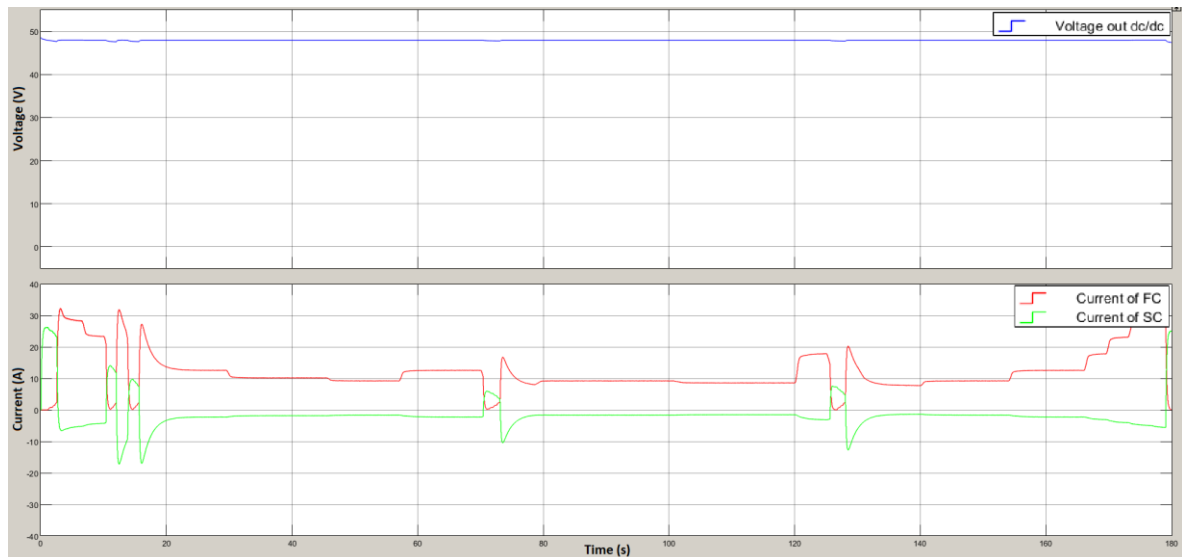
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-46. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-46 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Η ηλεκτρική τάση το ρεύμα και η ισχύς έχουν μικρή διακύμανση στα επιτρεπτά όρια.

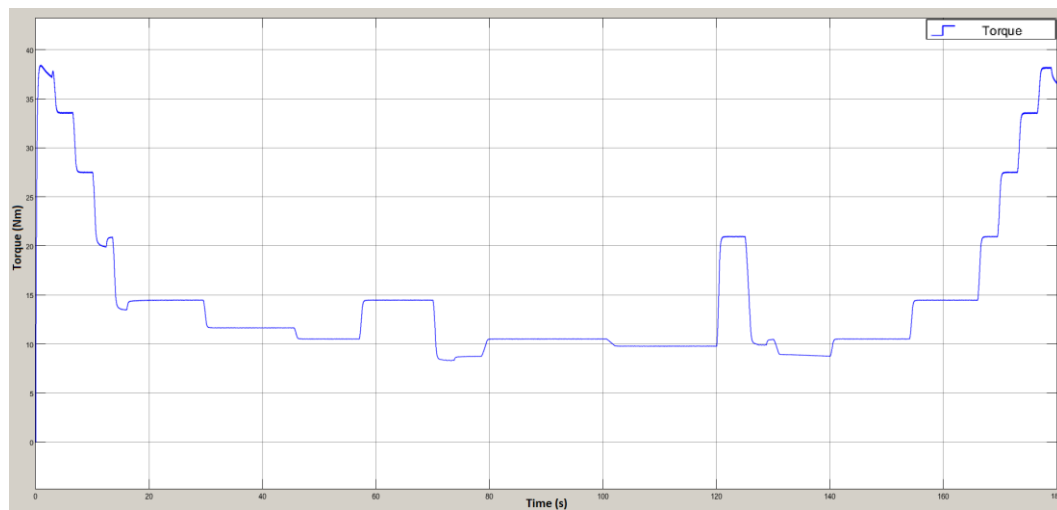
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-47. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-47 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία είναι σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι προκύπτουν παρόμοια λειτουργία με αυτή του σεναρίου I.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



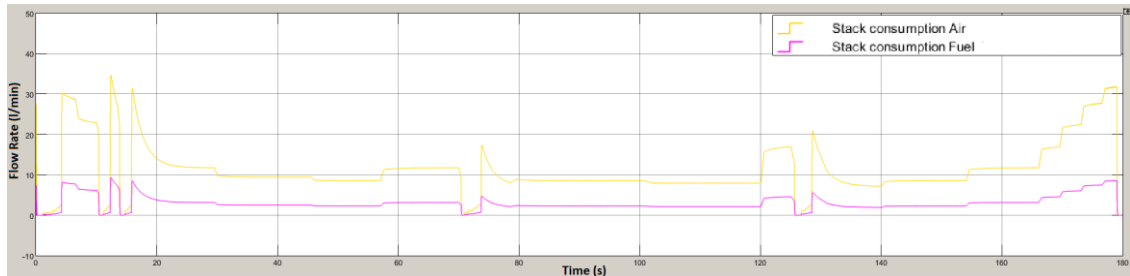
Σχήμα 5-48. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-48 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία κυμαίνεται στα επιτρεπτά όρια με βάση τις τιμές απόδοσης του κινητήρα, όπως αυτές εμφανίζονται στον Πίνακα 3-4.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 4 του σεναρίου I.

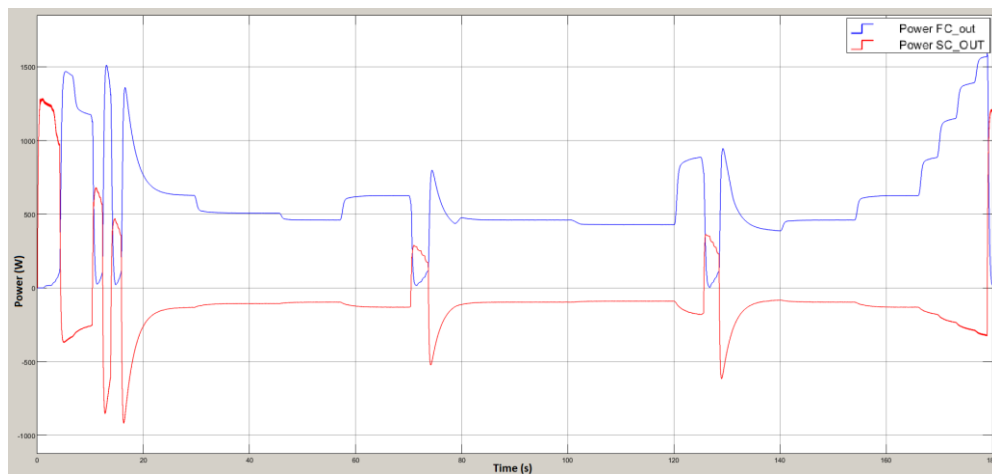
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-49. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-49 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις αλλά λιγότερη κατανάλωση.

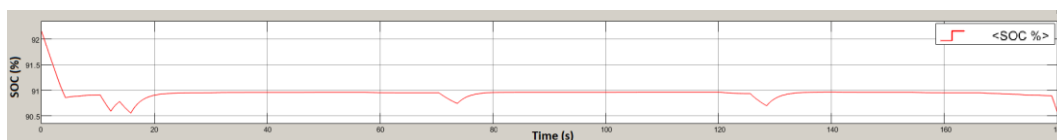
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-50. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-50 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις και η ισχύς του FC ξεπερνά τα όρια μία φορά.

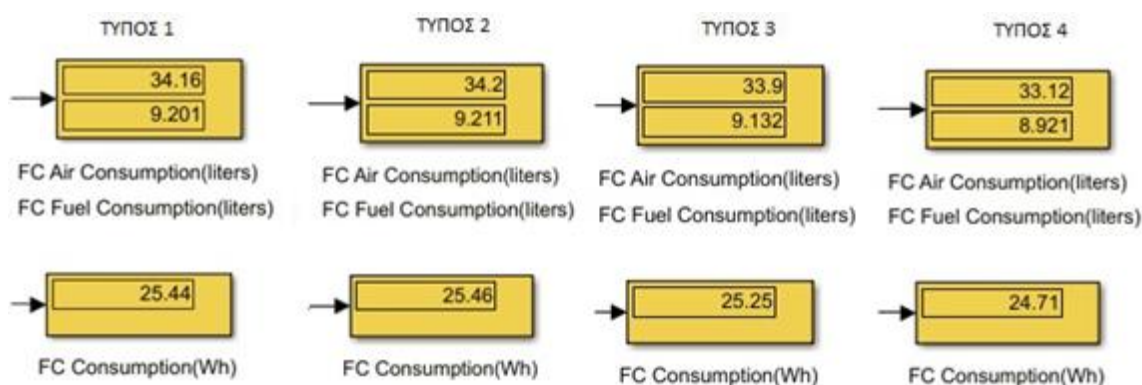
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-51. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-51 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή στο 91%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο III φαίνονται στο Σχήμα 5-52.



Σχήμα 5-52. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του τρίτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-4. Αποτελέσματα σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	1.79	95.39	9.201	25.44
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	1.78	94.68	9.211	25.46
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	1.71	95.53	9.132	25.25
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	1.71	90.58	8.921	24.71

5.2 Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #2

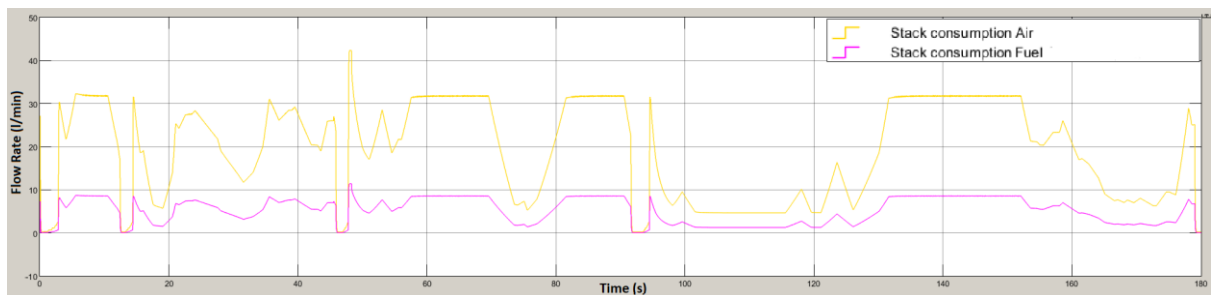
5.2.1 Σενάριο λειτουργίας I

Το πρώτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για της υπερπυκνωτές του τύπου 1, προκύπτουν τρεις κυματομορφές, αυτή του ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου (FC), αυτή της ισχύος της κυψέλης καυσίμου και της ισχύος των υπερπυκνωτών (SC), καθώς και αυτή της κατάστασης φόρτισης των υπερπυκνωτών (SOC%).

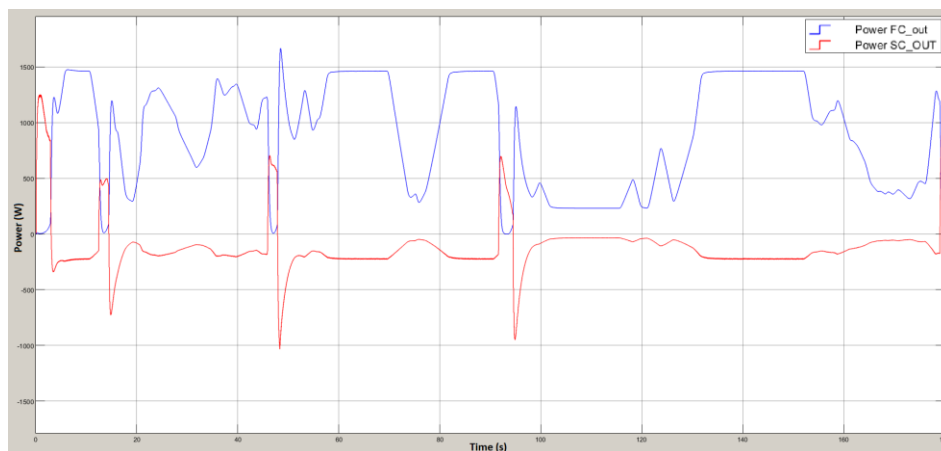
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 77.77$ F.



Σχήμα 5-53. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-53 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τους αντίστοιχους ρυθμούς του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

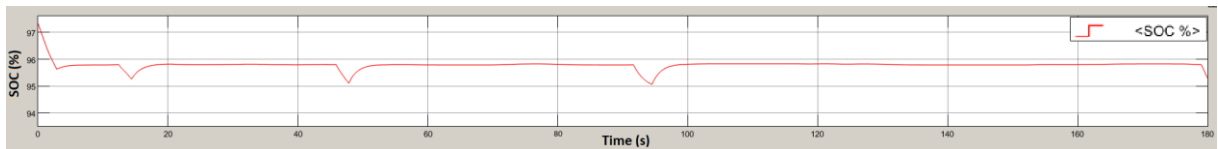
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 77.77$ F.



Σχήμα 5-54. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και ισχύς υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-54 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου εμφανίζει πιο έντονες διακυμάνσεις από την αντίστοιχη ισχύ του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 77.77 \text{ F}$.



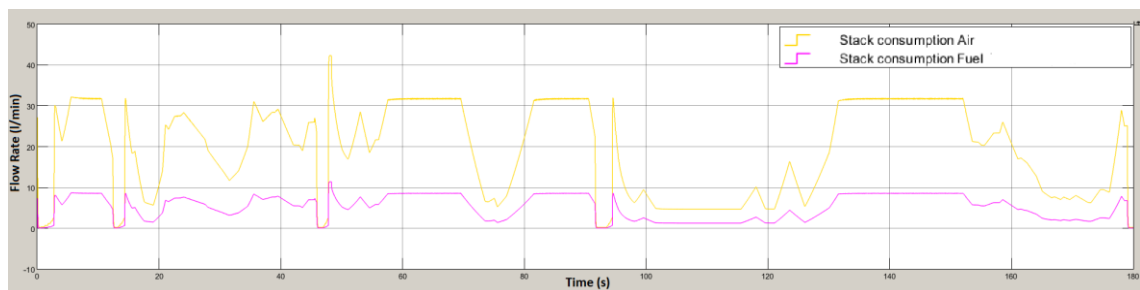
Σχήμα 5-55. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-55 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι έχει τον ίδιο αριθμό διακυμάνσεων με την αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1, αλλά γενικά παραμένει σχεδόν σταθερή στο 95.8%.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για της υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι της τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1.

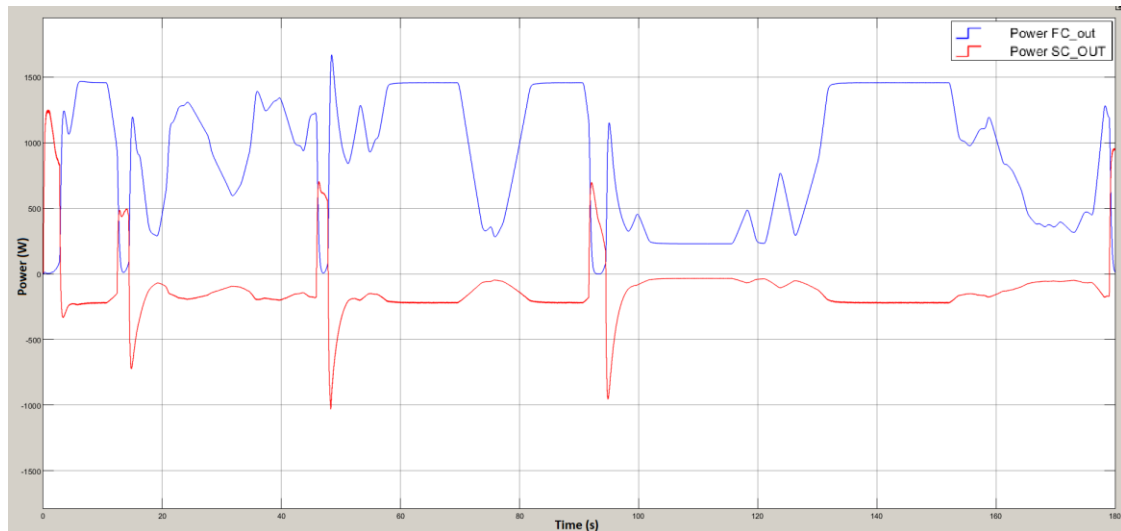
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 75 \text{ F}$.



Σχήμα 5-56. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-56 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-53 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου.

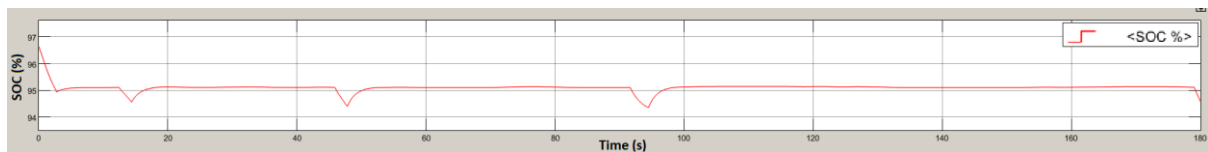
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 75 \text{ F}$.



Σχήμα 5-57. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-57 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που εμφανίζονται στο Σχήμα 5-54.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 75 \text{ F}$.



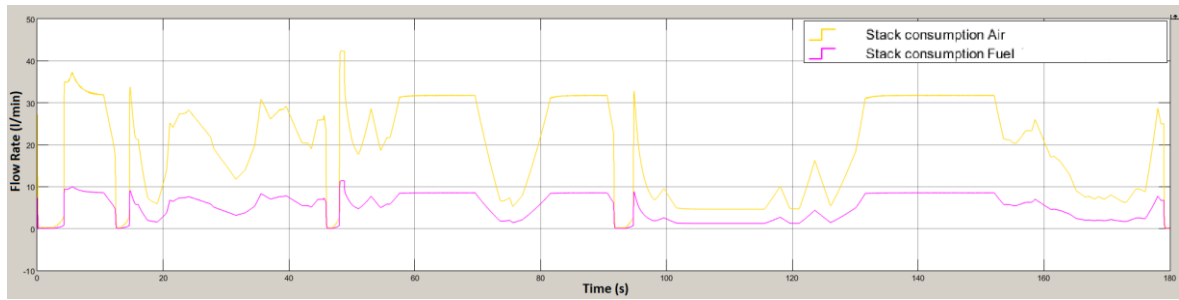
Σχήμα 5-58. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-58 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-55 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για της υπερπυκνωτές του τύπου 3, εκτός από της τρεις κυματομορφές μελετώνται και αυτές α) της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου του κινητήρα, β) της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος FC, γ) της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC, δ) της τάσης εισόδου του κινητήρα και των ρευμάτων FC και SC και ε) της ροπής του κινητήρα.

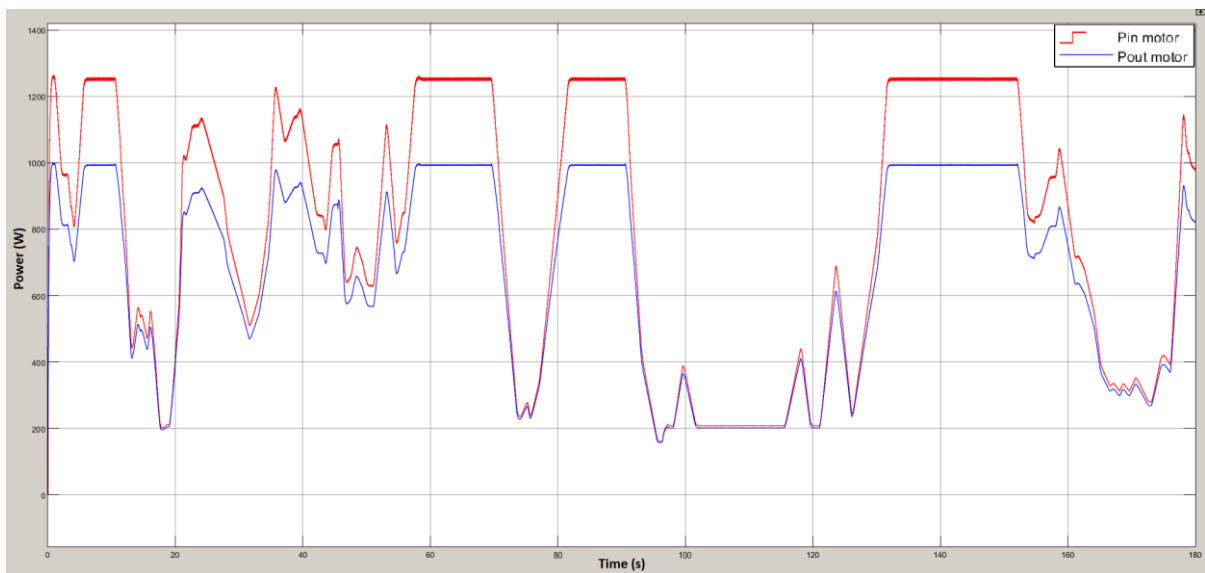
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-59. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-59 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Της φαίνεται, σε σχέση με της τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2, δεν εμφανίζονται διαφορές.

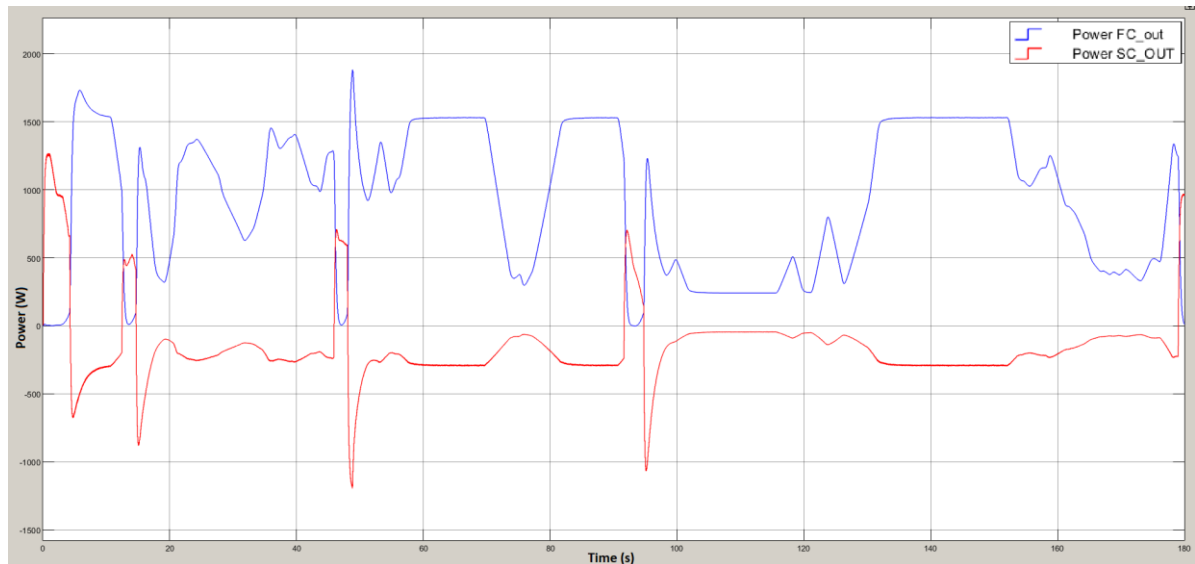
- Κυματομορφή ισχύος εισόδου και εξόδου του κινητήρα για C= 100 F.



Σχήμα 5-60. Ισχύς εισόδου και εξόδου του κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-60 παρουσιάζει την ισχύ εισόδου με κόκκινο χρώμα και την ισχύ εξόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

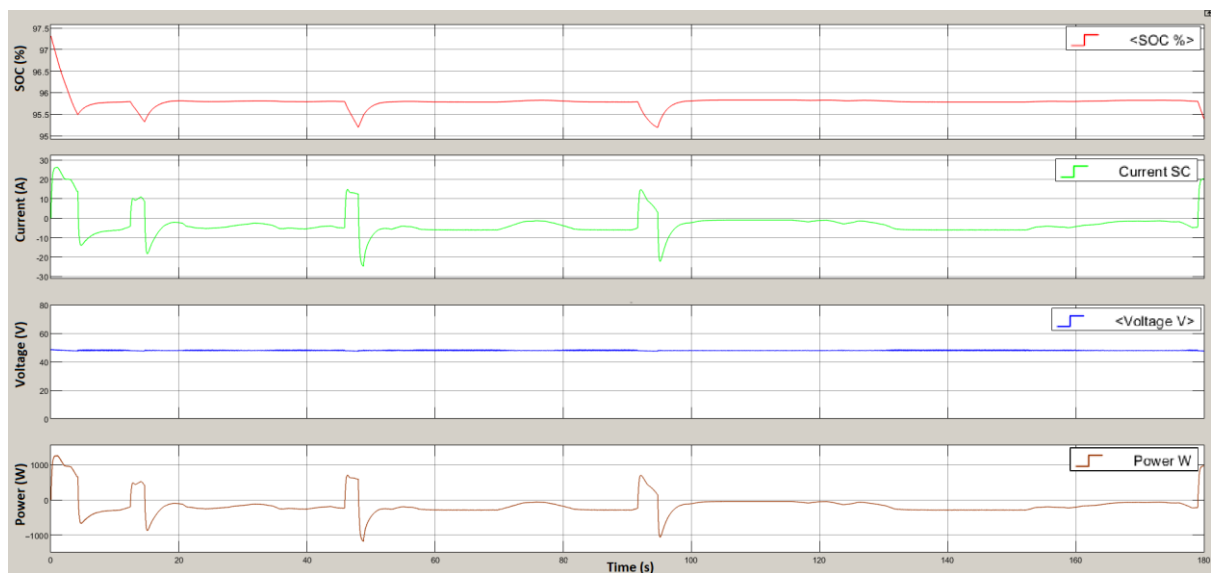
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-61. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-61 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για C= 100 F.

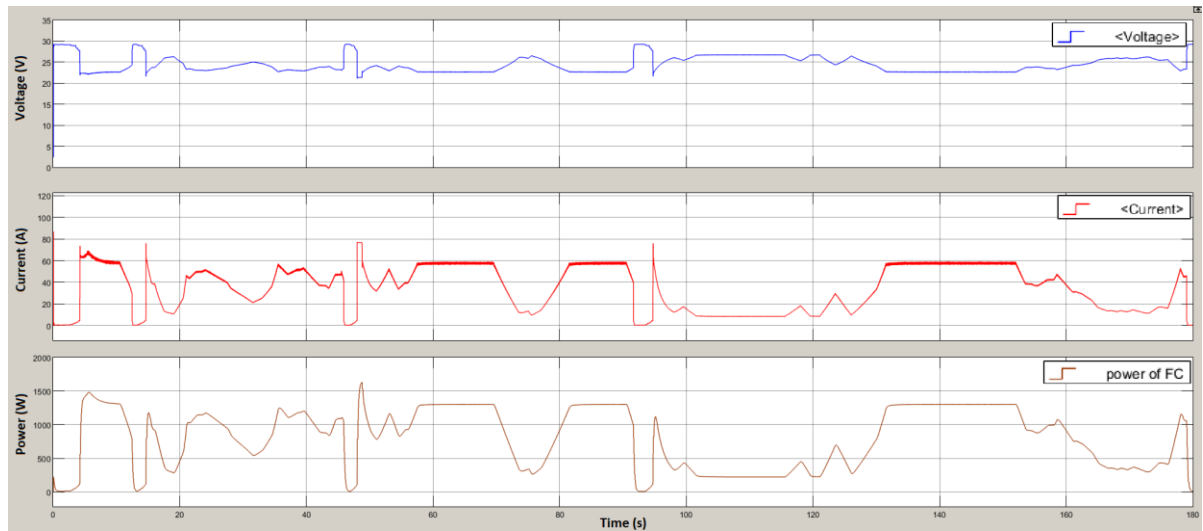


Σχήμα 5-62. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-62 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών γιατί ενώ σταθεροποιείται κοντά στο 95.7% οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Της, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς έχουν και θετικές και

αρνητικές τιμές. Το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα σε σχέση με της αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

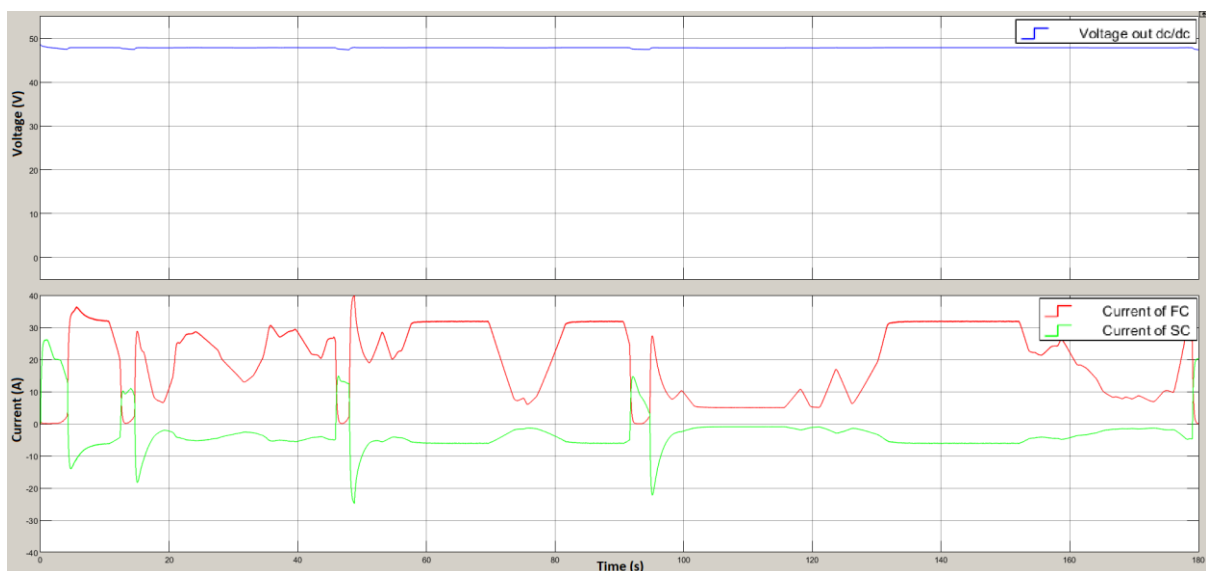
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-63. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-63 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης υδρογόνου με καφέ. Παρατηρείται ότι το ρεύμα και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα από της αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

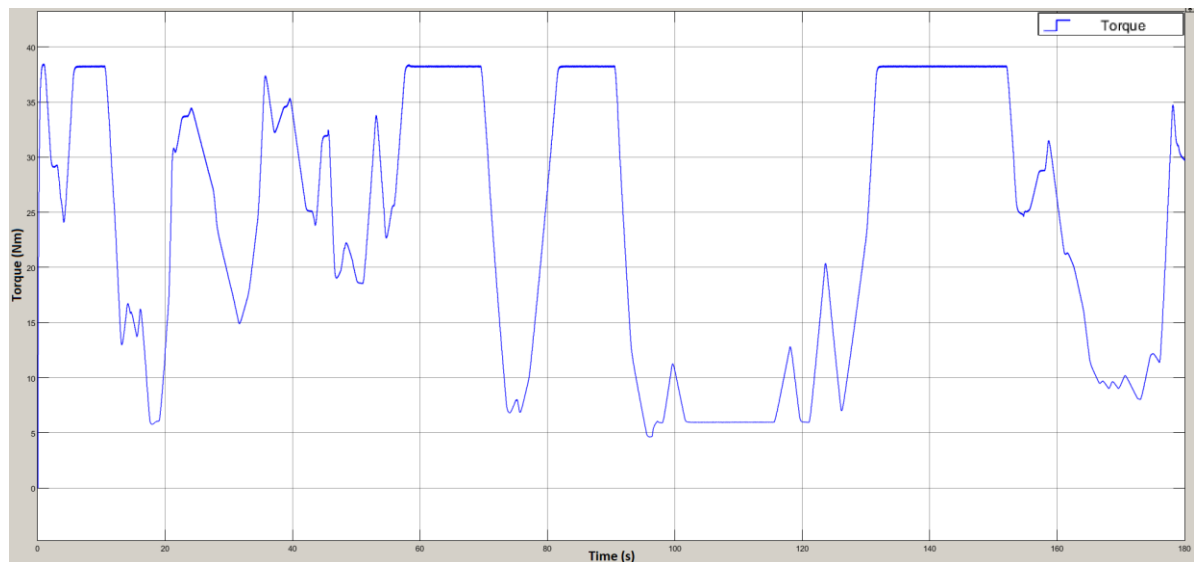
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-64. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-64 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία εμφανίζεται σταθερή στα 48 V. Της παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Στα ρεύματα εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις από της αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100$ F.



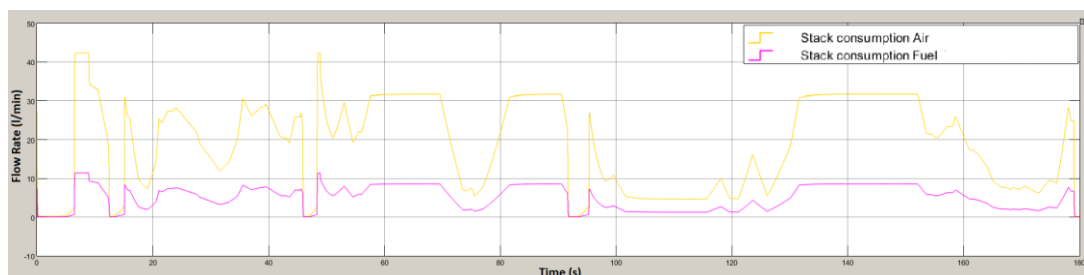
Σχήμα 5-65. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-65 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα. Εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου ενέργειας #1.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για της υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι της τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1.

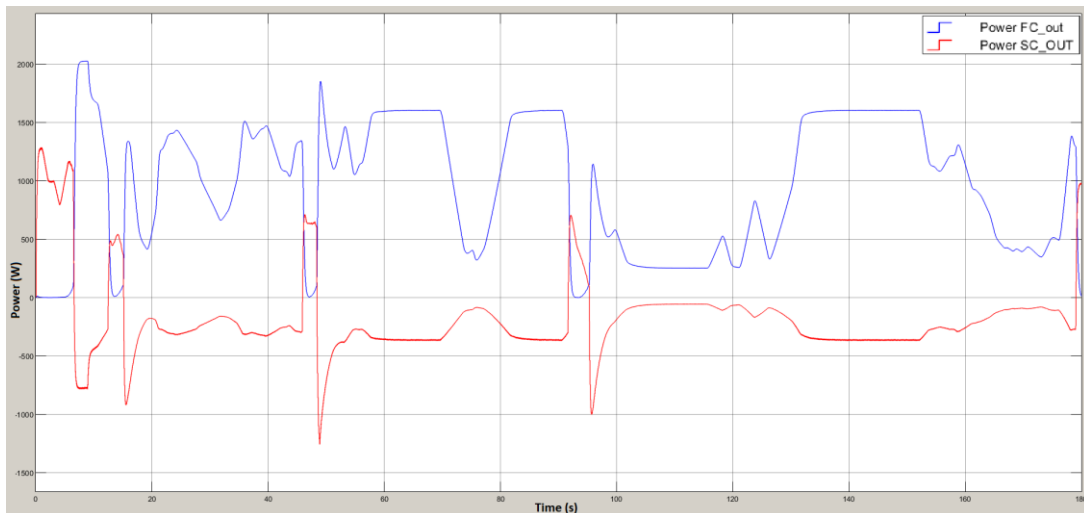
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 166.66$ F.



Σχήμα 5-66. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-66 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Σε σχέση με της υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις αλλά λιγότερη κατανάλωση.

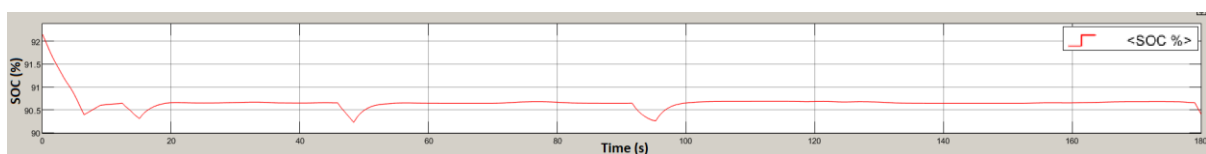
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-67. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-67 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι, σε σχέση με της προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγορίθμου ενέργειας #2, εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις.

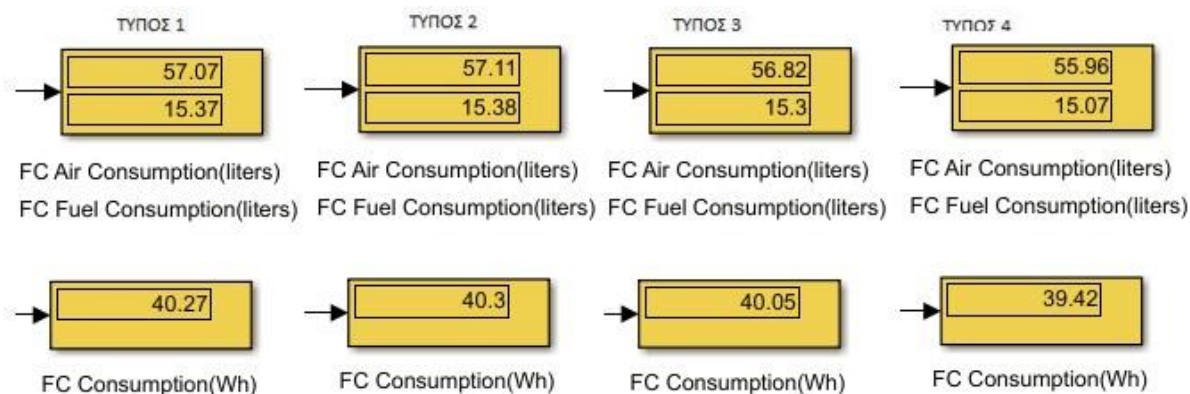
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-68. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-68 απεικονίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και της επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή κοντά στο 90.6%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο I φαίνονται στο Σχήμα 5-69.



Σχήμα 5-69. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5.

Πίνακας 5-5. Αποτελέσματα σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.3	95.27	15.37	40.27
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.33	94.57	15.38	40.3
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.16	95.38	15.3	40.05
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	2.04	90.41	15.07	39.42

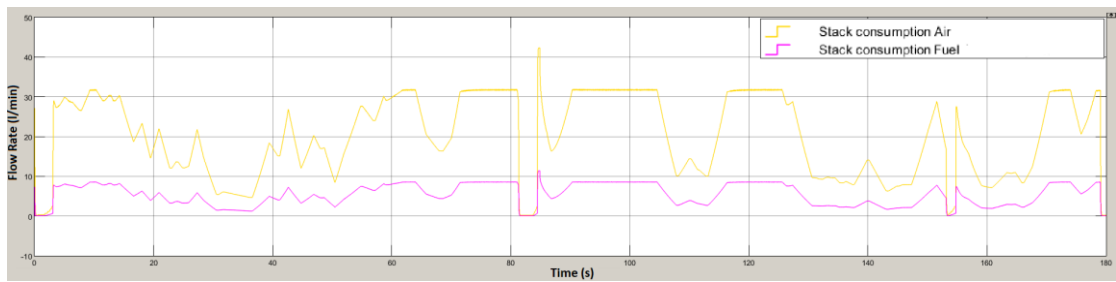
5.2.2 Σενάριο λειτουργίας II

Το δεύτερο σενάριο λειτουργίας του οχήματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1 του σεναρίου I.

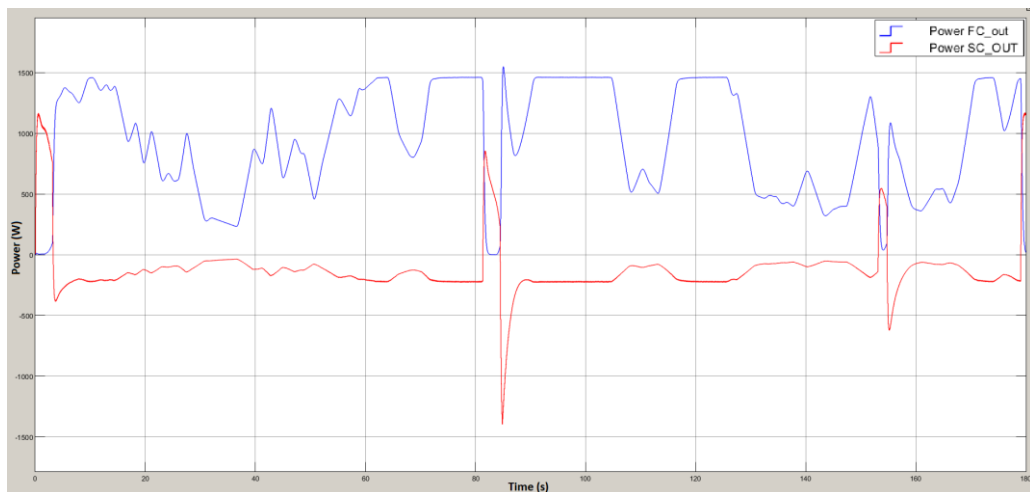
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-70. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-70 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός ροής υδρογόνου και αέρα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα από τον αντίστοιχο ρυθμό του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

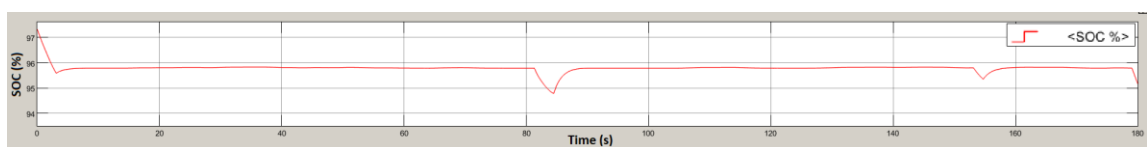
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-71. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-71 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει σχεδόν ίδιες τιμές με την αντίστοιχη ισχύ του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-72. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

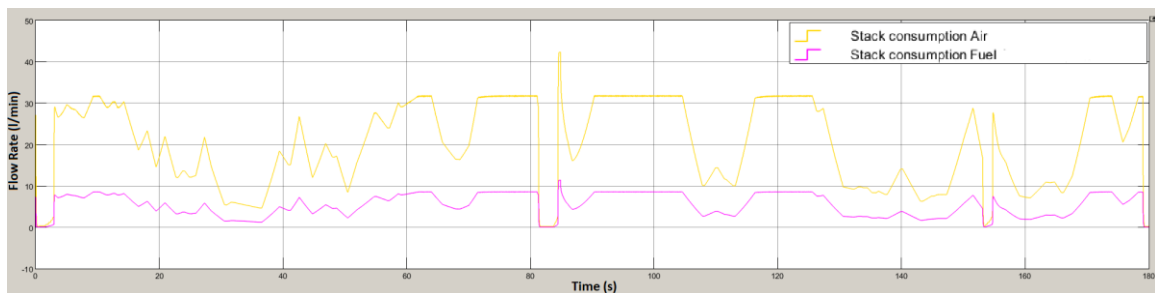
Το Σχήμα 5-72 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι έχει τον ίδιο αριθμό διακυμάνσεων με την αντίστοιχη κατάσταση

φόρτισης του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 2 του σεναρίου Ι.

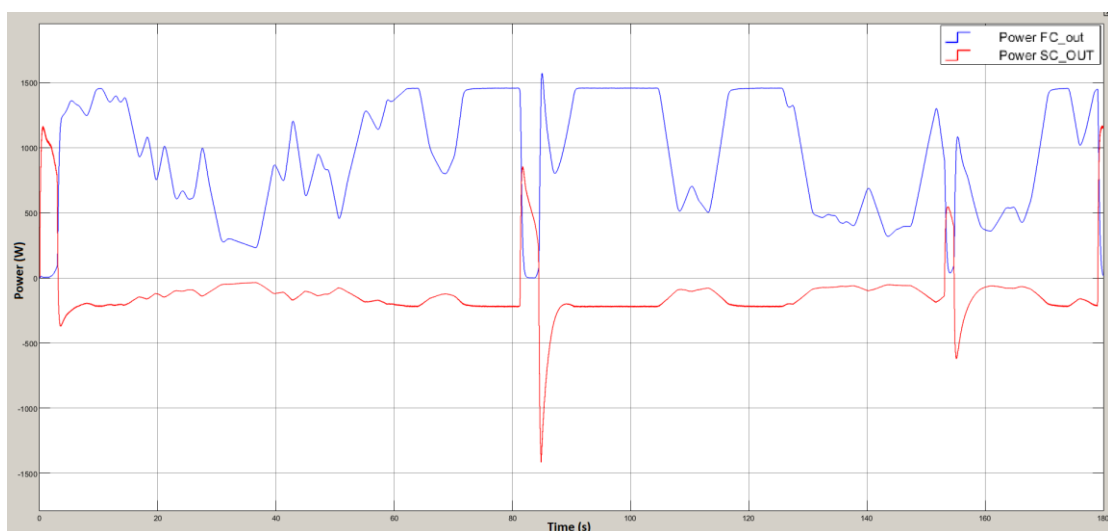
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 75 F.



Σχήμα 5-73. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-73 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-70 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου.

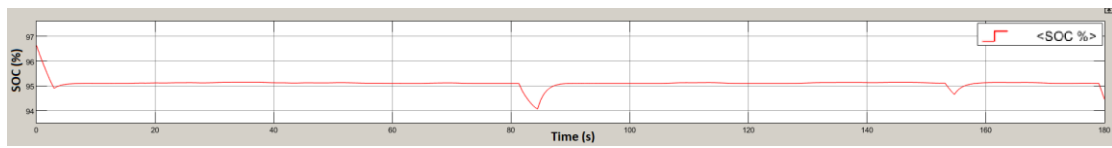
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 75 F.



Σχήμα 5-74. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-74 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά στο Σχήμα 5-71.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 75 F.



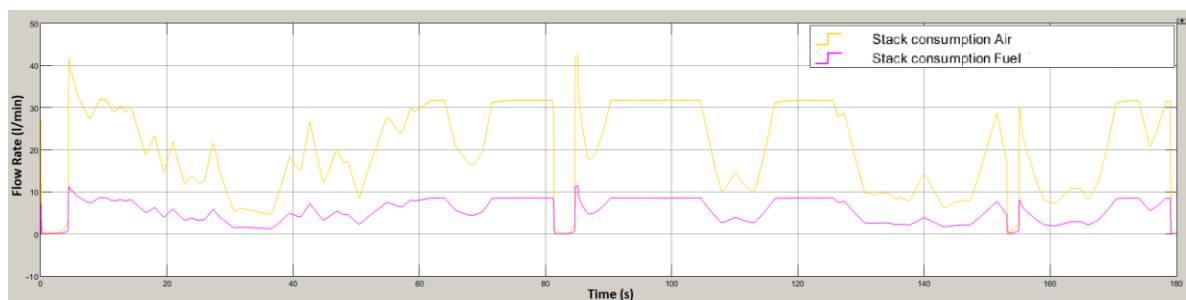
Σχήμα 5-75. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-75 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-72 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.1%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του τύπου 3 του σεναρίου I.

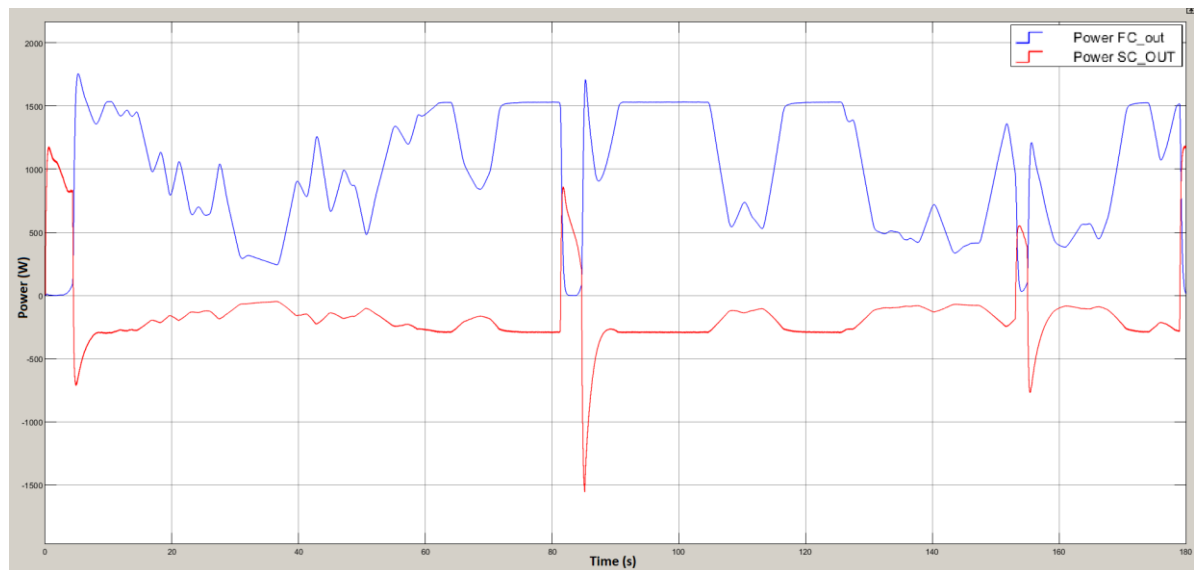
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 100 F.



Σχήμα 5-76. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-76 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου II του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2, δεν προκύπτουν διαφορές.

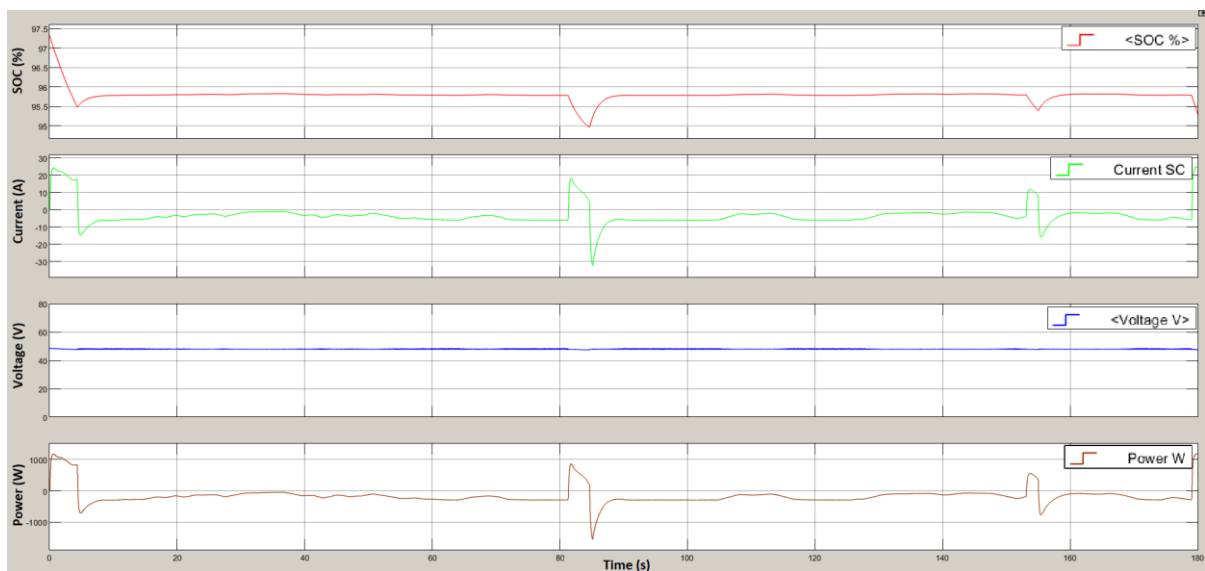
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-77. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-77 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών του ίδιου σεναρίου.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για $C = 100 \text{ F}$.

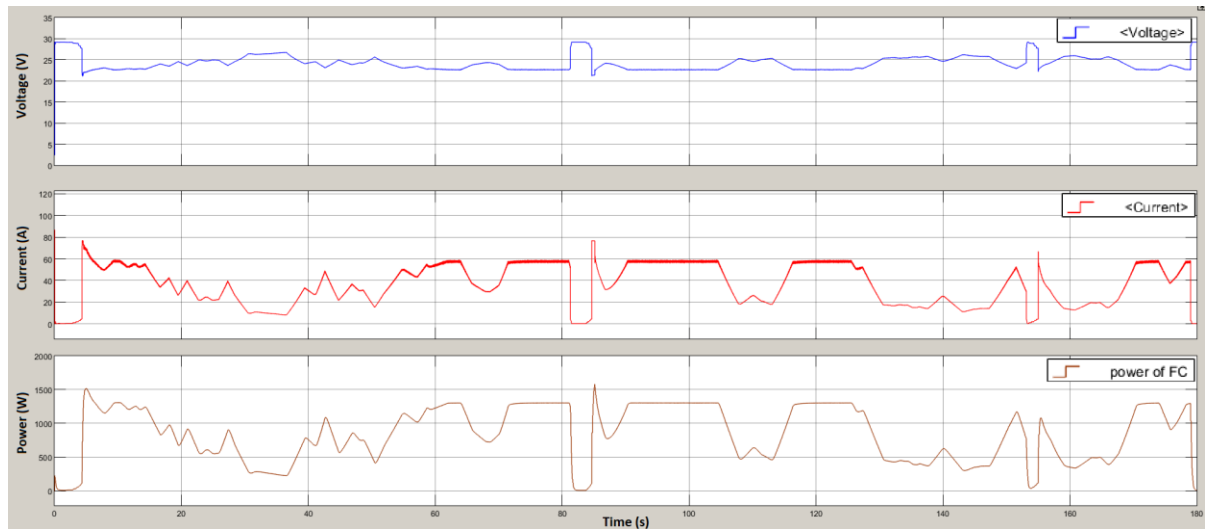


Σχήμα 5-78. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-78 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των υπερπυκνωτών τύπου 2 του σεναρίου II του αλγορίθμου ενέργειας #2 διότι σταθεροποιείται κοντά στο 95.7%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν ίδιο αριθμό διακυμάνσεων σε σχέση με τις

αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

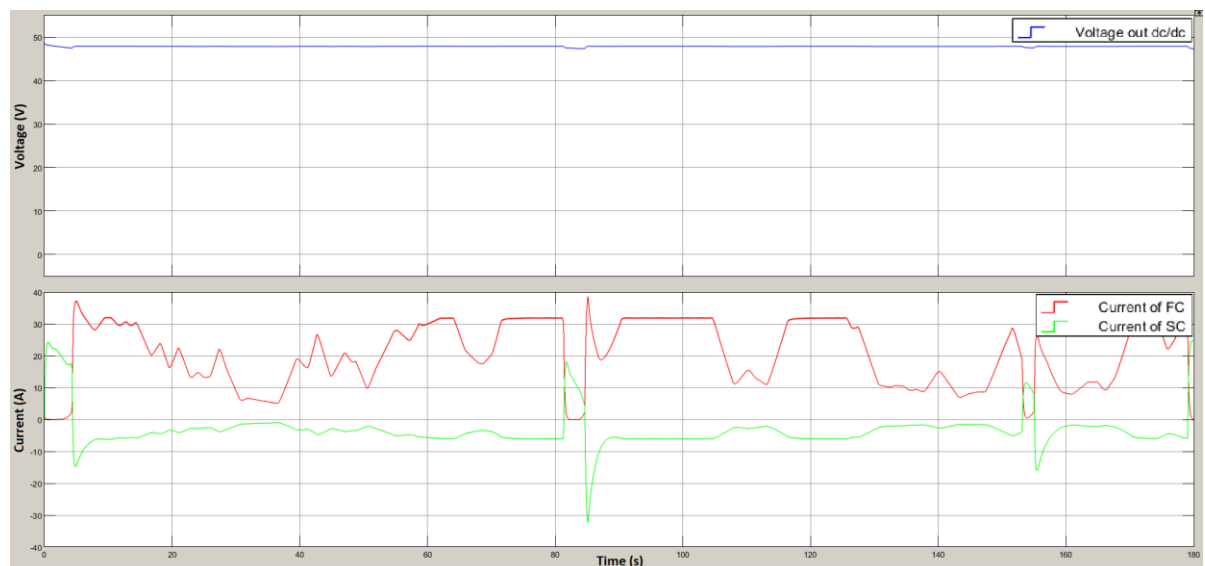
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-79. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-79 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Παρατηρείται ότι το ρεύμα και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει πιο έντονες διακυμάνσεις κατά την εκκίνηση από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.

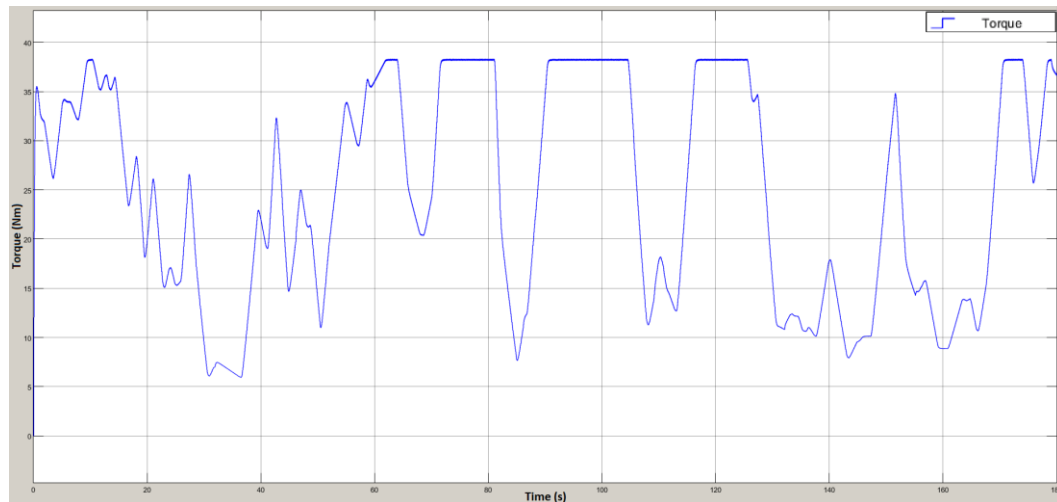


Σχήμα 5-80. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-80 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία είναι σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το

ρεύμα του SC με πράσινο. Τα ρεύματα εμφανίζουν τον ίδιο αριθμό διακυμάνσεων από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



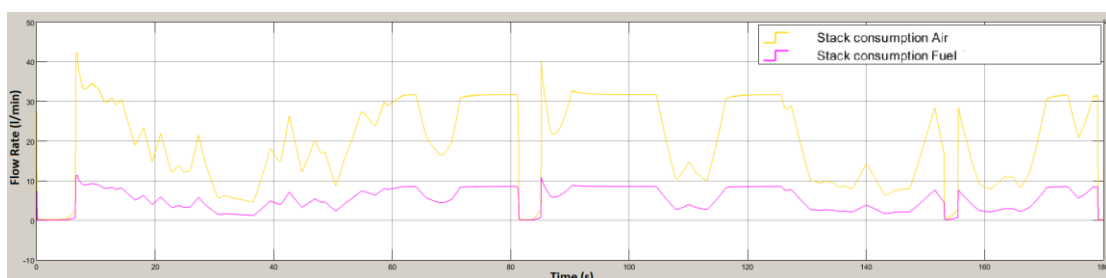
Σχήμα 5-81. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-81 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα. Εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας I.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 4 του σεναρίου I.

- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 166.66 \text{ F}$.

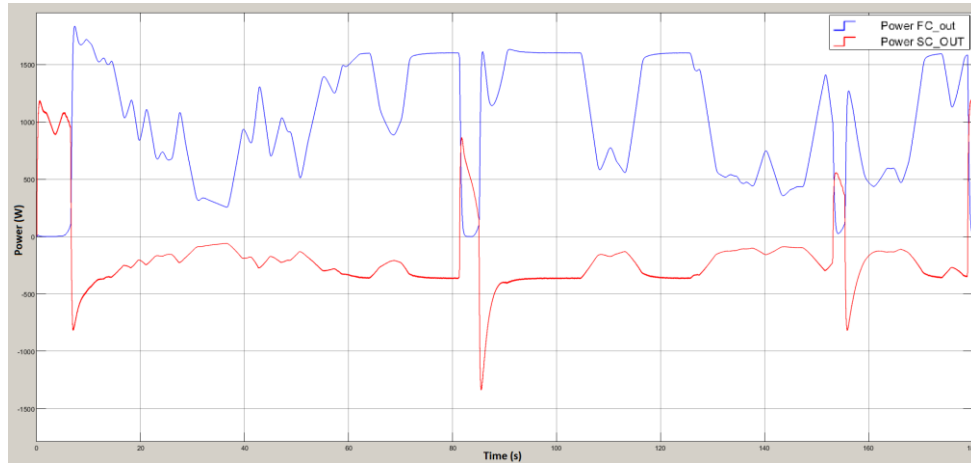


Σχήμα 5-82. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-82 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του

σεναρίου II του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2, αλλά λιγότερη κατανάλωση καυσίμου.

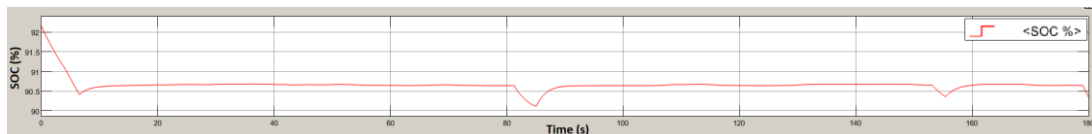
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-83. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-83 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου II του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2 εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις.

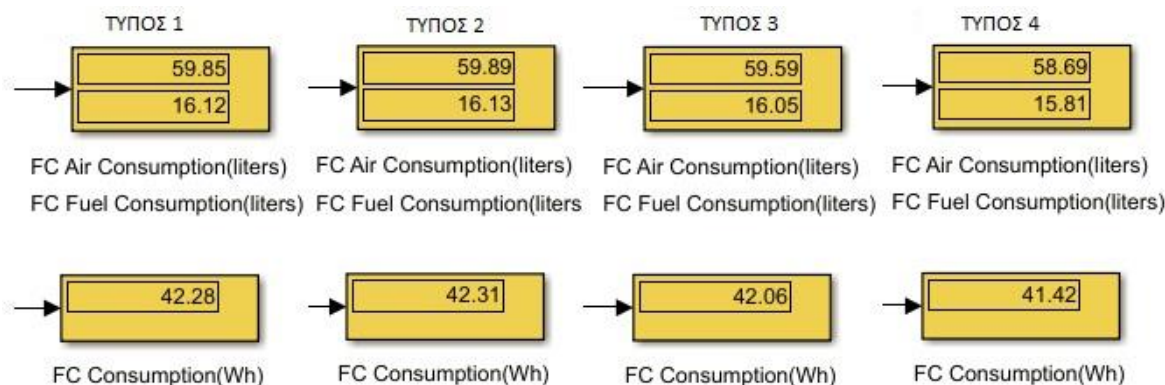
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-84. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-84 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή κοντά στο 90.7%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο I φαίνονται στο Σχήμα 5-85.



Σχήμα 5-85. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-6.

Πίνακας 5-6. Αποτελέσματα σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.58	95.15	16.12	42.28
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.64	94.43	16.13	42.31
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.37	95.28	16.05	42.06
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	2.17	90.34	15.81	41.42

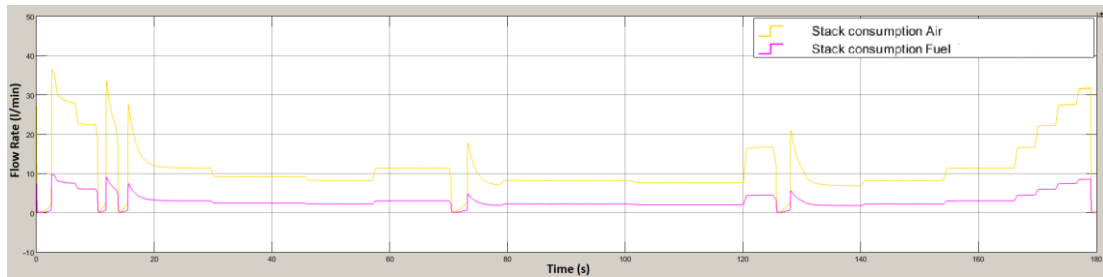
5.2.3 Σενάριο λειτουργίας III

Το τρίτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-36.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1 του σεναρίου I.

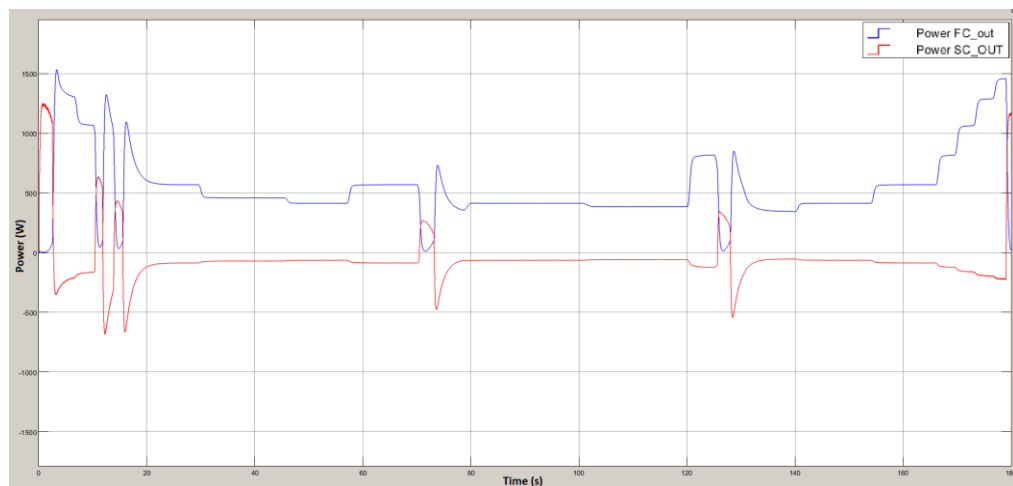
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-86. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-86 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τους αντίστοιχους ρυθμούς του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

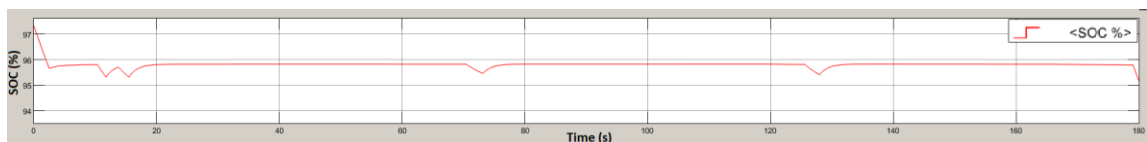
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-87. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-87 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει τον ίδιο αριθμό παύσεων λειτουργίας με την αντίστοιχη ισχύ του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-88. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

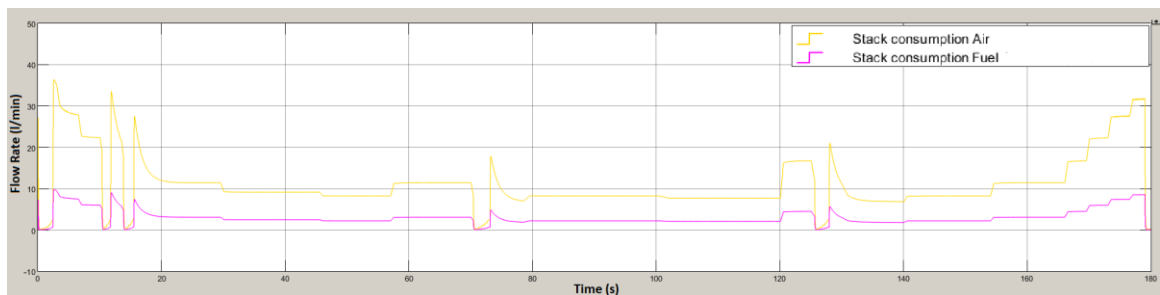
Το Σχήμα 5-88 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι έχει τον ίδιο αριθμό διακυμάνσεων με την αντίστοιχη κατάσταση

φόρτισης του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1, αλλά γενικά παραμένει σχεδόν σταθερή στα 95.9%.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 2 του σεναρίου Ι.

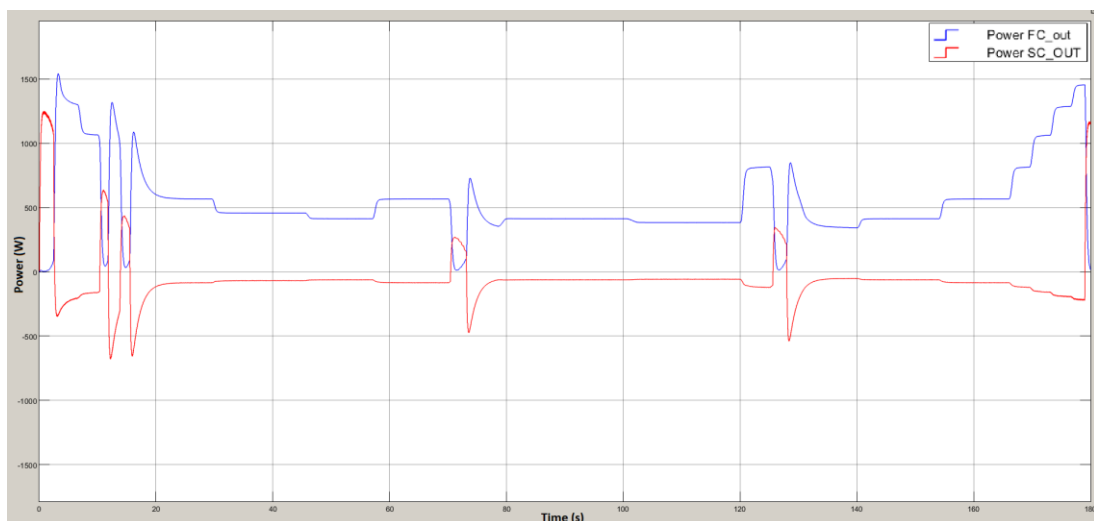
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 75 F.



Σχήμα 5-89. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-89 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-86, οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν άλλαξαν σχεδόν καθόλου.

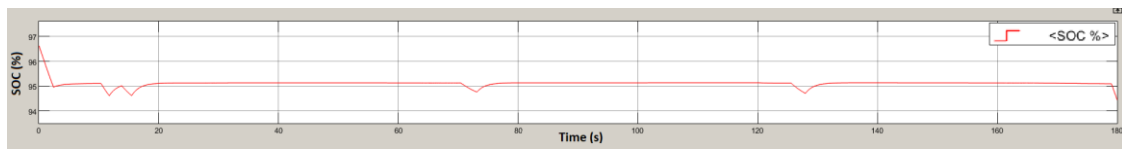
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 75F.



Σχήμα 5-90. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-90 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά στο Σχήμα 5-87.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 75 F.



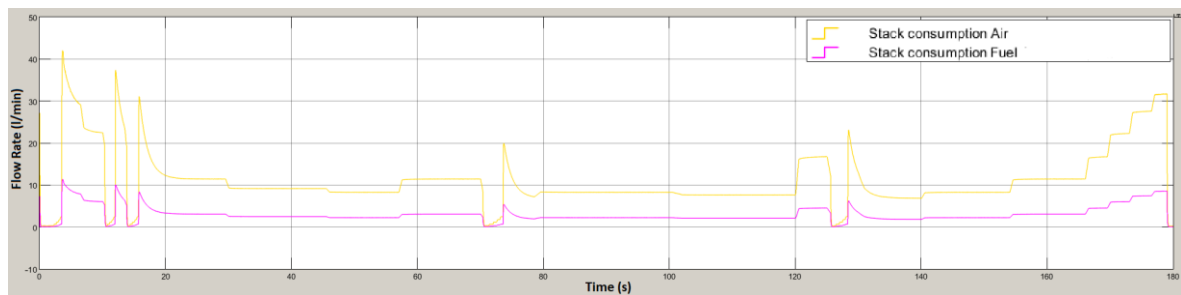
Σχήμα 5-91. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-91 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-88 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.1%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του τύπου 3 του σεναρίου I.

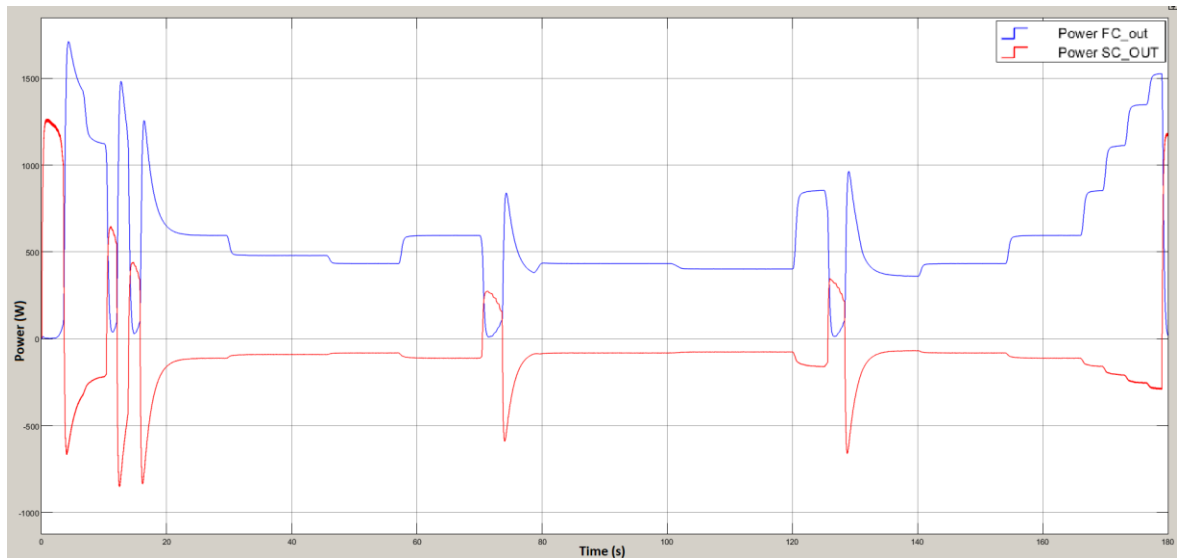
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 100 F.



Σχήμα 5-92. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-92 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα(l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου III του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2, δεν εμφανίζονται διαφορές.

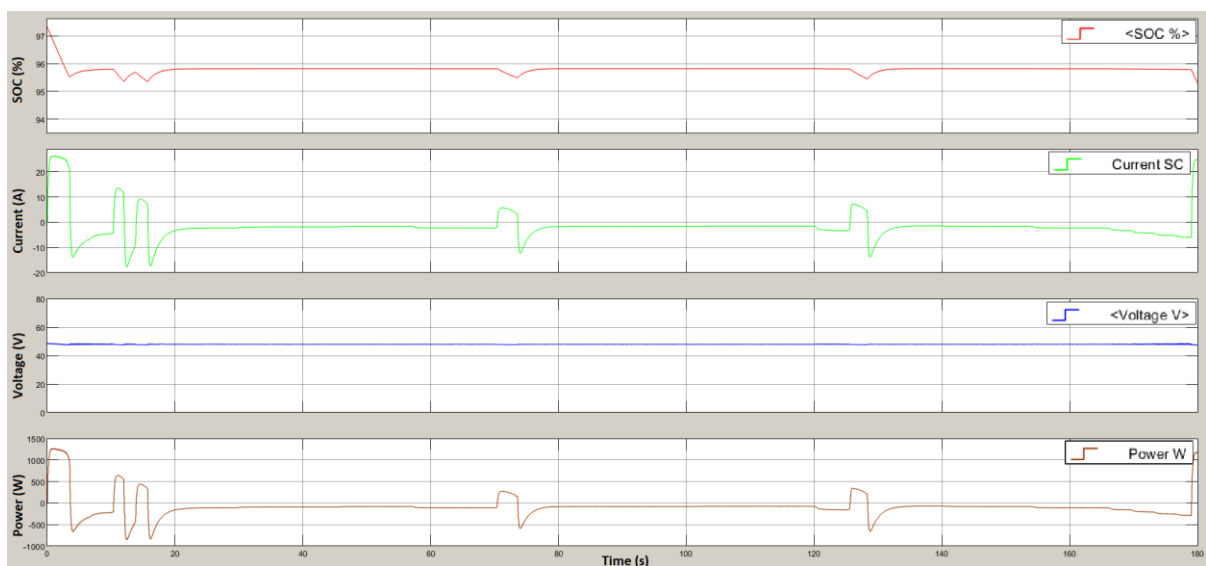
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-93. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-93 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για C= 100 F.

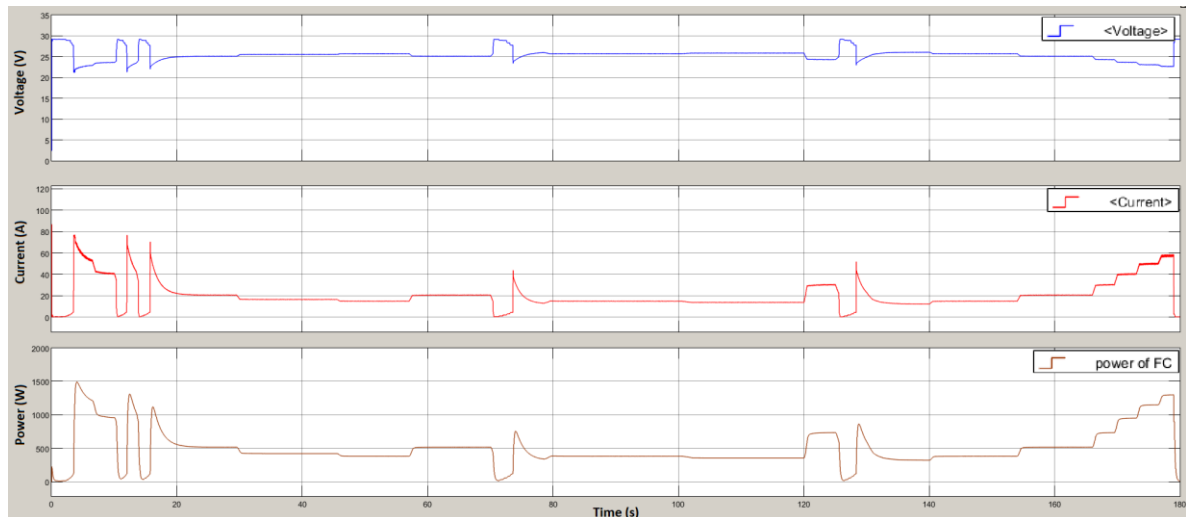


Σχήμα 5-94. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-94 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δύο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών διότι σταθεροποιείται κοντά στο 95.9%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν

τον ίδιο αριθμό διακυμάνσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

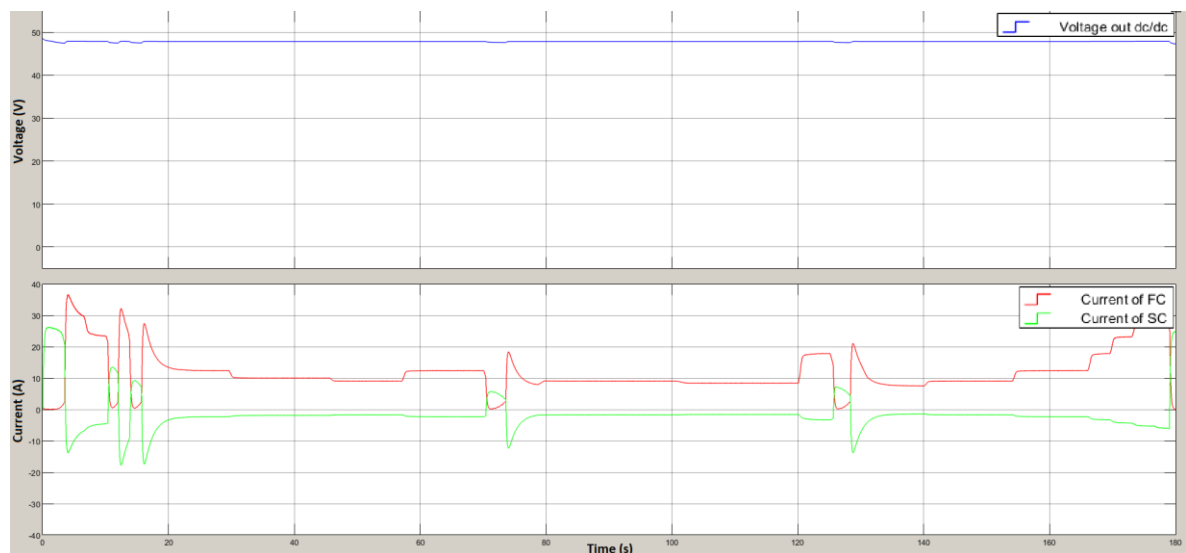
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-95. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-95 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Παρατηρείται ότι το ρεύμα και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχουν τον ίδιο αριθμό διακυμάνσεων από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.

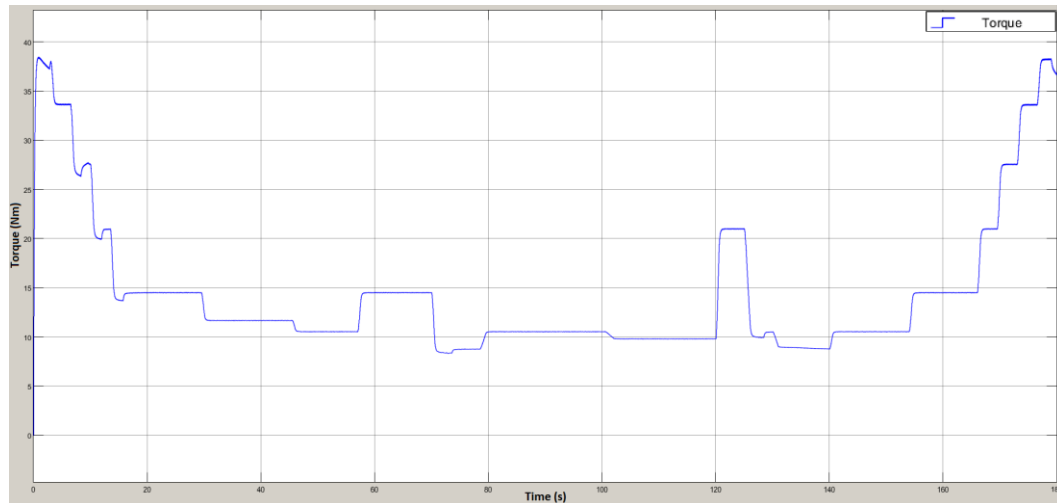


Σχήμα 5-96. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-96 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία είναι σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Παρατηρείται ότι τα ρεύματα έχουν ίδιες διακυμάνσεις από τις

αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #1.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για C= 100 F.



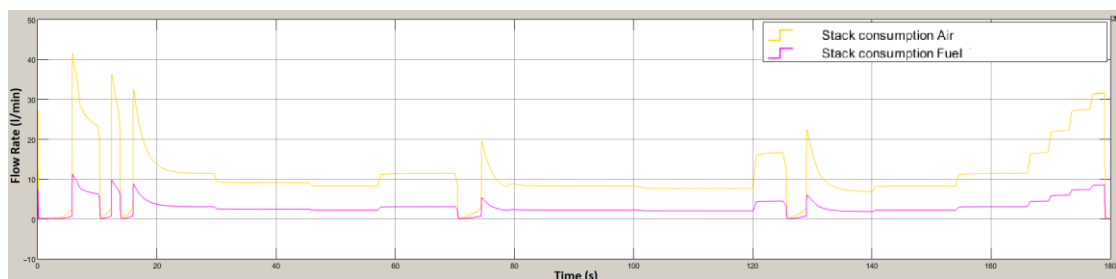
Σχήμα 5-97. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-97 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα. Εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου ενέργειας I.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 4 του σεναρίου I.

- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 166.66 F.

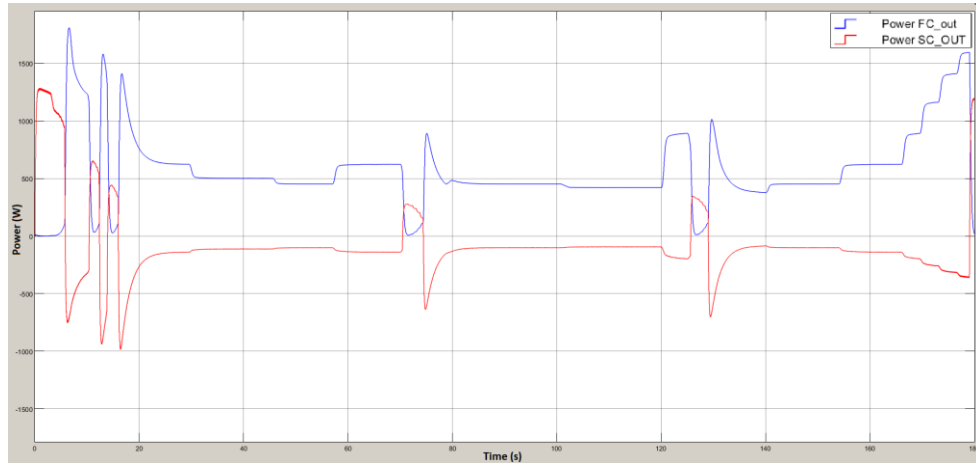


Σχήμα 5-98. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-98 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του

σεναρίου III του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2, αλλά λιγότερη κατανάλωση καυσίμου.

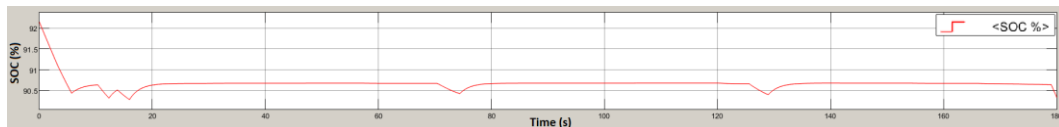
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-99. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-99 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου III του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2 εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις.

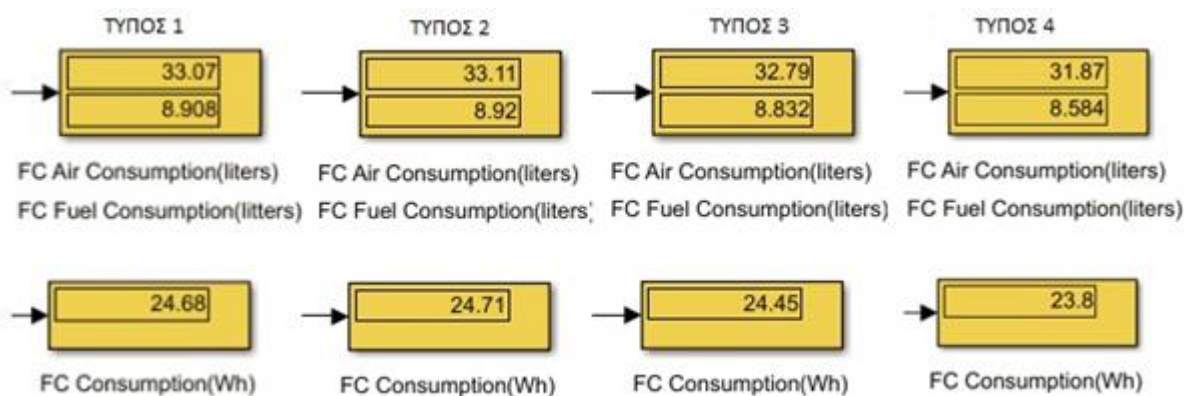
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-100. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-100 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή στο 90.7%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο I φαίνονται στο Σχήμα 5-101.



Σχήμα 5-101. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του τρίτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-7.

Πίνακας 5-7. Αποτελέσματα σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.04	95.14	8.908	24.68
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.04	94.43	8.92	24.71
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.01	95.28	8.832	24.45
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	2.01	90.34	8.584	23.8

5.3 Αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας #3

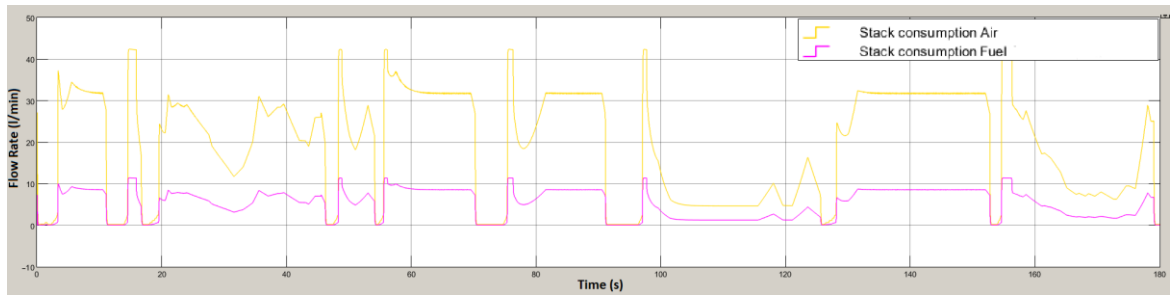
5.3.1 Σενάριο λειτουργίας I

Το πρώτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1, προκύπτουν τρεις κυματομορφές, αυτή του ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου (FC), αυτή της ισχύος της κυψέλης καυσίμου και της ισχύος των υπερπυκνωτών (SC), καθώς και αυτή της κατάστασης φόρτισης των υπερπυκνωτών (SOC%).

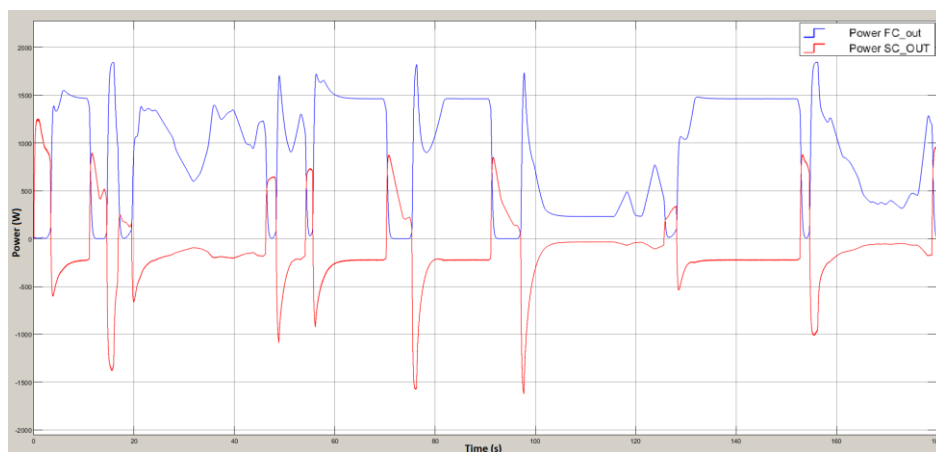
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-102. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-102 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις και μεγαλύτερο αριθμό παύσεων από τους αντίστοιχους ρυθμούς του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

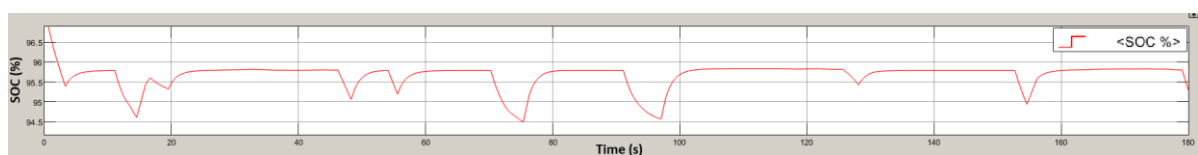
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-103. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και ισχύς υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-103 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει πιο έντονες διακυμάνσεις και περισσότερες παύσεις από την αντίστοιχη ισχύ του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 77.77 F.



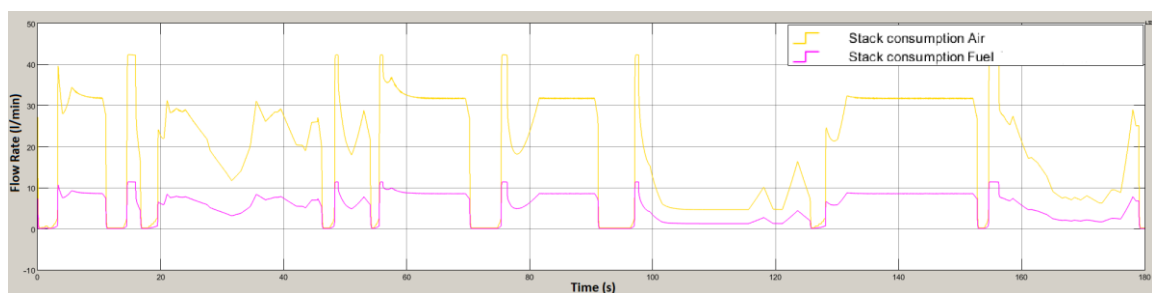
Σχήμα 5-104. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-104 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι έχει περισσότερες και πιο έντονες διακυμάνσεις από την αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2, αλλά γενικά παραμένει σχεδόν σταθερή στα 95.7%.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1.

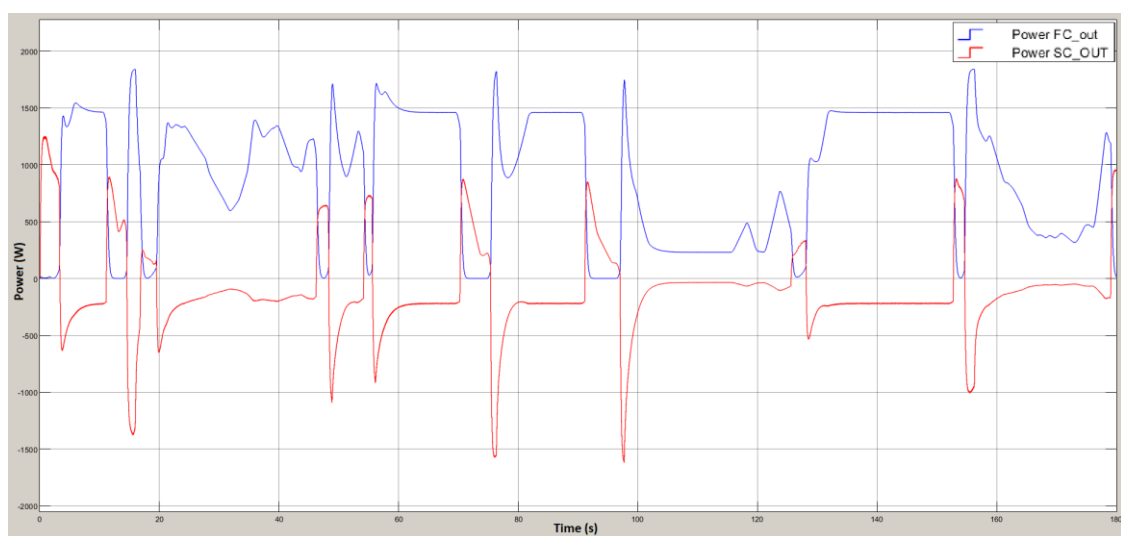
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 75 F.



Σχήμα 5-105. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-105 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-102 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν άλλαξαν σχεδόν καθόλου.

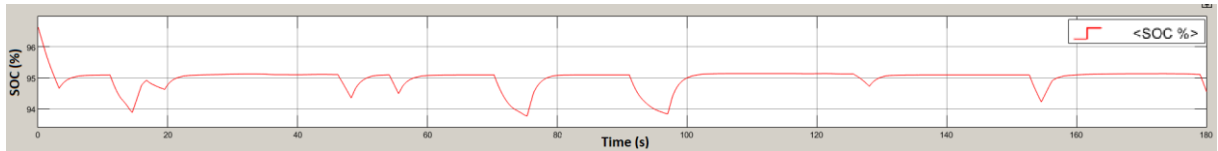
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 75 F.



Σχήμα 5-106. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-106 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά στο Σχήμα 5-103.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 75 \text{ F}$.



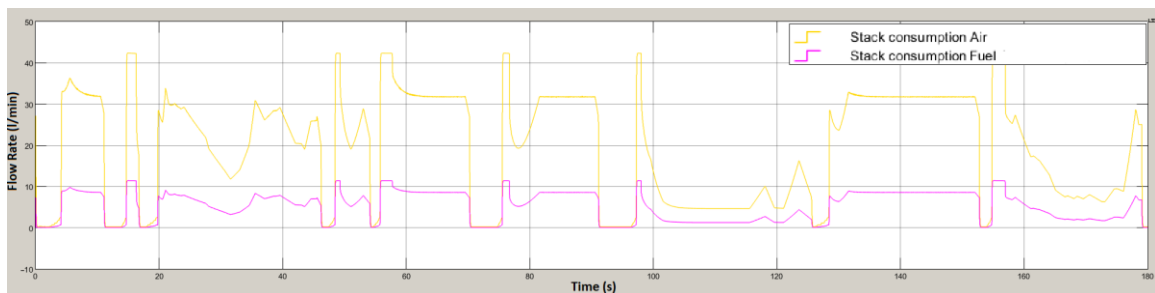
Σχήμα 5-107. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-107 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-104 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.1%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3, εκτός από τις τρεις κυματομορφές μελετώνται και αυτές α) της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου του κινητήρα, β) της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος FC, γ) της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC, δ) της τάσης εισόδου του κινητήρα και των ρευμάτων FC, SC και ε) της ροπής του κινητήρα.

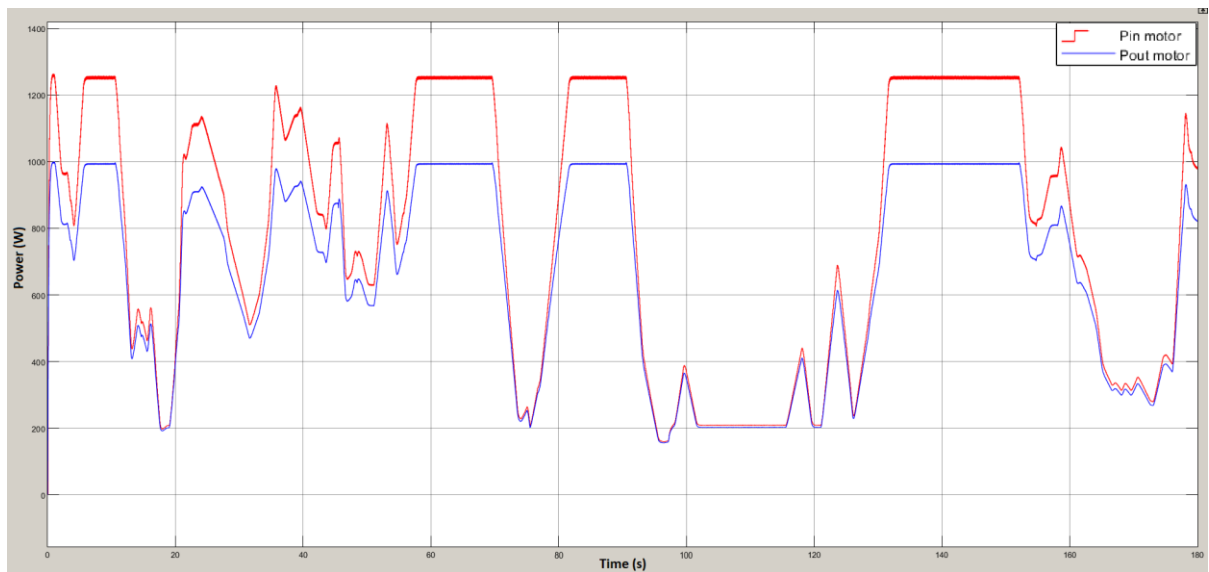
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-108. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-108 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου Ι του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3, δεν εμφανίζονται διαφορές.

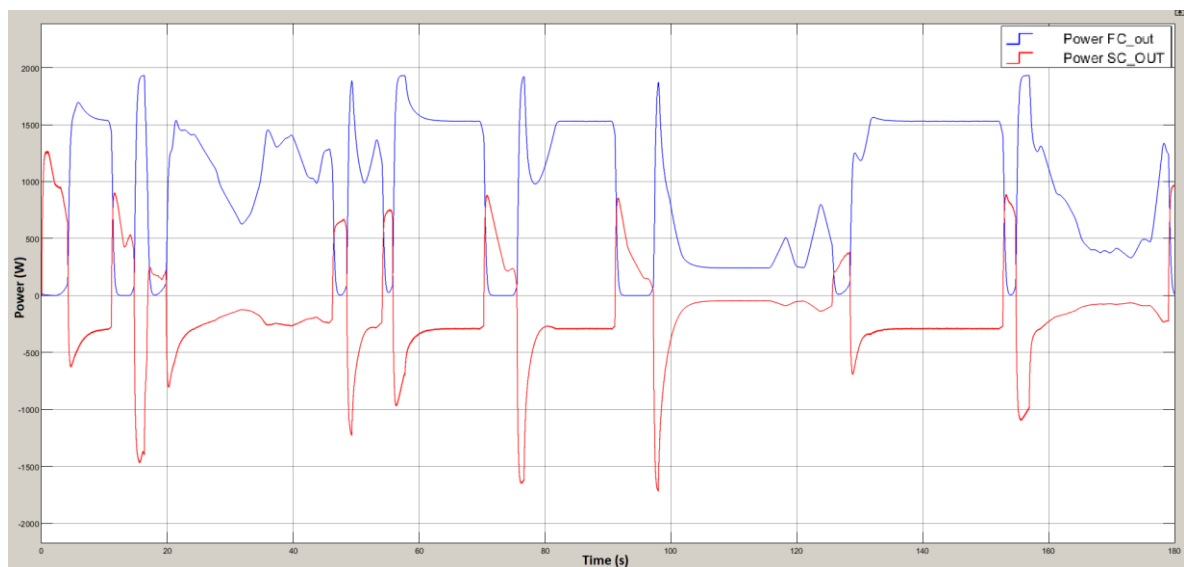
- Κυματομορφή ισχύος εισόδου και εξόδου του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-109. Ισχύς εισόδου και εξόδου του κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-109 παρουσιάζει την ισχύ εισόδου με κόκκινο χρώμα και την ισχύ εξόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

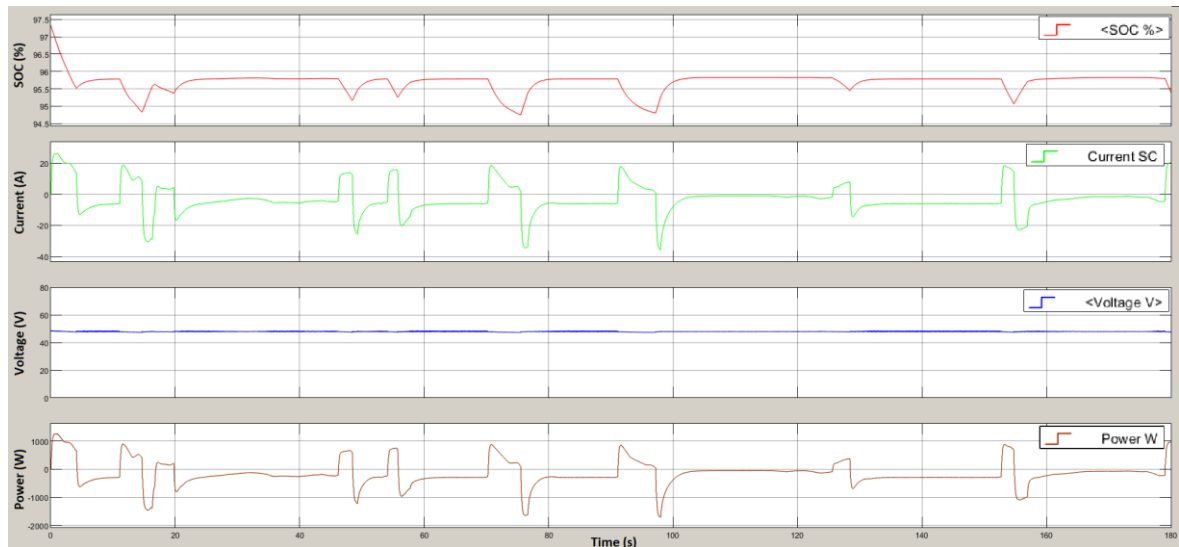
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 100\text{ F}$.



Σχήμα 5-110. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-110 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3.

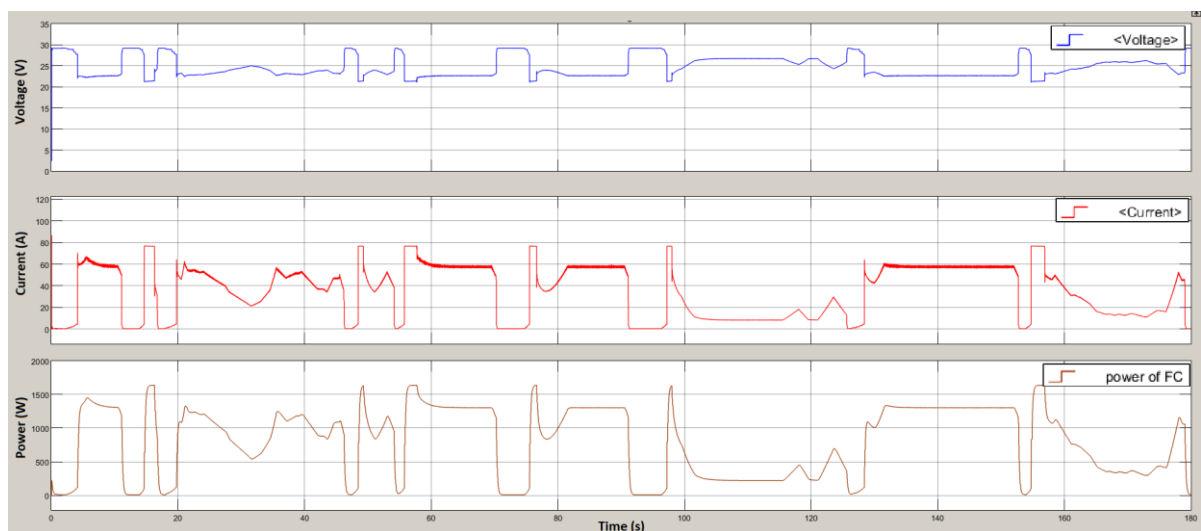
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για C= 100F.



Σχήμα 5-111. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-111 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγορίθμου ενέργειας #3 διότι σταθεροποιείται κοντά στο 95.7%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς έχουν και θετικές και αρνητικές τιμές. Το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν περισσότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου ενέργειας #2.

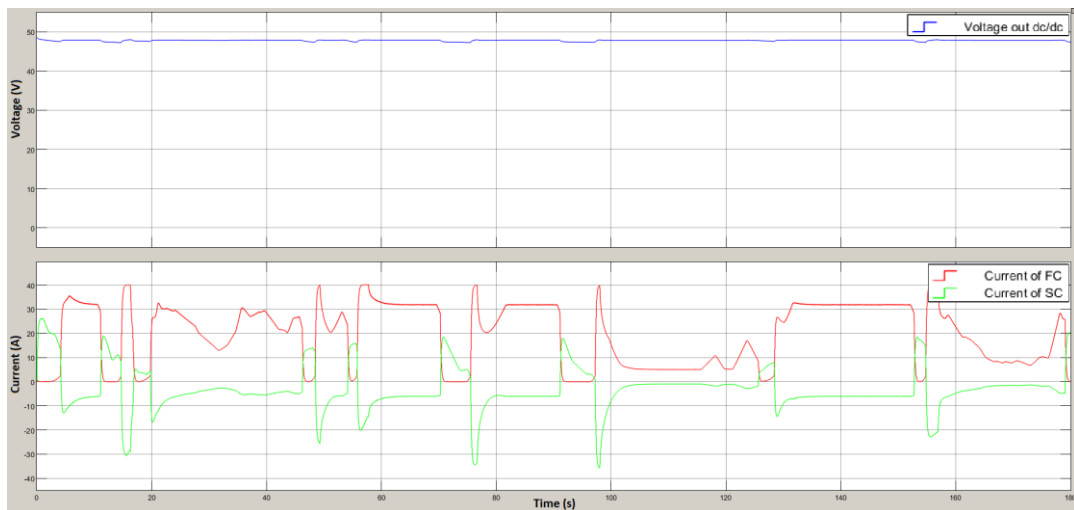
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για C= 100 F.



Σχήμα 5-112. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-112 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Παρατηρείται ότι το ρεύμα και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου εμφανίζουν πιο έντονες διακυμάνσεις με περισσότερες παύσεις από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

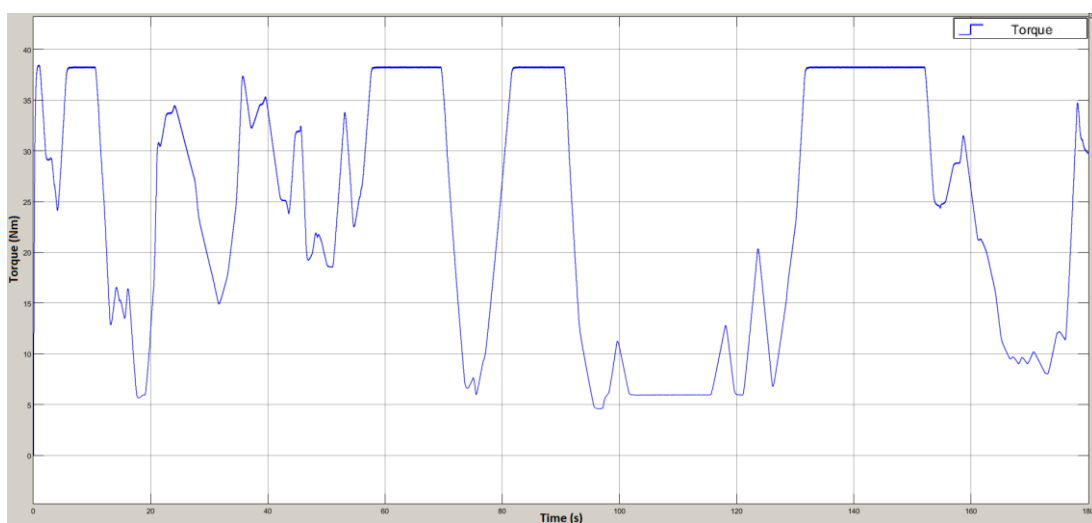
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-113. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-113 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα, η οποία εμφανίζεται σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Στα ρεύματα εμφανίζονται περισσότερες παύσεις από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



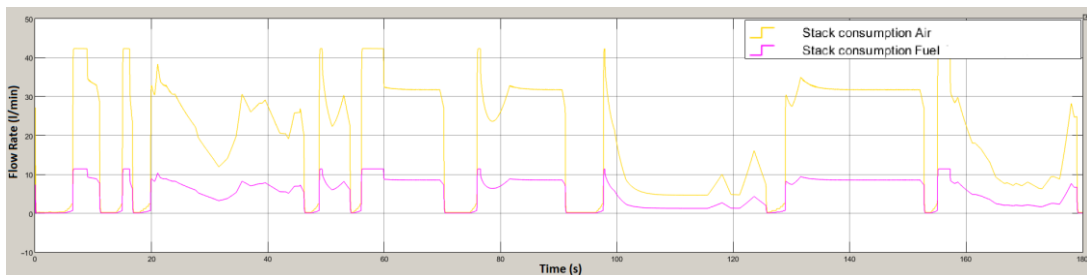
Σχήμα 5-114. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-114 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα. Εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου ενέργειας II.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου I.

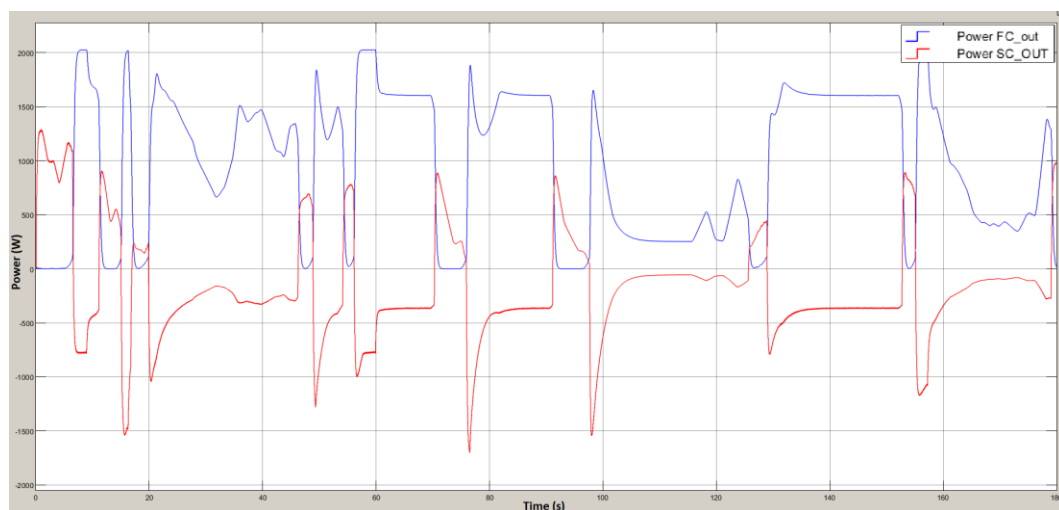
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-115. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-115 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #3 οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις αλλά λιγότερη κατανάλωση.

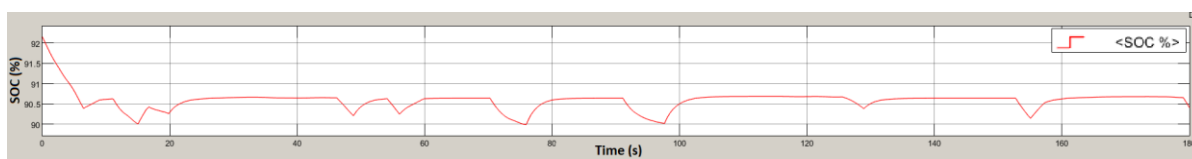
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-116. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-116 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου I του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3 εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις.

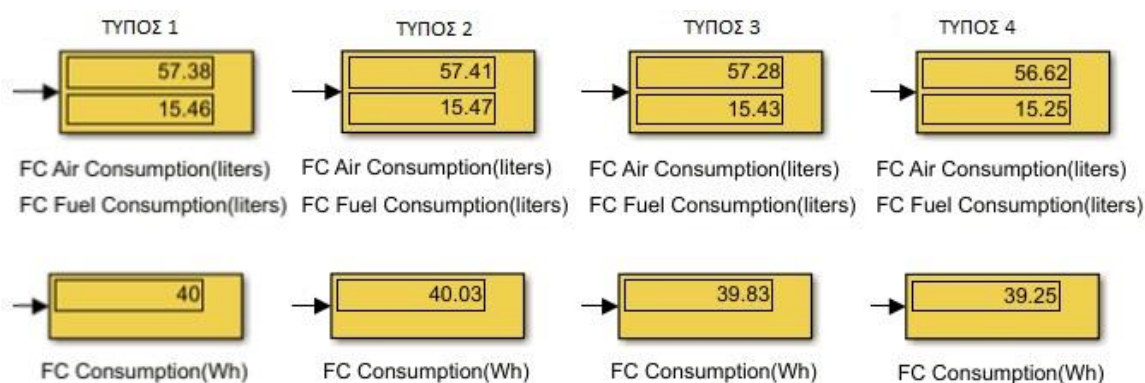
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-117. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-117 παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή κοντά στο 90.6%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο I φαίνονται στο Σχήμα 5-118.



Σχήμα 5-118. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-8.

Πίνακας 5-8. Αποτελέσματα σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.88	95.27	15.46	40
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.93	94.57	15.47	40.33
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.62	95.38	16.43	39.83
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	2.32	90.41	15.25	39.25

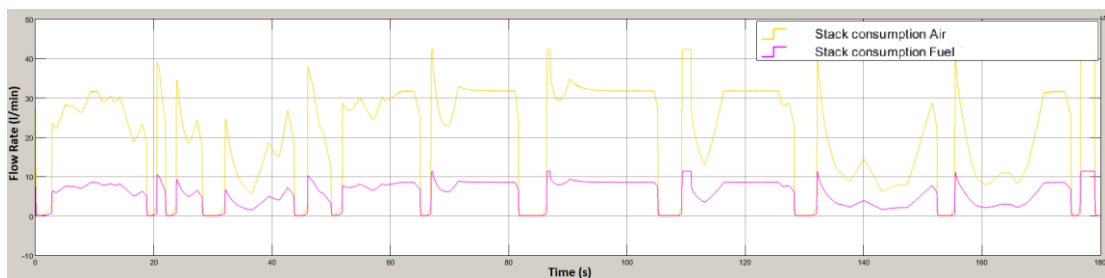
5.3.2 Σενάριο λειτουργίας II

Το δεύτερο σενάριο λειτουργίας του οχήματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1 του σεναρίου I.

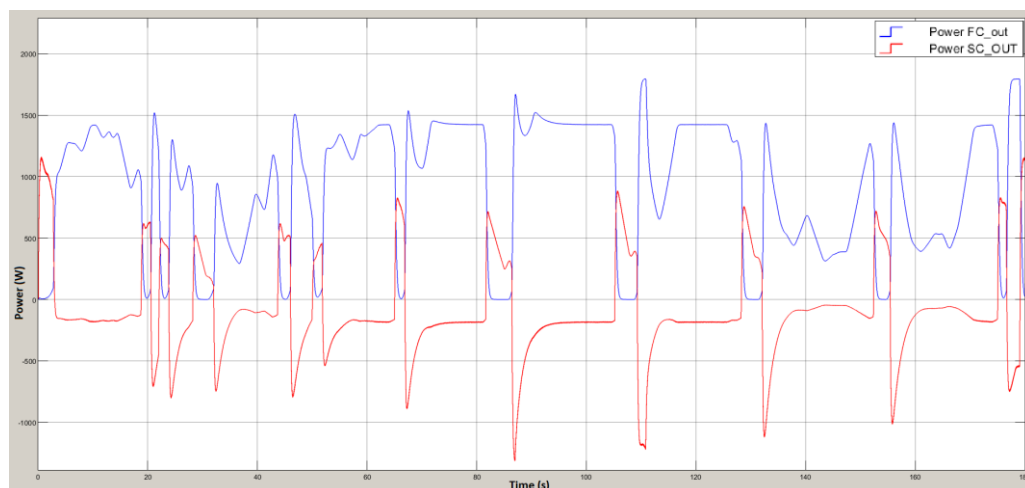
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-119. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-119 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις και περισσότερες παύσεις από τον αντίστοιχο ρυθμό του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.

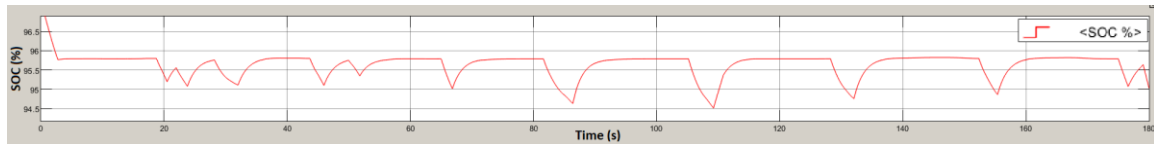


Σχήμα 5-120. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-120 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει περισσότερες διακυμάνσεις με περισσότερες παύσεις λειτουργίας από την αντίστοιχη ισχύ

του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 77.77$ F.



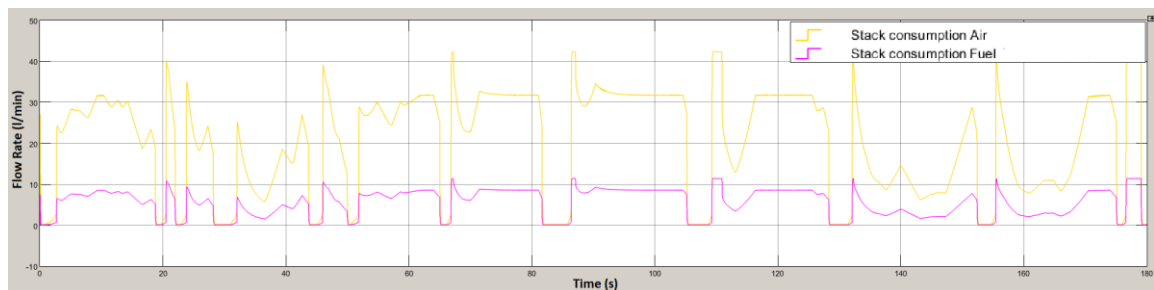
Σχήμα 5-121. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-121 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εμφανίζονται περισσότερες διακυμάνσεις από την αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 2 του σεναρίου I.

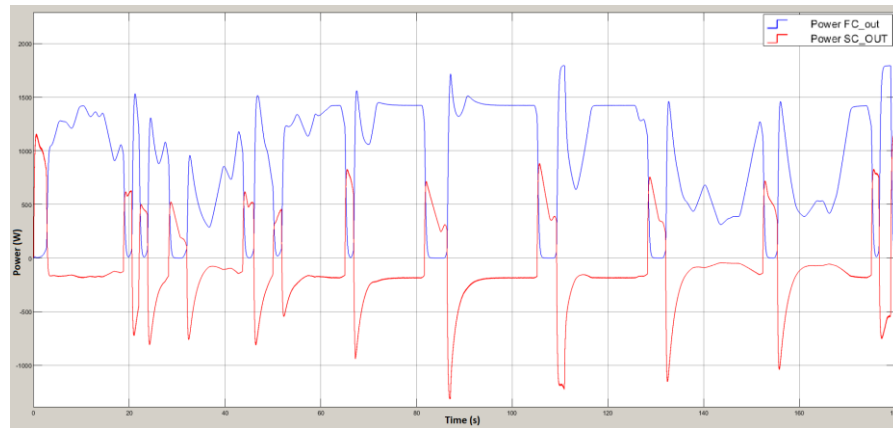
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 75$ F.



Σχήμα 5-122. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-122 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-119, οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν άλλαξαν σχεδόν καθόλου.

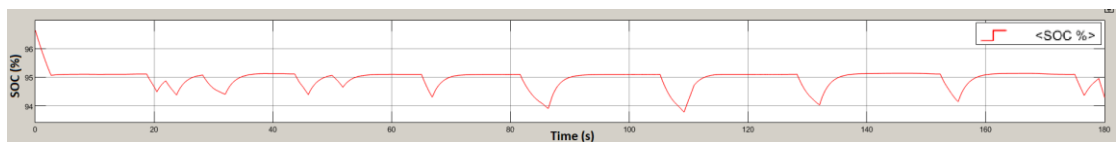
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 75$ F.



Σχήμα 5-123. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-123 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά στο Σχήμα 5-120.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 75 \text{ F}$.



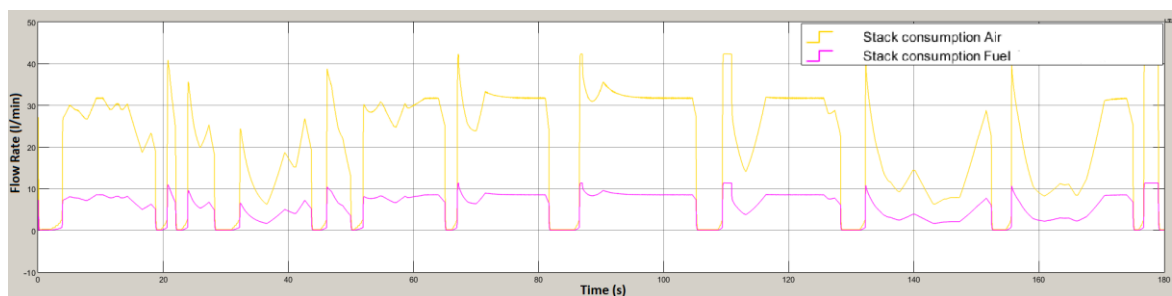
Σχήμα 5-124. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-124 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-72 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του τύπου 3 του σεναρίου I.

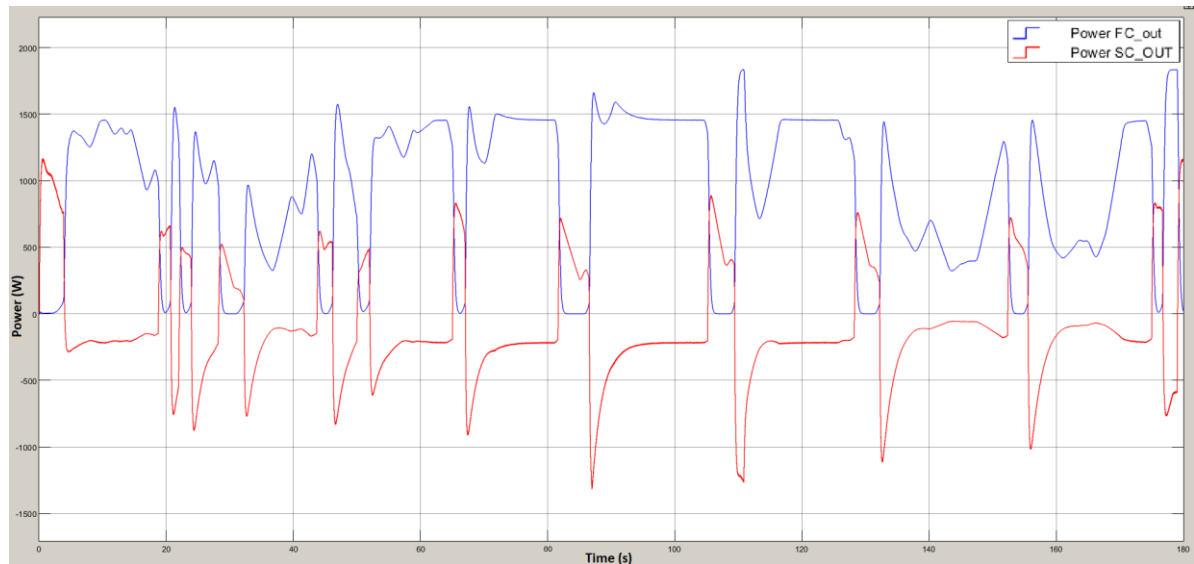
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-125. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-125 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου II του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3, δεν προκύπτουν διαφορές.

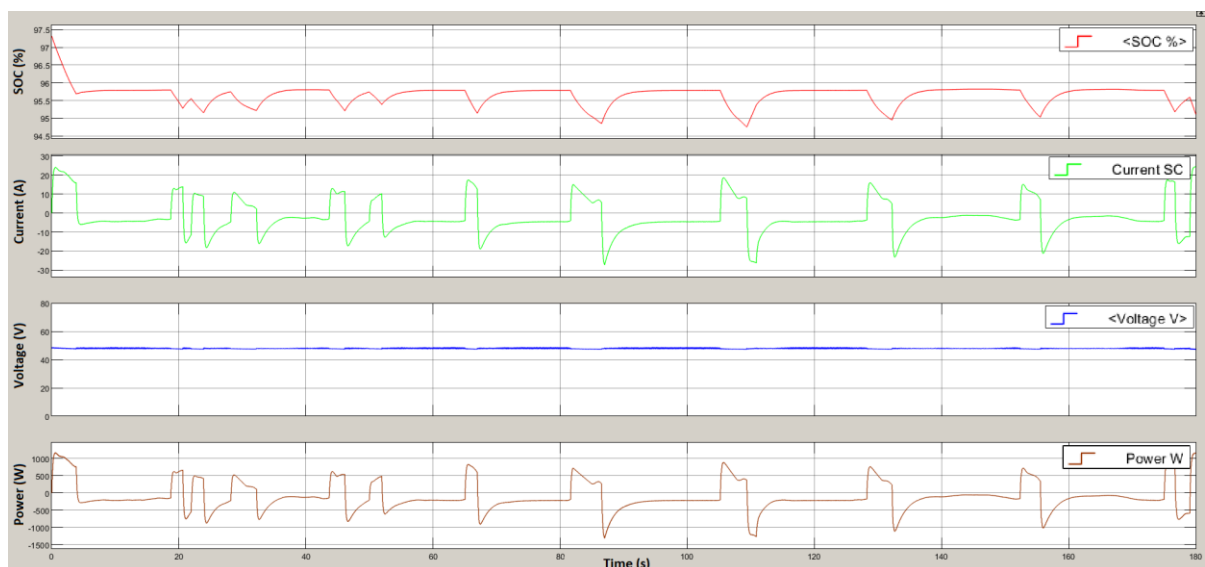
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-126. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-126 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών του ίδιου σεναρίου.

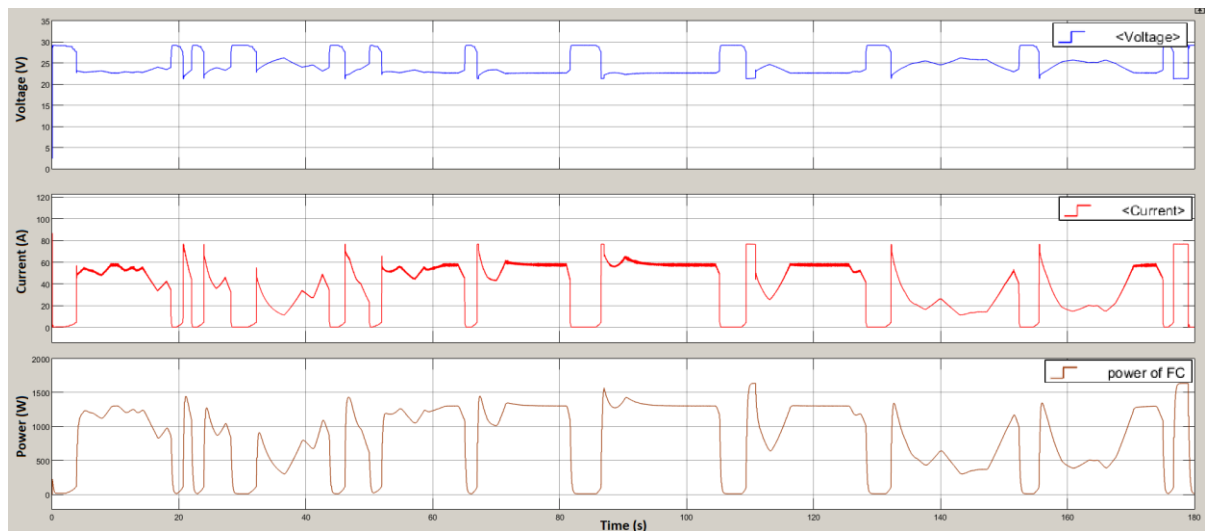
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-127. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-127 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών του σεναρίου II του αλγορίθμου ενέργειας #3 διότι σταθεροποιείται κοντά στο 95.7%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν περισσότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

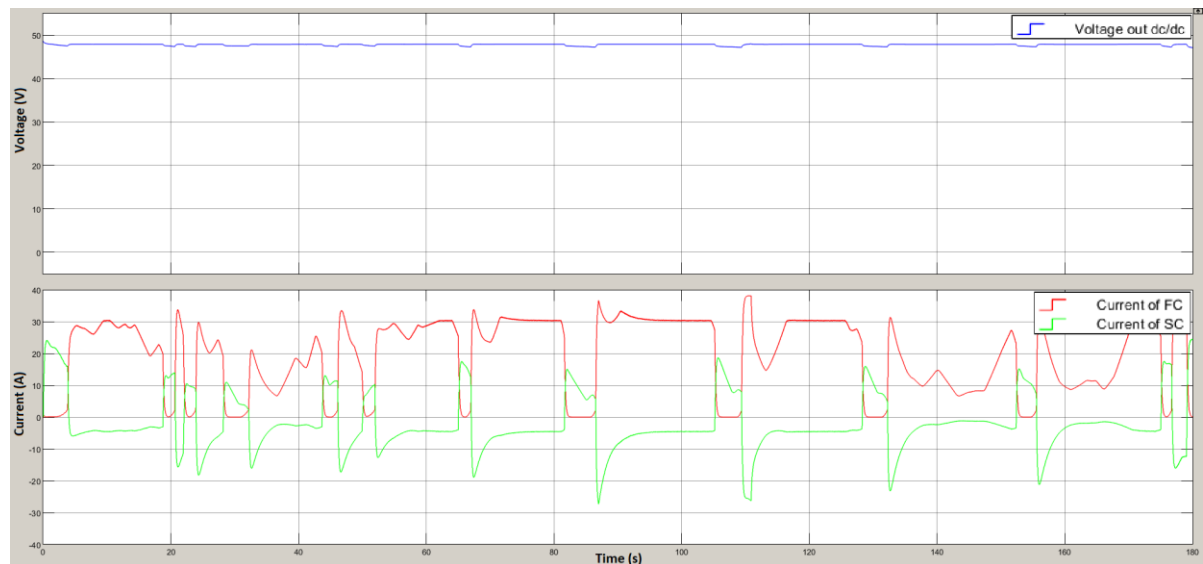
- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για C= 100 F.



Σχήμα 5-128. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-128 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Παρατηρείται ότι το ρεύμα και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει περισσότερες διακυμάνσεις με πολλές παύσεις λειτουργίας από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

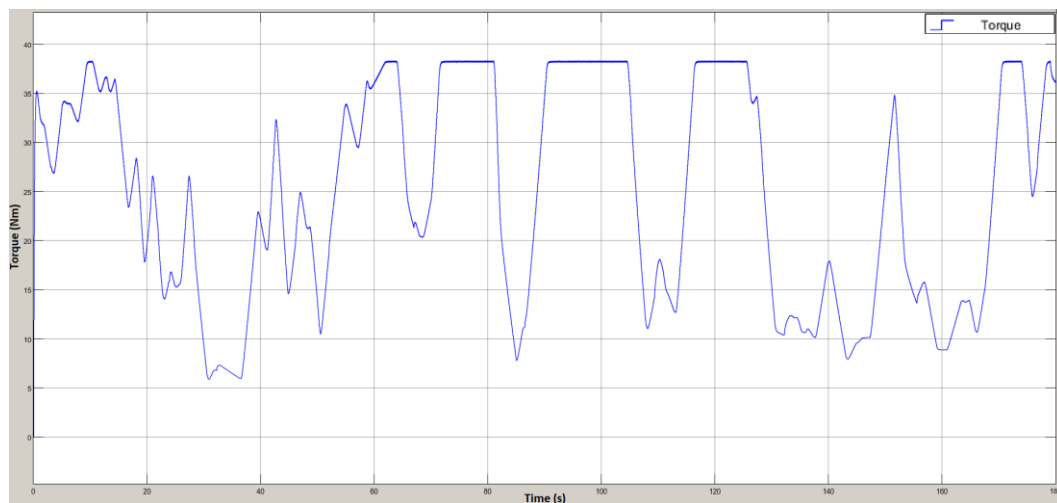
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-129. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-129 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα. Παρατηρείται ότι είναι σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Τα ρεύματα εμφανίζουν περισσότερες διακυμάνσεις από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



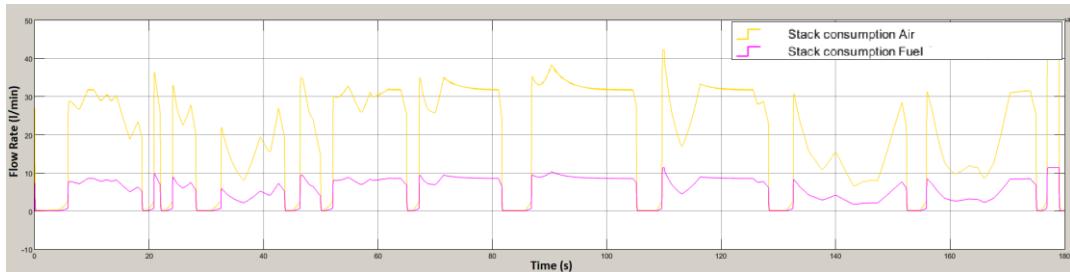
Σχήμα 5-130. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-130 παρουσιάζει τη ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα. Εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 4 του σεναρίου I.

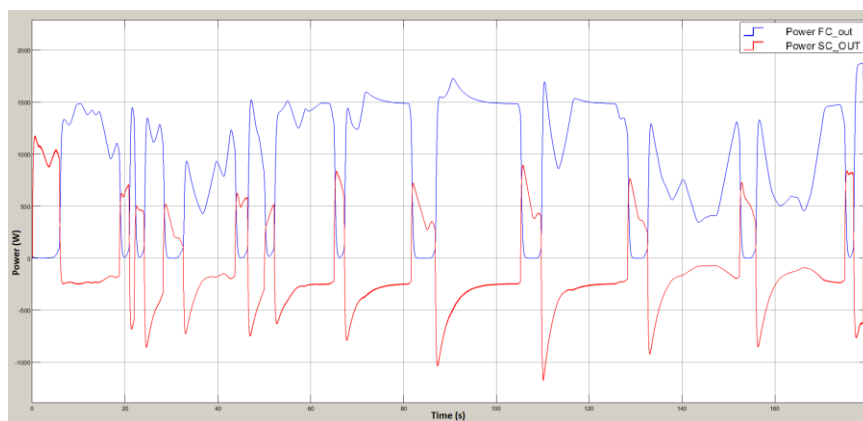
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-131. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-131 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου II του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3, αλλά λιγότερη κατανάλωση καυσίμου.

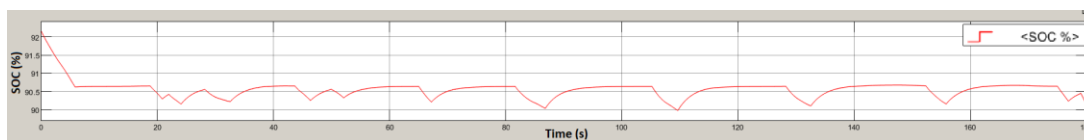
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-132. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-132 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου II του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3 εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις.

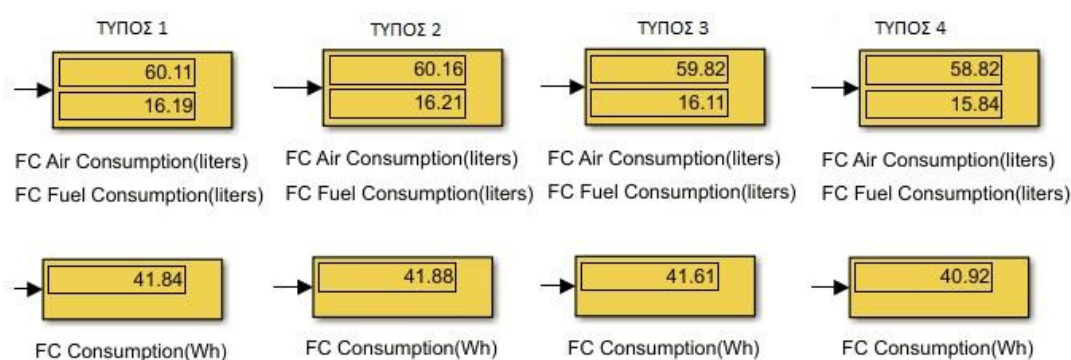
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-133. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-133 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή κοντά στο 90.6%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο II φαίνονται στο Σχήμα 5-134.



Σχήμα 5-134. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-9.

Πίνακας 5-9. Αποτελέσματα σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.86	95	16.19	41.84
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.92	94.3	16.21	41.88
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.61	95.1	16.11	41.61
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	2.32	90.15	15.84	40.92

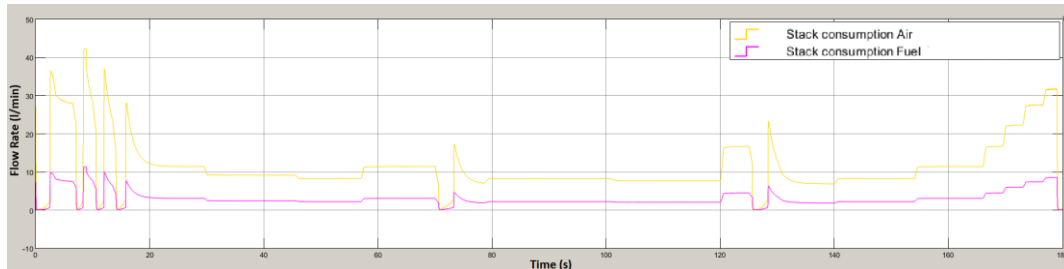
5.3.3 Σενάριο λειτουργίας III

Το τρίτο σενάριο λειτουργίας του οχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-36.

Υπερπυκνωτές τύπου 1

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 1 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 1 του σεναρίου Ι.

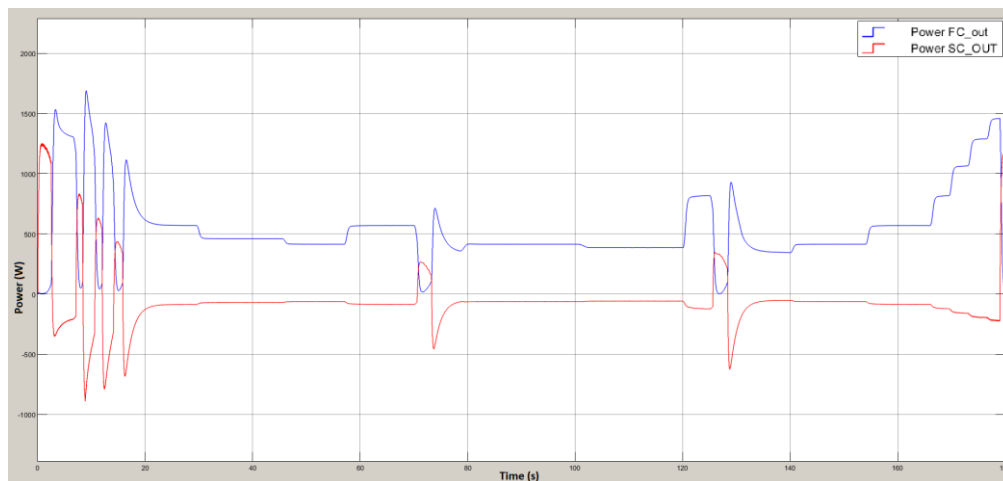
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-135. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-135 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις και περισσότερες παύσεις από τους αντίστοιχους ρυθμούς του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

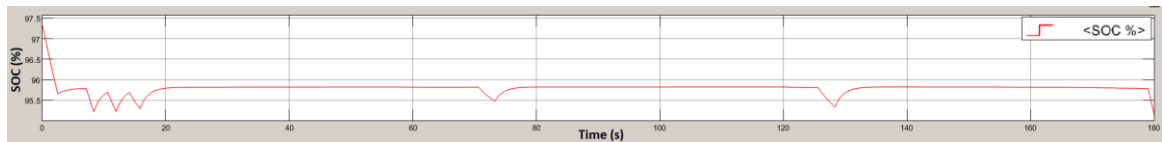
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 77.77 F.



Σχήμα 5-136. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-136 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχει πιο έντονες διακυμάνσεις και περισσότερες παύσεις από την αντίστοιχη ισχύ του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για C= 77.77 F.



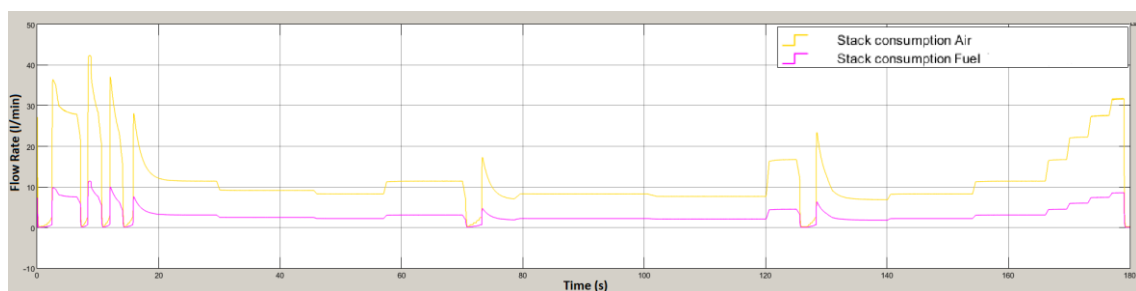
Σχήμα 5-137. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-137 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Παρατηρείται ότι έχει πιο έντονες και περισσότερες παύσεις από την αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2, αλλά γενικά παραμένει σχεδόν σταθερή στα 95.8%.

Υπερπυκνωτές τύπου 2

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 2 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 2 του σεναρίου I.

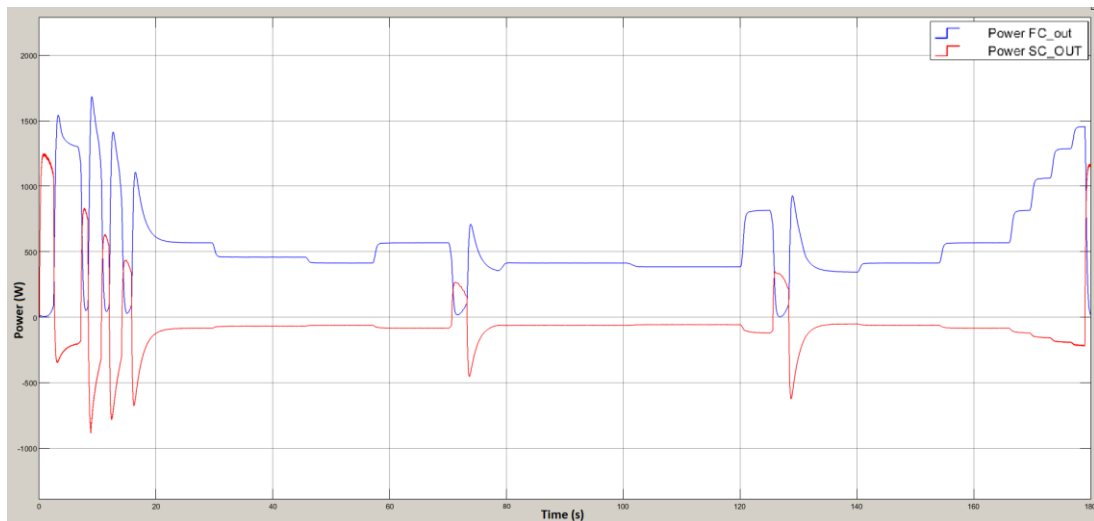
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 75 F.



Σχήμα 5-138. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-138 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 5-135, οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα δεν άλλαξαν σχεδόν καθόλου.

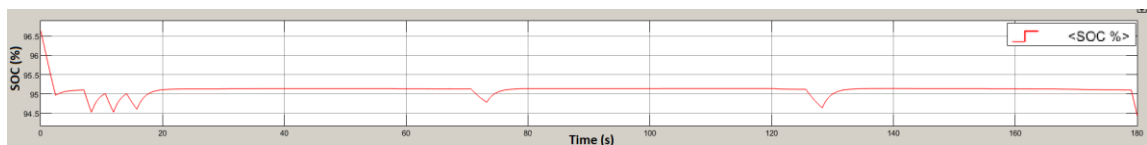
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 75 F.



Σχήμα 5-139. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-139 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι έχει τα ίδια αποτελέσματα με αυτά στο Σχήμα 5-136.

- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 75 \text{ F}$.



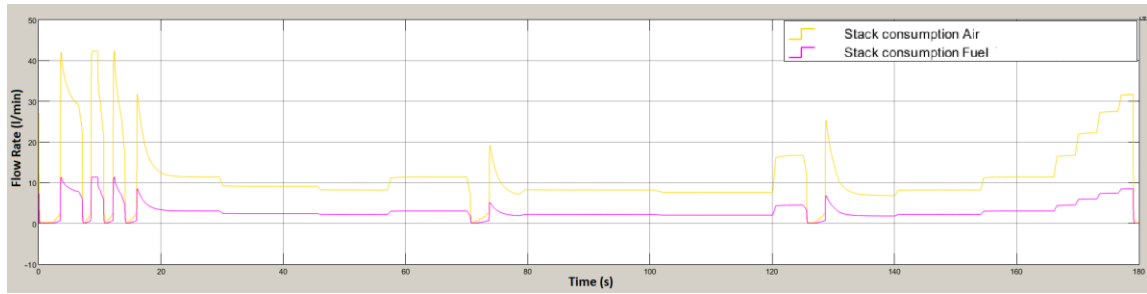
Σχήμα 5-140. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-140 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Εδώ σε σχέση με το Σχήμα 5-37 η πτώση είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή σταθεροποιείται κοντά στο 95.1%.

Υπερπυκνωτές τύπου 3

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 3 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του τύπου 3 του σεναρίου I.

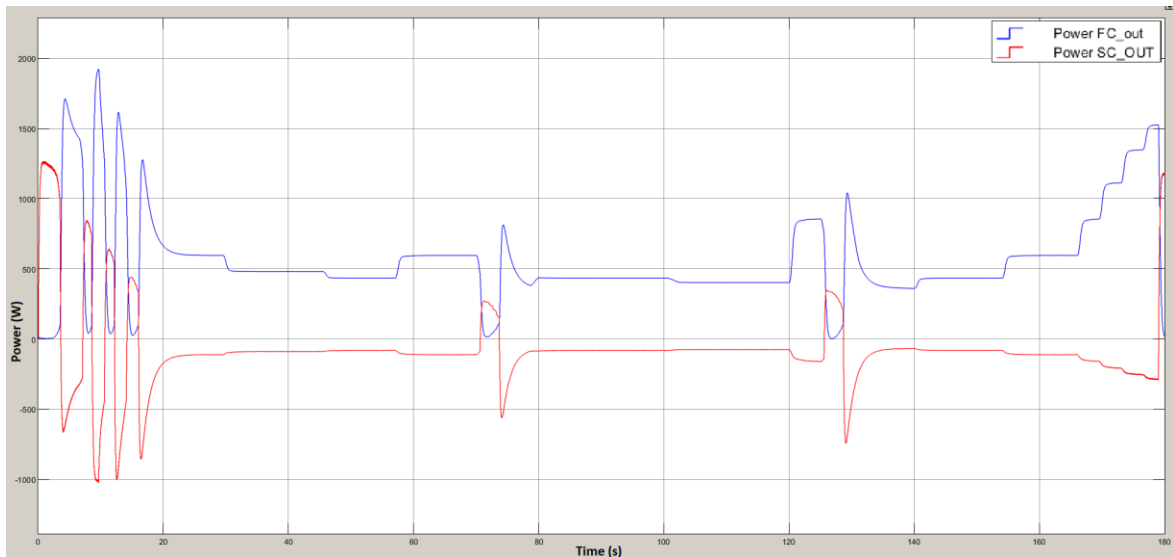
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-141. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-141 παρουσιάζει τον ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Όπως φαίνεται, σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου III του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3, δεν εμφανίζονται διαφορές.

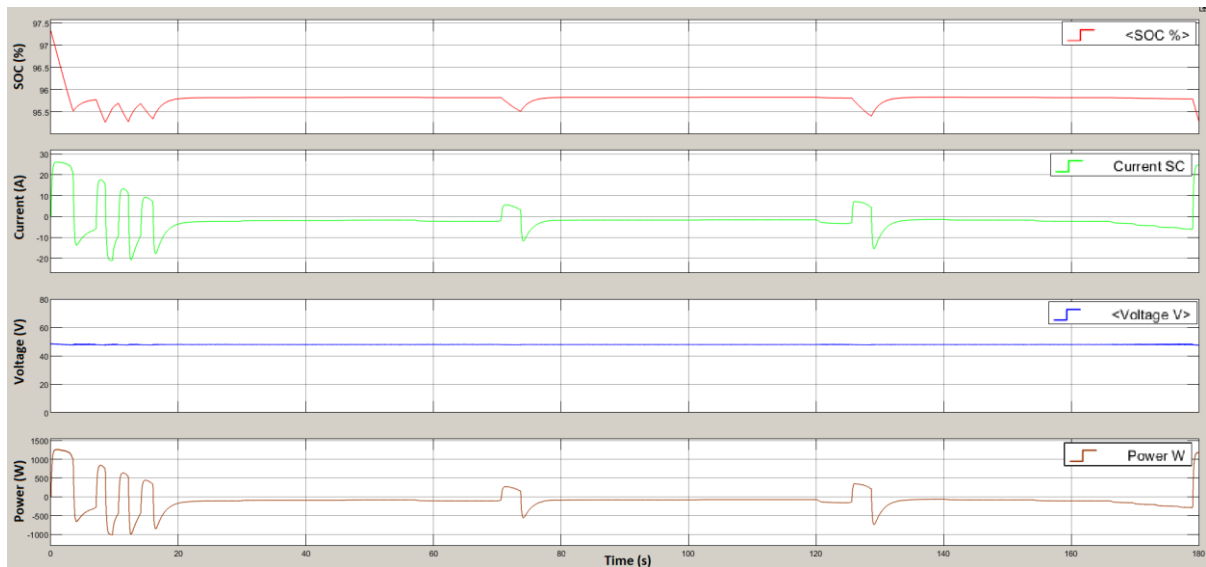
- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 100 F.



Σχήμα 5-142. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-142 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Εμφανίζονται και εδώ τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων τύπων υπερπυκνωτών.

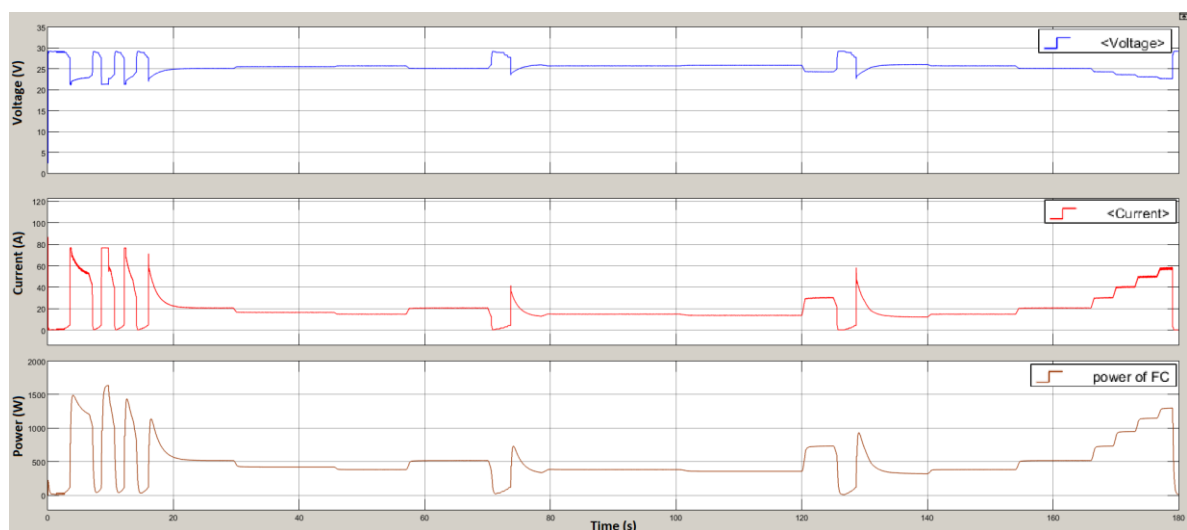
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης, της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος SC για C= 100F.



Σχήμα 5-143. Κατάσταση φόρτισης, ρεύματος, τάσης και ισχύος υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-143 παρουσιάζει την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα, που είναι λίγο καλύτερη από αυτή των δυο πρώτων τύπων υπερπυκνωτών διότι σταθεροποιείται κοντά στο 95.8%, αλλά και οι διακυμάνσεις της δεν είναι τόσο έντονες. Επίσης, παρουσιάζεται το ρεύμα με πράσινο χρώμα, η τάση με μπλε και η ισχύς με καφέ. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στα 48 V, ενώ το ρεύμα και η ισχύς εμφανίζουν περισσότερες και πιο έντονες διακυμάνσεις από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή τάσης, ρεύματος και ισχύος FC για $C = 100 \text{ F}$.

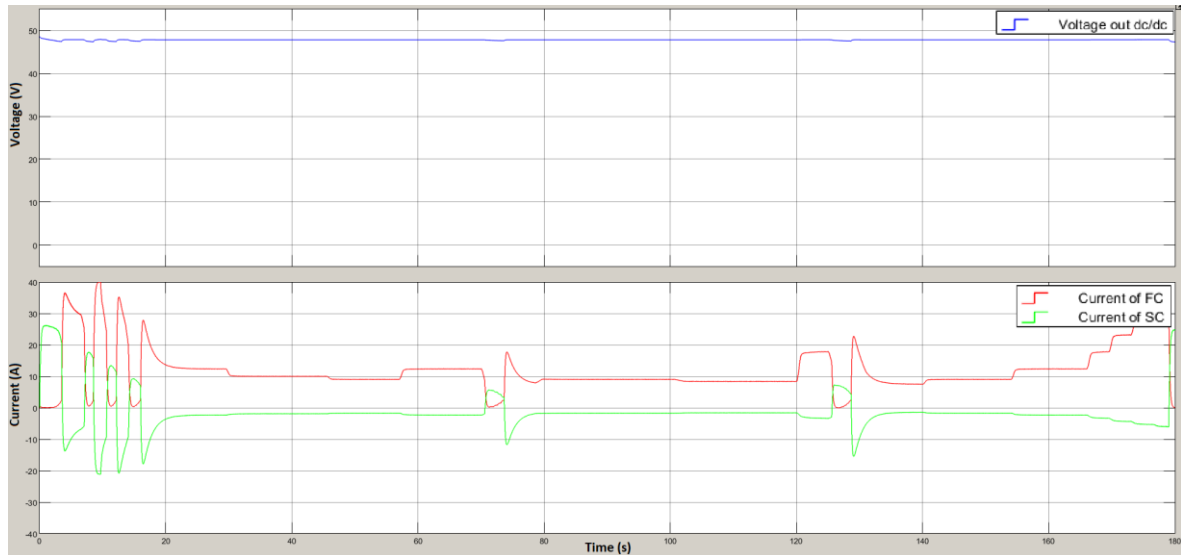


Σχήμα 5-144. Τάση, ρεύμα και ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-144 παρουσιάζει την τάση με μπλε χρώμα, το ρεύμα με κόκκινο χρώμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με καφέ. Παρατηρείται ότι το ρεύμα και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις και περισσότερες παύσεις από τις

αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

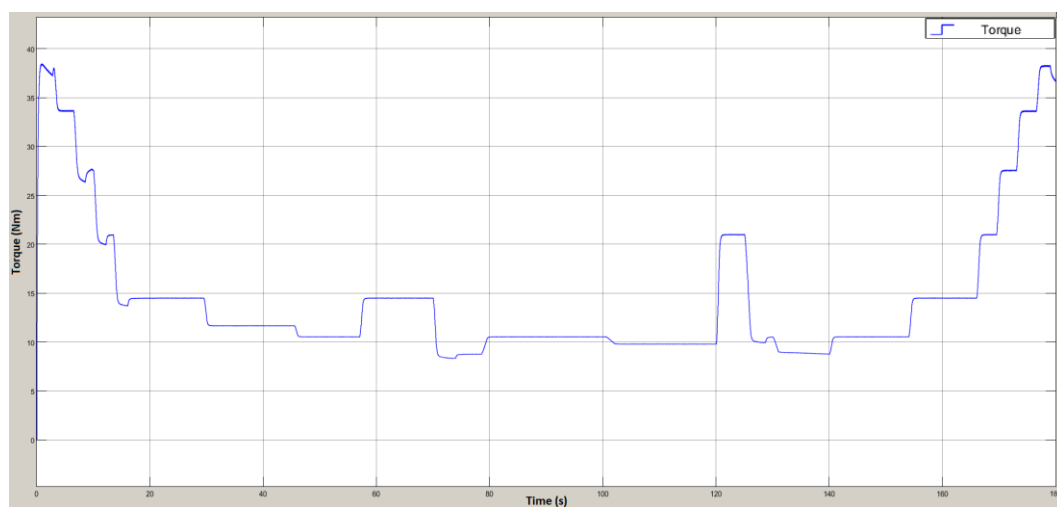
- Κυματομορφή τάσης κινητήρα και ρευμάτων FC και SC για $C = 100 \text{ F}$.



Σχήμα 5-145. Τάση εισόδου κινητήρα και ρευμάτων FC και SC.

Το Σχήμα 5-145 παρουσιάζει την τάση εισόδου του κινητήρα με μπλε χρώμα. Παρατηρείται ότι είναι σταθερή στα 48 V. Επίσης παρουσιάζει το ρεύμα του FC με κόκκινο χρώμα και το ρεύμα του SC με πράσινο. Παρατηρείται ότι τα ρεύματα έχουν περισσότερες και πιο έντονες διακυμάνσεις από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #2.

- Κυματομορφή ροπής του κινητήρα για $C = 100 \text{ F}$.



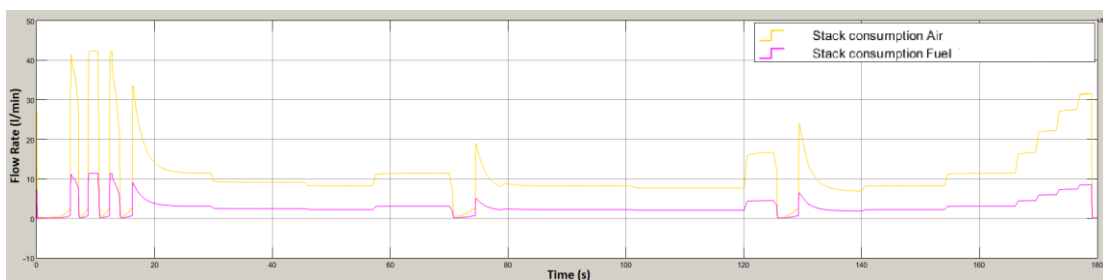
Σχήμα 5-146. Ροπή κινητήρα BLDC.

Το Σχήμα 5-146 παρουσιάζει την ροπή του κινητήρα με μπλε χρώμα. Εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ίδιου τύπου υπερπυκνωτών και ίδιου σεναρίου του αλγόριθμου διαχείρισης ενέργειας #3.

Υπερπυκνωτές τύπου 4

Για τους υπερπυκνωτές του τύπου 4 εξετάζονται ακριβώς οι ίδιες τρεις κυματομορφές με αυτές του τύπου 4 του σεναρίου I.

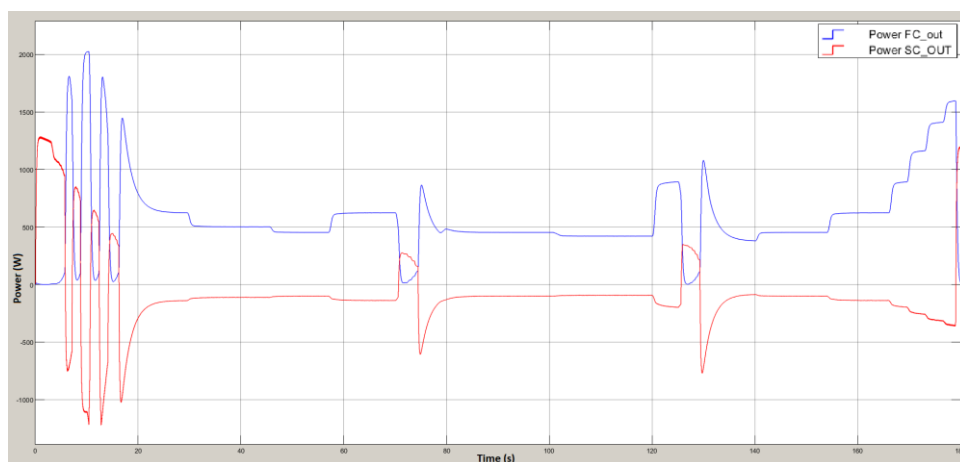
- Κυματομορφή ρυθμού ροής αέρα και υδρογόνου του FC για C= 166.66 F.



Σχήμα 5-147. Ρυθμός ροής αέρα και υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου.

Το Σχήμα 5-147 παρουσιάζει το ρυθμό ροής του αέρα (l/min) με κίτρινο χρώμα και του υδρογόνου με μωβ. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής υδρογόνου και αέρα έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου III του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3, αλλά λιγότερη κατανάλωση καυσίμου.

- Κυματομορφή της ισχύος του FC και της ισχύος του SC για C= 166.66 F.

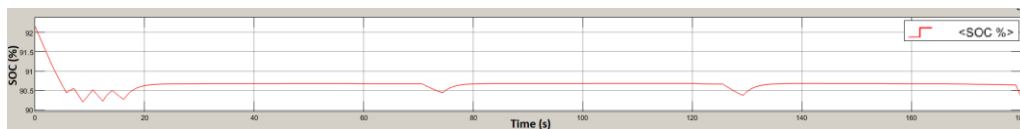


Σχήμα 5-148. Ισχύς κυψέλης καυσίμου και υπερπυκνωτών.

Το Σχήμα 5-148 παρουσιάζει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα και την ισχύ των υπερπυκνωτών με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε σχέση με τους προηγούμενους

τύπους υπερπυκνωτών του σεναρίου III του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας #3 εμφανίζονται πιο έντονες διακυμάνσεις.

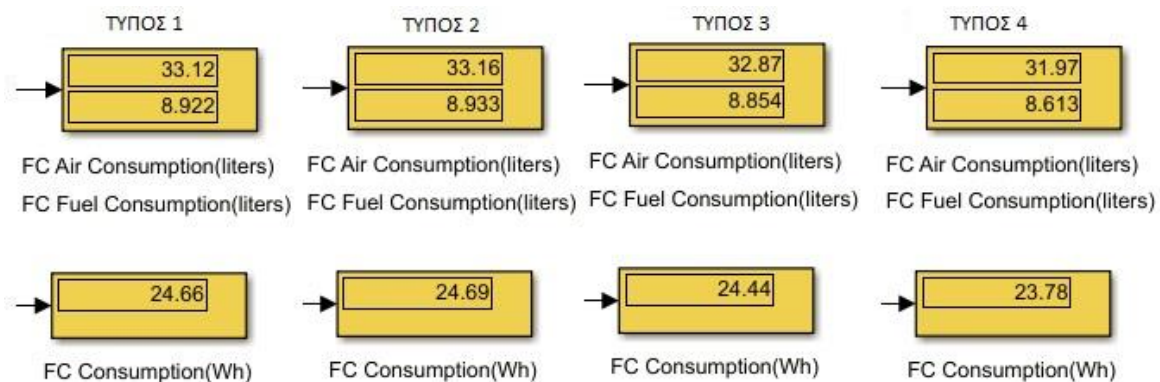
- Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης των SC για $C = 166.66 \text{ F}$.



Σχήμα 5-149. Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 5-149 εμφανίζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας υπερπυκνωτών, στην οποία παρατηρείται ότι επέρχεται πτώση της φόρτισης στην εκκίνηση, στο σταμάτημα και στις επιταχύνσεις του οχήματος, αλλά γενικά παραμένει σταθερή στο 90.6%.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης υδρογόνου (liters) και ενέργειας (Wh) της κυψέλης καυσίμου για το σενάριο III φαίνονται στο Σχήμα 5-150.



Σχήμα 5-150. Κατανάλωση υδρογόνου και ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Τα αποτελέσματα του τρίτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-10.

Πίνακας 5-10. Αποτελέσματα σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών							Κυψέλη Καυσίμου	
Τύπος	Χωρητ/τα (F)	Βάρος ανά μονάδα χωρητ/τας (kg/F)	Κόστος (€)	Τάση πάντα >40 V	Διακύμανση SOC (%)	Ποσοστό Τελικής Τιμής SOC (%)	Κατανάλωση υδρογόνου (Liters)	Κατανάλωση ενέργειας (Wh)
Τύπος 1	77.77	0.097	1468.6	Ναι	2.1	95.14	8.922	24.66
Τύπος 2	75	0.067	555	Ναι	2.16	94.43	8.933	24.69
Τύπος 3	100	0.067	740	Ναι	2.09	95.28	8.854	24.44
Τύπος 4	166.66	0.053	1062	Ναι	2.09	90.34	8.613	23.78

5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθορίστηκαν τα κριτήρια βελτιστοποίησης σχεδιασμού της συστοιχίας υπερπυκνωτών ως εξής:

1. Βάρος ανά μονάδα χωρητικότητας με συντελεστή βαρύτητας 30%.
2. Κόστος αγοράς με συντελεστή βαρύτητας 15%.
3. Ως χαμηλότερη τιμή τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών τα 40 V με συντελεστή βαρύτητας 5%.
4. Διακύμανση SOC (%) των υπερπυκνωτών με συντελεστή βαρύτητας 10%.
5. Ποσοστό τελικής τιμής SOC (%) των υπερπυκνωτών με συντελεστή βαρύτητας 5%.
6. Κατανάλωση υδρογόνου με συντελεστή βαρύτητας 20%.
7. Κατανάλωση ενέργειας κυψέλης καυσίμου με συντελεστή βαρύτητας 15%.

Το βάρος ανά μονάδα χωρητικότητας έχει το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας. Αυτό το κριτήριο κυρίως κρίνεται καθοριστικό, διότι μικρό βάρος ανά μονάδα χωρητικότητας σημαίνει ελαφρύτερο όχημα και, άρα, μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και αρκετή χωρητικότητα για αποθήκευση ενέργειας. Το δεύτερο πιο σημαντικό κριτήριο αποτελεί η κατανάλωση υδρογόνου, που σημαίνει μικρότερη φιάλη υδρογόνου, δηλαδή μικρότερο βάρος. Το κόστος αγοράς επίσης συνιστά ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης. Η κατανάλωση ενέργειας της κυψέλης καυσίμου πρέπει να ληφθεί υπόψη, προκειμένου να ρυθμιστεί κατάλληλα ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας του οχήματος. Η διακύμανση SOC (%) των υπερπυκνωτών είναι και αυτή ένας σημαντικός παράγοντας, διότι από αυτήν λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες για τη σταθερότητα παροχής ενέργειας από τους υπερπυκνωτές. Παράλληλα, σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών να είναι το λιγότερο 40 V, τιμή η οποία αποτελεί το κατώτερο όριο λειτουργίας του ελεγκτή του κινητήρα. Το τελευταίο κριτήριο, που είναι το ποσοστό τελικής τιμής SOC (%), ομοίως έχει τη σημασία του στο πλαίσιο αγώνων στους οποίους συμμετέχει η ομάδα TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης, γιατί χρειάζεται οι πυκνωτές να επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή φόρτιση στο τέλος κάθε γύρου του αγώνα.

Μετά τον καθορισμό των κριτηρίων ακολουθεί σύγκριση των τύπων υπερπυκνωτών για τα τρία σενάρια λειτουργίας και για τους τρεις αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος, όπως περιγράφεται στην συνέχεια.

5.4.1 Ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά

Το **βάρος ανά μονάδα χωρητικότητας** κάθε συστοιχίας υπερπυκνωτών έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σενάρια και τους αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος εφόσον ούτε το βάρος ούτε η χωρητικότητα της συστοιχίας αλλάζουν. Την καλύτερη τιμή (0.053 kg/F) παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, γιατί έχει το μικρότερο βάρος ανά μονάδα χωρητικότητας.

Το **κόστος αγοράς** κάθε συστοιχίας υπερπυκνωτών έχει και αυτό την ίδια τιμή σε όλα τα σενάρια και τους αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος αφού το κόστος αγοράς της συστοιχίας δεν αλλάζει. Την καλύτερη τιμή (555 €) παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 2, γιατί διαθέτει λιγότερους σε αριθμό υπερπυκνωτές ($3 \cdot 18 = 54$).

Για τη **χαμηλότερη τιμή τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών** όλοι οι τύποι των υπερπυκνωτών επιτυγχάνουν χαμηλότερη τιμή τάσης άνω του ορίου των 40 V σε όλα τα σενάρια και τους αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.

Η **διακύμανση SOC (%) των υπερπυκνωτών** έχει διαφορετική τιμή για κάθε σενάριο και για κάθε αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας του οχήματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-11. Τη μικρότερη διακύμανση, δηλαδή την καλύτερη σταθερότητα παροχής ενέργειας, παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4.

Πίνακας 5-11. Αξιολόγηση διακύμανσης SOC (%) των υπερπυκνωτών.									
Τύπος SC	Αλγόριθμος ενέργειας #1			Αλγόριθμος ενέργειας #2			Αλγόριθμος ενέργειας #3		
	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
Τύπος 1	2.05	2.34	1.79	2.3	2.58	2.04	2.88	2.86	2.1
Τύπος 2	2.09	2.4	1.78	2.33	2.64	2.04	2.93	2.92	2.16
Τύπος 3	1.92	2.14	1.71	2.16	2.37	2.01	2.62	2.61	2.09
Τύπος 4	1.78	1.93	1.71	2.04	2.17	2.01	2.32	2.32	2.09

Το **ποσοστό τελικής τιμής SOC (%) των υπερπυκνωτών** έχει διαφορετική τιμή για κάθε σενάριο και για κάθε αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας του οχήματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-12. Το μεγαλύτερο ποσοστό τελικής τιμής SOC (%) παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 3 για όλα τα σενάρια και για τους τρεις αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας.

Πίνακας 5-12. Αξιολόγηση τελικής τιμής SOC (%) των υπερπυκνωτών.

Τύπος SC	Αλγόριθμος ενέργειας #1			Αλγόριθμος ενέργειας #2			Αλγόριθμος ενέργειας #3		
	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
Τύπος 1	95.53	95.39	95.39	95.27	95.15	95.14	95.27	95	95.14
Τύπος 2	94.82	94.68	94.68	94.57	94.43	94.43	94.57	94.3	94.43
Τύπος 3	95.65	95.53	95.53	95.38	95.28	95.28	95.38	95.1	95.28
Τύπος 4	90.67	90.59	90.58	90.41	90.34	90.34	90.41	90.15	90.34

Η **κατανάλωση υδρογόνου** έχει διαφορετική τιμή για κάθε σενάριο και για κάθε αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας του οχήματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-13. Τη μικρότερη κατανάλωση υδρογόνου εμφανίζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4 για όλα τα σενάρια και για τους τρεις αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.

Πίνακας 5-13. Αξιολόγηση κατανάλωσης υδρογόνου (Liters).

Τύπος SC	Αλγόριθμος ενέργειας #1			Αλγόριθμος ενέργειας #2			Αλγόριθμος ενέργειας #3		
	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
Τύπος 1	15.67	16.42	9.201	15.37	16.12	8.908	15.46	16.19	8.922
Τύπος 2	15.68	16.43	9.211	15.38	16.13	8.92	15.47	16.21	8.933
Τύπος 3	15.6	16.35	9.132	15.3	16.05	8.832	15.43	16.11	8.854
Τύπος 4	15.41	16.15	8.921	15.07	15.81	8.584	15.25	15.84	8.613

Η **κατανάλωση ενέργειας κυψέλης καυσίμου** έχει διαφορετική τιμή για κάθε σενάριο και για κάθε αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας του οχήματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-14. Τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στην κυψέλη καυσίμου παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4 για όλα τα σενάρια και για τους τρεις αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος.

Πίνακας 5-14. Αξιολόγηση κατανάλωσης ενέργειας (Wh) κυψέλης καυσίμου.

Τύπος SC	Αλγόριθμος ενέργειας #1			Αλγόριθμος ενέργειας #2			Αλγόριθμος ενέργειας #3		
	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
Τύπος 1	41.02	43.02	25.44	40.27	42.28	24.68	40	41.84	24.66
Τύπος 2	41.04	43.04	25.46	40.3	42.31	24.71	40.03	41.88	24.69
Τύπος 3	40.84	42.84	25.25	40.05	42.06	24.45	39.83	41.61	24.44
Τύπος 4	40.32	42.3	24.71	39.42	41.42	23.8	39.25	40.92	23.78

5.4.2 Ως προς το σύνολο των κριτηρίων

Σε αυτή την ενότητα, οι εναλλακτικοί τύποι υπερπυκνωτών αξιολογούνται ως προς το σύνολο των κριτηρίων, για κάθε σενάριο και για τους τρεις αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας του οχήματος. Για το κάθε μέγεθος που λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση υπολογίζεται η ανά μονάδα (per unit - pu) τιμή του και πολλαπλασιάζεται με την τιμή που αντιστοιχεί στο ποσοστό βαρύτητας του.

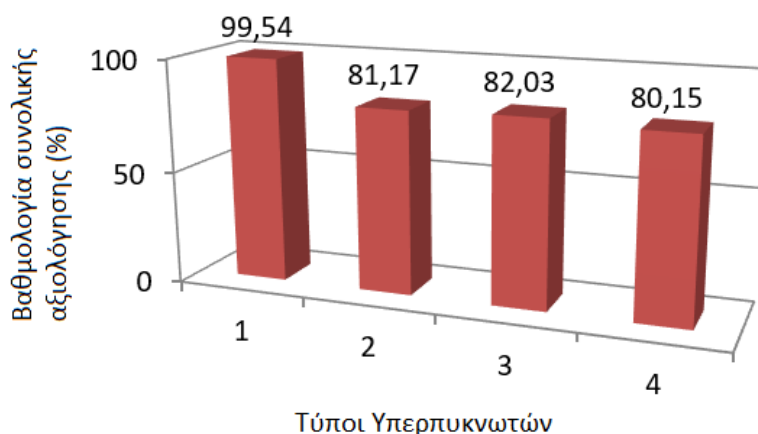
Για τον υπολογισμό της ανά μονάδα τιμής όλων των μεγεθών, θεωρείται ως τιμή αναφοράς η μεγαλύτερη και διαιρούνται όλες οι τιμές τους με αυτήν εκτός του ποσοστού τελικής τιμής SOC (%) όπου γίνεται αντιστροφή των τιμών του, η μεγαλύτερη από αυτές θεωρείται τιμή αναφοράς και διαιρούνται όλες οι τιμές του με αυτήν.

Θεωρείται καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης αυτή με το μικρότερο ποσοστό.

- **Σενάριο I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-15 και στο Σχήμα 5-151.

Πίνακας 5-15. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών						Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
Τύπος	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.9809	0.9491	0.9994	0.9995	99.54
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.9562	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.9187	0.9479	0.9949	0.9951	82.03
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.8517	1	0.9828	0.9825	80.15



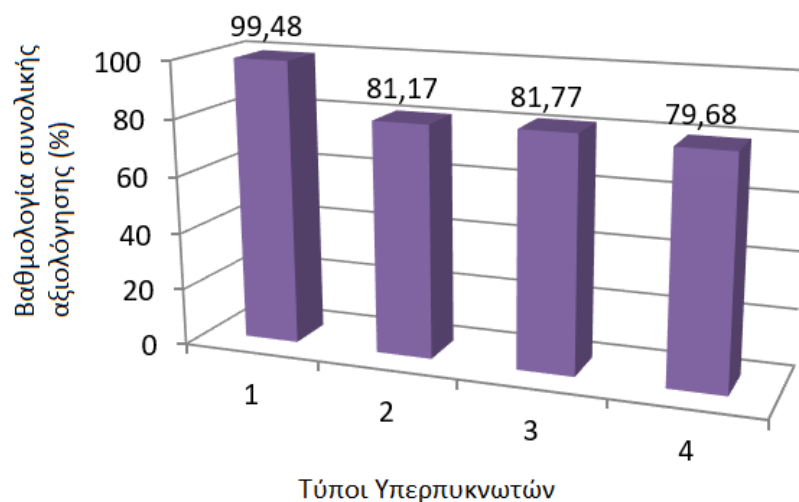
Σχήμα 5-151. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.

- **Σενάριο II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-16 και στο Σχήμα 5-152.

Πίνακας 5-16. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.

Τύπος	Συστοιχίες Υπερπυκνωτών					Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.975	0.9497	0.9994	0.9995	99.48
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.9568	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.509	ΝΑΙ	0.8917	0.9483	0.9951	0.9954	81.77
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.8042	1	0.983	0.9828	79.68



Σχήμα 5-152. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.

- **Σενάριο III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-17 και στο Σχήμα 5-153.

Πίνακας 5-17. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.

Τύπος	Συστοιχίες Υπερπυκνωτών					Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	1	0.9496	0.9989	0.9992	99.71
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	0.9944	0.9567	1	1	81.12
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.9553	0.9482	0.9914	0.9918	82.28
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.9553	1	0.9685	0.9705	80.72

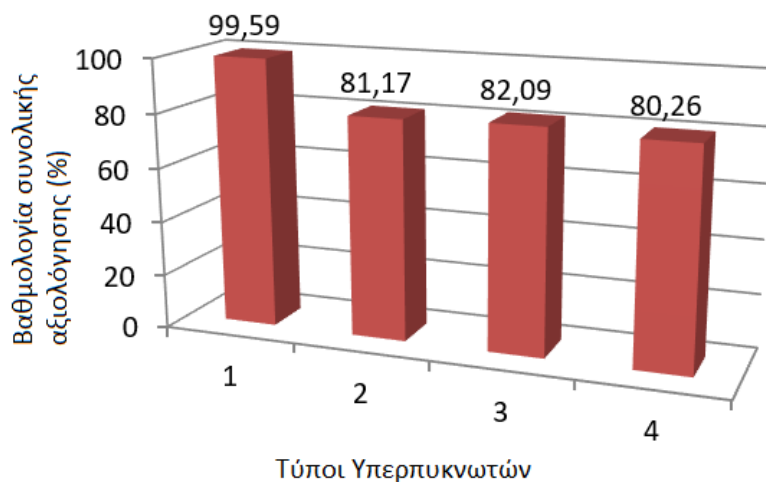
**Σχήμα 5-153. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #1.**

- Σενάριο I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-18 και στο Σχήμα 5-154.

Πίνακας 5-18. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.

Τύπος	Συστοιχίες Υπερπυκνωτών					Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.9871	0.949	0.9993	0.9993	99.59
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.956	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.927	0.9479	0.9948	0.9938	82.09
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.8755	1	0.9798	0.9782	80.26



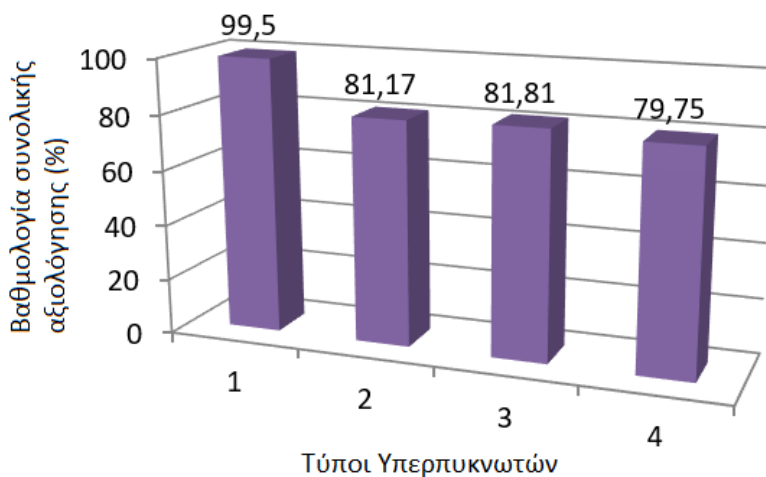
Σχήμα 5-154. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.

- **Σενάριο II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-19 και στο Σχήμα 5-155.

Πίνακας 5-19. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.

Τύπος	Συστοιχίες Υπερπυκνωτών					Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.9773	0.9494	0.9994	0.9993	99.5
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.9567	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.8977	0.9482	0.995	0.9941	81.81
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.822	1	0.9802	0.979	79.75

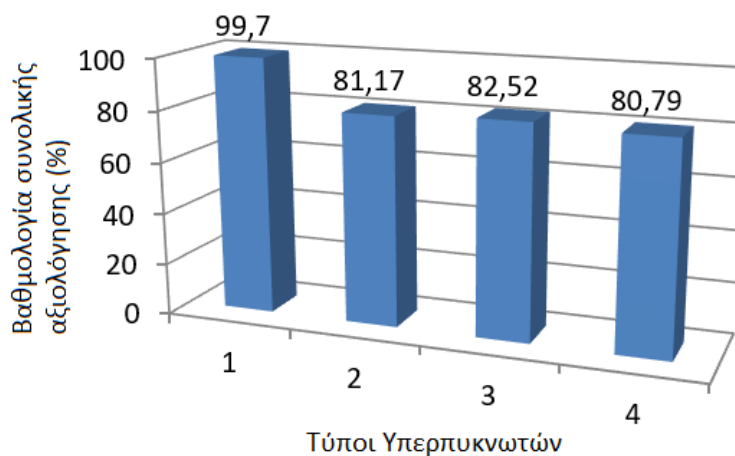


Σχήμα 5-155. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.

- **Σενάριο III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-20 και στο Σχήμα 5-156.

Πίνακας 5-20. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.								
Συστοιχίες Υπερπυκνωτών						Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
Τύπος	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	1	0.9495	0.9987	0.9988	99.7
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.9567	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.509	ΝΑΙ	0.9853	0.9482	0.9901	0.9895	82.52
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.9853	1	0.9623	0.9632	80.79



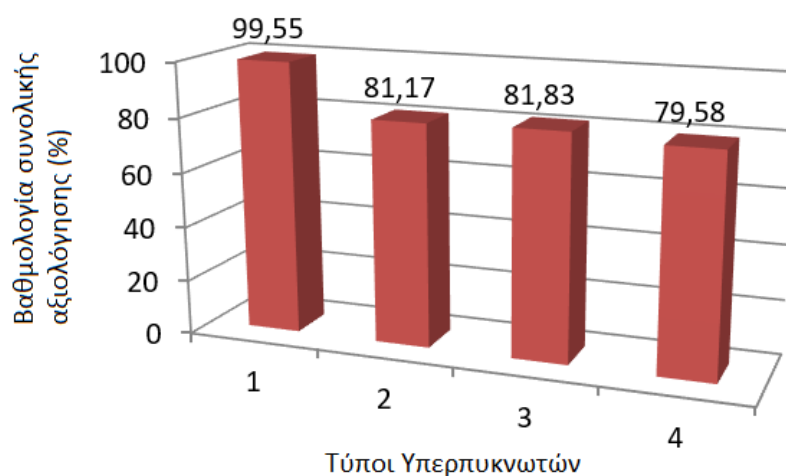
Σχήμα 5-156. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #2.

- **Σενάριο I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-21 και στο Σχήμα 5-157.

Πίνακας 5-21. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.

Συστοιχίες Υπερπυκνωτών						Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
Τύπος	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (ρμ) (30%)	Κόστος (ρμ) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (ρμ) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (ρμ) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (ρμ) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (ρμ) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.9829	0.949	0.9994	0.9993	99.55
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.956	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.8942	0.9479	0.9974	0.995	81.83
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.7918	1	0.9858	0.9805	79.58

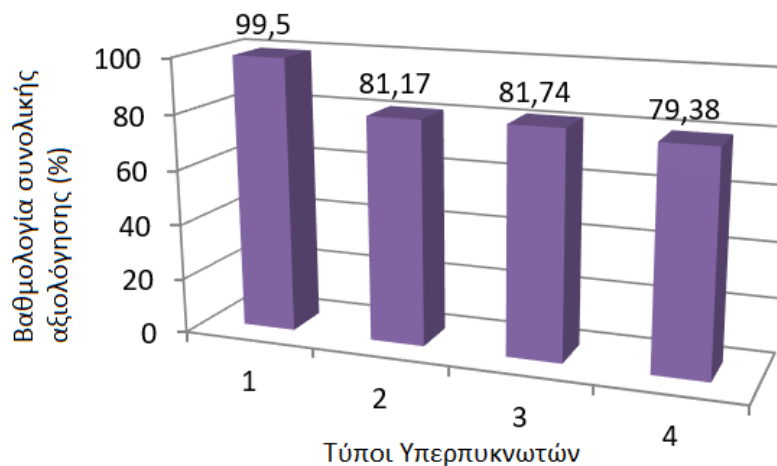
**Σχήμα 5-157. Αξιολόγηση σεναρίου I με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.**

- Σενάριο II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-22 και στο Σχήμα 5-158.

Πίνακας 5-22. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.

Συστοιχίες Υπερπυκνωτών						Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
Τύπος	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (ρμ) (30%)	Κόστος (ρμ) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (ρμ) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (ρμ) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (ρμ) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (ρμ) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.9795	0.9489	0.9988	0.999	99.5
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.956	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.8938	0.9479	0.9938	0.9936	81.74
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.7945	1	0.9772	0.9771	79.38



Σχήμα 5-158. Αξιολόγηση σεναρίου II με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.

- **Σενάριο III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3:**

Την καλύτερη βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης παρουσιάζει η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-23 και στο Σχήμα 5-159.

Πίνακας 5-23. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.

Τύπος	Συστοιχίες Υπερπυκνωτών					Κυψέλη Καυσίμου		Βαθμολογία συνολικής αξιολόγησης (%)
	Βάρος ανά μονάδα χωρ/τας (pu) (30%)	Κόστος (pu) (15%)	Τάση πάντα >40 V (Ναι/Όχι) (5%)	Διακύμανση SOC (pu) (10%)	Ποσοστό τελικής τιμής SOC (pu) (5%)	Κατανάλωση υδρογόνου (pu) (20%)	Κατανάλωση ενέργειας (pu) (15%)	
Τύπος 1	1	1	ΝΑΙ	0.9722	0.9495	0.9988	0.9988	99.43
Τύπος 2	0.6907	0.377	ΝΑΙ	1	0.9567	1	1	81.17
Τύπος 3	0.6907	0.503	ΝΑΙ	0.9676	0.9482	0.9912	0.9899	82.37
Τύπος 4	0.5464	0.723	ΝΑΙ	0.9676	1	0.9642	0.9631	80.65



Σχήμα 5-159. Αξιολόγηση σεναρίου III με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας #3.

6. Συμπεράσματα

Οι υπερπυκνωτές, επειδή έχουν πολλαπλάσια χωρητικότητα συγκριτικά με τους απλούς πυκνωτές, δηλαδή μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, αλλά και υπερέχουν από τις μπαταρίες ως προς την πυκνότητα ισχύος, είναι αποδοτικότεροι και καταλληλότεροι για τα ηλεκτρικά οχήματα ως μονάδες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Για τους παραπάνω λόγους, η μελέτη της βελτιστοποίησης σχεδιασμού συστήματος αποθήκευσης με υπερπυκνωτές παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται θεωρητική έρευνα για τα χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών, καθώς και για τη σημασία και τη διαδικασία εξισορρόπησης της τάσης τους (balancing). Στη συνέχεια, περιγράφεται η τοπολογία του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος και τα ηλεκτρικά στοιχεία που την αποτελούν. Ακολουθεί η μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Τέλος, για την προσομοίωση επιλέγονται τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας του οχήματος, για τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του (drive cycle) και για τέσσερις διαφορετικούς τύπους υπερπυκνωτών, και εξάγονται τα τελικά αποτελέσματα.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη κάθε κριτήριο αξιολόγησης ξεχωριστά, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4 είναι η πιο κατάλληλη για σύστημα αποθήκευσης ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί επιτυγχάνει τις καλύτερες επιδόσεις στο βάρος ανά μονάδα χωρητικότητας, στη διακύμανση SOC (%) των υπερπυκνωτών, στην κατανάλωση υδρογόνου και στην κατανάλωση ενέργειας της κυψέλης καυσίμου. Υστερεί μόνο στο κόστος αγοράς και στο ποσοστό τελικής τιμής SOC (%).

Από την άλλη, βάσει εκτίμησης του συνόλου των κριτηρίων αξιολόγησης ως προς τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας, συνάγεται ότι η συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4 είναι η πιο κατάλληλη για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος και για τους τρεις αλγόριθμους διαχείρισης ενέργειας.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των κριτηρίων αξιολόγησης ως προς τα σενάρια λειτουργίας του οχήματος, καταδεικνύεται ότι για όλα τα σενάρια ο καλύτερος αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας είναι ο #3 με τη συστοιχία υπερπυκνωτών τύπου 4 ως καταλληλότερο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος.

Συμπερασματικά, αν ξεπεραστεί η δυσκολία του κόστους αγοράς των υπερπυκνωτών, η συστοιχία τύπου 4 είναι η καταλληλότερη για να χρησιμοποιηθεί ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος.

Η προτεινόμενη μοντελοποίηση σε περιβάλλον Matlab/Simulink του ηλεκτρικού συστήματος οχημάτων που χρησιμοποιούν τεχνολογία κυψελών καυσίμου για την

παραγωγή ενέργειας και υπερπυκνωτών ως σύστημα αποθήκευσης μπορεί να αξιοποιείται σε παρόμοιες προσπάθειες βελτιστοποίησης σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Γεώργιου Κ. Κοκκινάκη και Γεώργιου Ιωάν. Καρύδη "ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ ΙΙ", Ίδρυμα Ευγενίδου 1995.
- [2] Δ. Ρήγας "Τεχνολογία Ηλεκτρονικών Εξαρτημάτων", Εκδόσεις Τζιόλα, 1995.
- [3] J. Sung and C. Shin, "Recent Studies on Supercapacitors with Next-Generation Structures", *Micromachines*, vol. 1, no. 1, pp. 1-25 , December 2020, doi: 10.3390/mi11121125.
- [4] A.B. Cultura , Z. M Salameh, "Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application", *CISIA* 2015, vol. 1, no. 1, pp. 1-7 , June 2015, doi: 10.2991/cisia-15.2015.235.
- [5] Robert Chao, "The fundamentals of supercapacitor balancing", Advance linear devices Inc. [Online].
<http://www.aldinc.com/pdf/TheFundamentalsOfSupercapcitorBalancing.pdf>
- [6] A. F. Zobaa (Ed.) *Energy Storage - Technologies and Applications*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2013 [Online]. Available from:
<https://www.intechopen.com/books/2154> doi: 10.5772/2550
- [7] "A new method of balancing supercapacitors in a series stack using MOSFETs", Advanced linear devices. [Online].
<https://www.aldinc.com/pdf/ANewMethodofBalancingSupercapacitors.pdf>
- [8] "Hydrogen a replacement fuel", Energy Systems and Energy Storage lab (ESES). [Online]. <http://www.eseslab.com/ESsensePages/Hydrogen-page>
- [9] "FCgen-1020ACS 1.2 kW", QUINTECH. [Online].
<https://www.quintech.de/en/produkte/pem-fuel-cell-stacks/stacks-up-to-5-kw/fcgen-1020acs-12-kw/>
- [10] "Universal Buck-Boost Mini Regulator DC-DC", Elecdan Converter. [Online].
<https://elecdan-converter.com/universal-buck-boost-mini-regulator-dc-dc-3kw/>
- [11] J. C. Gamazo-Real , E. Vázquez-Sánchez, J. Gómez-Gil, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends", *Sensors*, vol. 10, no. 7, pp. 6901-6947, July 2010, doi:10.3390/s100706901.
- [12] "Fuel Cell Stack", Help Center, MathWorks. [Online].
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>

- [13] Khandker Tawfique Ahmed, Mithun Datta, Nur Mohammad, "A Novel Two Switch Non-inverting Buck-Boost Converter based Maximum Power Point Tracking System", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 3, no. 4, pp. 467-477, August 2013.
- [14] "Brushless DC Motor Fed by Six-Step Inverter", Help Center, MathWorks. [Online].
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/brushless-dc-motor-fed-by-six-step-inverter.html>
- [15] " Ultracapacitors Cells", Maxwell. [Online].
<https://maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/>
- [16] "Supercapacitor", Help Center, MathWorks. [Online].
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/supercapacitor.html>