

«Σχεδιασμός Ηλεκτρικών Μηχανών για Εξηλέκτριση των Μεταφορών» Υποδειγματική Ανάλυση



Καθηγητής Αντώνιος Γ. Κλαδάς

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

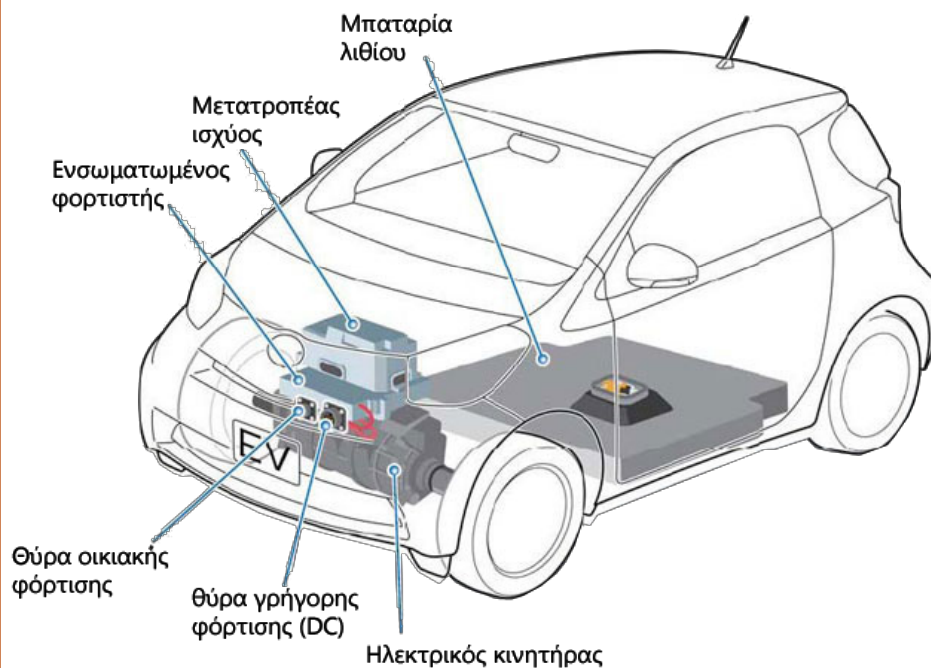
Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

Τηλ. 210-7723765, Fax: 210-7722336, e-mail: kladasel@central.ntua.gr

<http://empelab.ece.ntua.gr/>

Υποσυστήματα Ηλεκτροκίνησης: Ηλεκτροκινητήρας και Μετατροπέας Οδήγησης

Υποσυστήματα ηλεκτρικού οχήματος

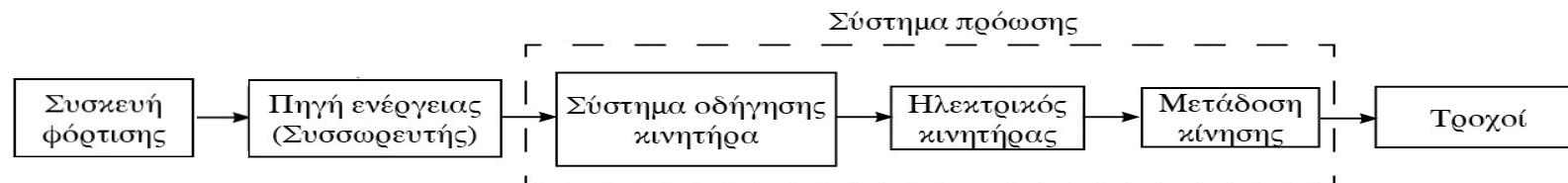


❖ Βασικές προδιαγραφές κινητήριου συστήματος

- Υψηλή στιγμιαία ισχύς (πυκνότητα ισχύος)
- Υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες
- Μεγάλο εύρος λειτουργίας (σταθερή ροπή & ισχύς)
- Άμεση απόκριση ισχύος
- Υψηλή απόδοση
- Υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα
- Χαμηλό κόστος

❖ Τύποι κινητήρων

- Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος
- Μηχανές Επαγωγής
- Κινητήρες Μαγνητικής Αντίστασης
- Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών
- Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών χωρίς ψήκτρες
- Υβριδικοί Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών



Συγκριτική αξιολόγηση ηλεκτρικών κινητήρων

Αξιολόγηση κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων

Αξιολόγηση 1-5	Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος	Κινητήρας Επαγωγής	Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών	Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης	Υβριδικοί Μονίμων Μαγνητών
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5	3.5	4
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5	5
Έλεγχος	5	4	4	3	4
Αξιοπιστία	3	5	4	5	4
Τεχνολογική ωριμότητα	5	5	4	4	3
Κόστος	4	5	3	4	3
Σύνολο	22	26	25	23	23

❖ **Σημαντικότερο κριτήριο η απόδοση του συστήματος**

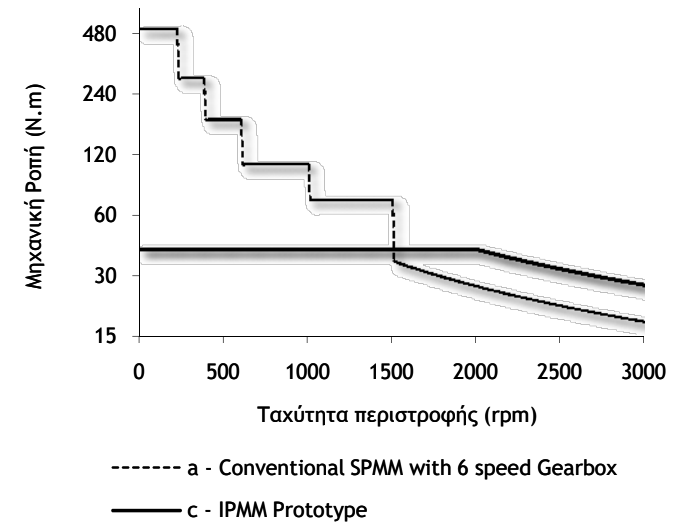
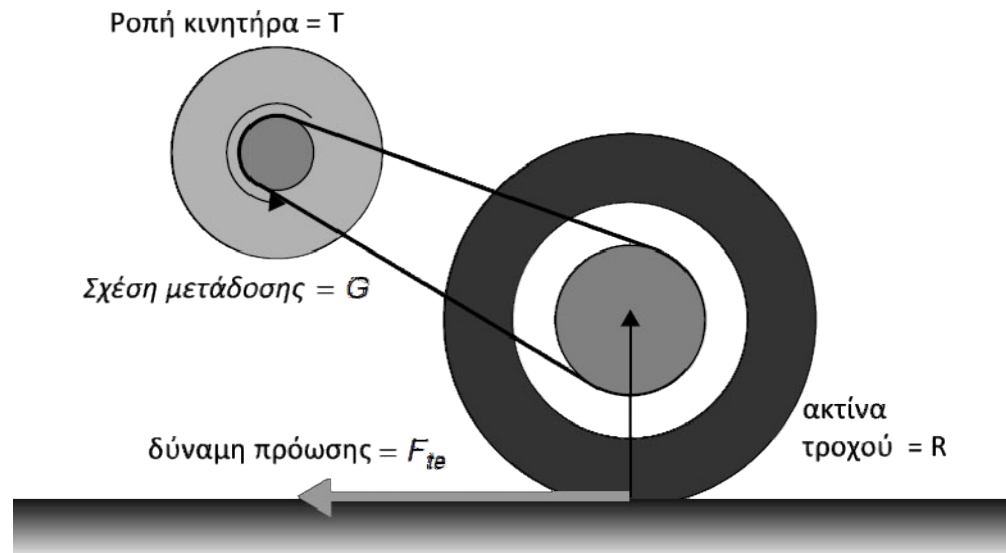
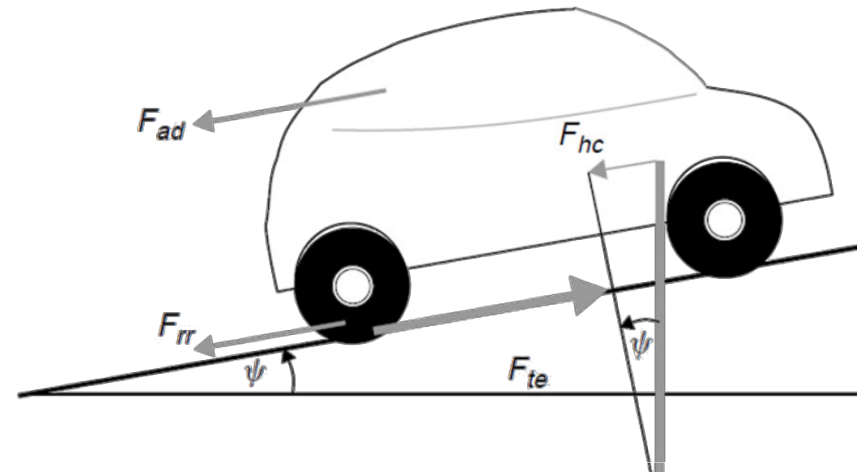
- οι μηχανές μονίμων μαγνητών επιτρέπουν την αποφυγή απωλειών χαλκού επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση

Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος

❖ Προκαταρκτική σχεδίαση

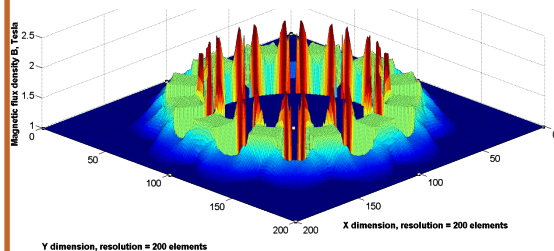
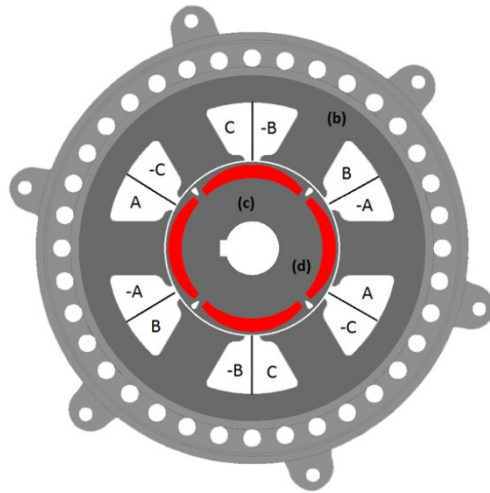
❖ Δύναμη πρόωσης

- Τριβές κύλισης
- Αεροδυναμική αντίσταση
- Συνιστώσα του βάρους
- Δυνατότητα επιτάχυνσης

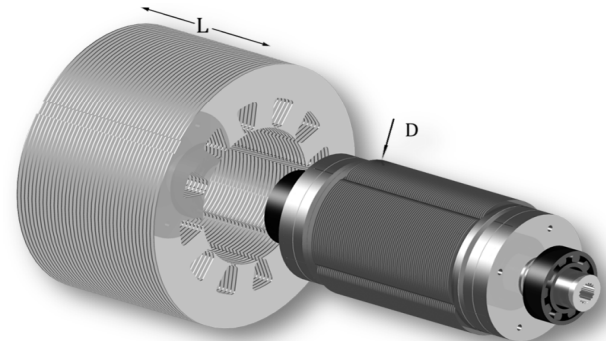


Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

❖ Βελτιστοποίηση γεωμετρίας



Χαρακτηριστικό	Ποσότητα
Τύπος κινητήρα	4-πόλοι, 3-φάσεις
Τροφοδοσία	3-φασικός αντιστροφέας
Εξωτερική διάμετρος στάτη	250 mm
Ενεργό μήκος κινητήρα	150 mm

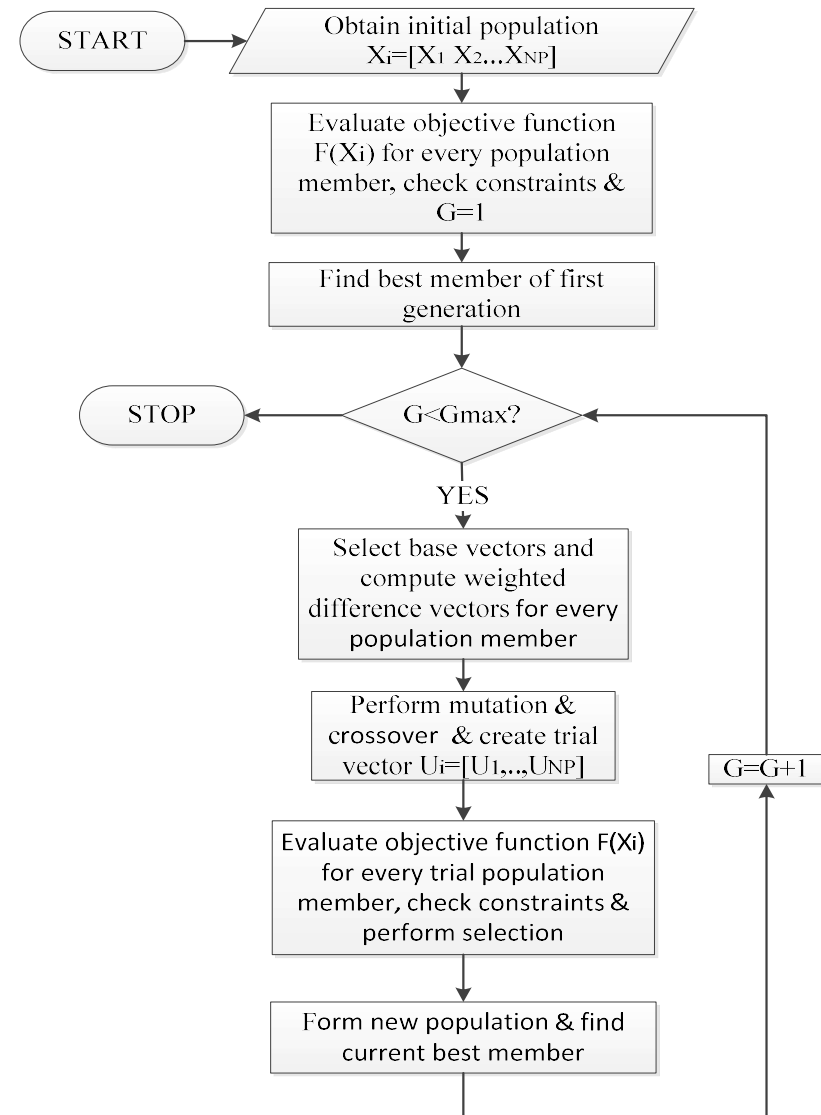


Τύπος μαγνήτη	Ενέργεια	Μηχανική αντοχή	Αντοχή σε θερμοκρασία	Κόστος
Alnico	χαμηλή	υψηλή	υψηλή	υψηλό
SmCo	υψηλή	πολύ μικρή	υψηλή	υψηλό
NdFeB	πολύ υψηλή	μικρή	χαμηλή	υψηλό
Ferrite	μέτρια	μικρή	μέτρια	χαμηλό

Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

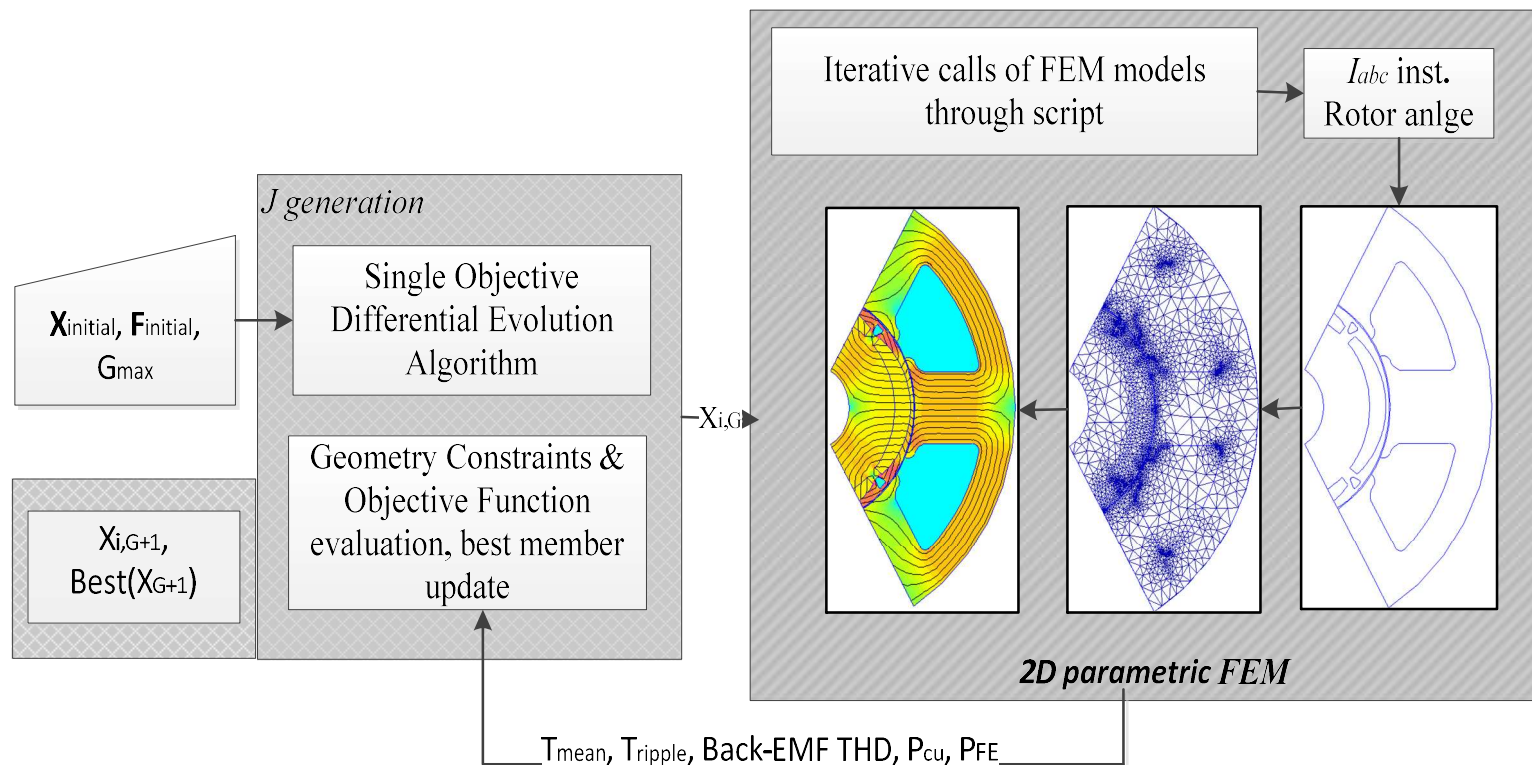
❖ Βελτιστοποίηση γεωμετρίας

- ❖ Η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης υλοποιεί μια μονοκριτηριακή εκδοχή του αλγόριθμου της διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution - DE).
- ❖ Η αντικειμενική συνάρτηση στόχου συνίσταται από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους στοχικών συναρτήσεων, που αφορούν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης, στη μεγιστοποίηση της επίδοσης, καθώς και στη μεγιστοποίηση της ποιότητας ισχύος του κινητήρα. Με αυτό τον τρόπο η ρουτίνα βελτιστοποίησης αποκτά πολυκριτηριακό χαρακτήρα.

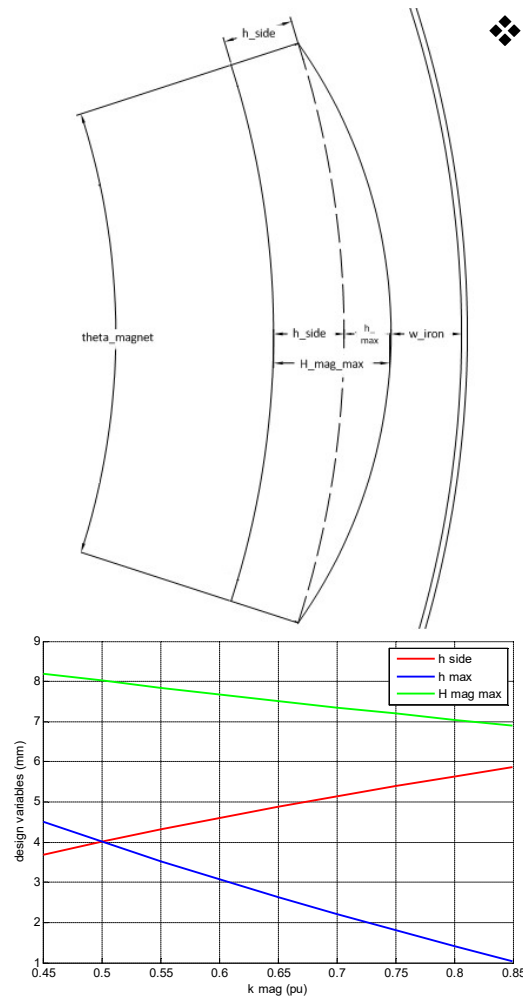


Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης τροφοδοτεί ένα παραμετρικό μοντέλο σχεδίασης και ανάλυσης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Η εκάστοτε γεωμετρία που προκύπτει από το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης που καθορίζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, αποτελεί ένα μέλος του πληθυσμού και αναλύεται σε κάθε επανάληψη, με σκοπό να αποτιμηθούν οι συναρτήσεις στόχου.

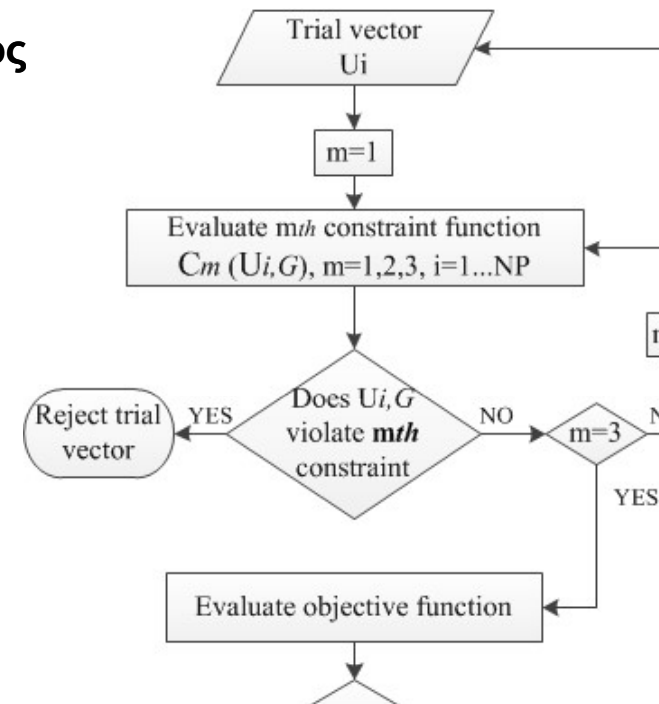


Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση



❖ Περιορισμοί προβλήματος Βελτιστοποίησης

Λεπτομέρεια μαγνήτη
και διάγραμμα
συνδυασμών τιμών
βασικών παραμέτρων
σχεδίασης που
εξασφαλίζουν τη
διατήρηση σταθερού
όγκου μαγνήτη.



Διάγραμμα ροής της διαδικασίας
ελέγχου των περιορισμών και
του υπολογισμού των
συναρτήσεων στόχου

Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

❖ Βελτιστοποίηση γεωμετρίας

Ο λόγος του πλάτους του βήματος του μόνιμου μαγνήτη προς το πλάτος του πολικού βήματος, ο λόγος του ύψους του ημιτονοειδούς τμήματος του μαγνήτη προς το ύψος του ακτινικού τμήματος του και το πλάτος της γέφυρας σιδήρου μεταξύ των μαγνητών και του διακένου του επιλέχθηκαν ως οι τρεις βασικές μεταβλητές βελτιστοποίησης, καθώς παίζουν βασικό ρόλο τόσο στην απόδοση όσο και στην επίδοση του κινητήρα.

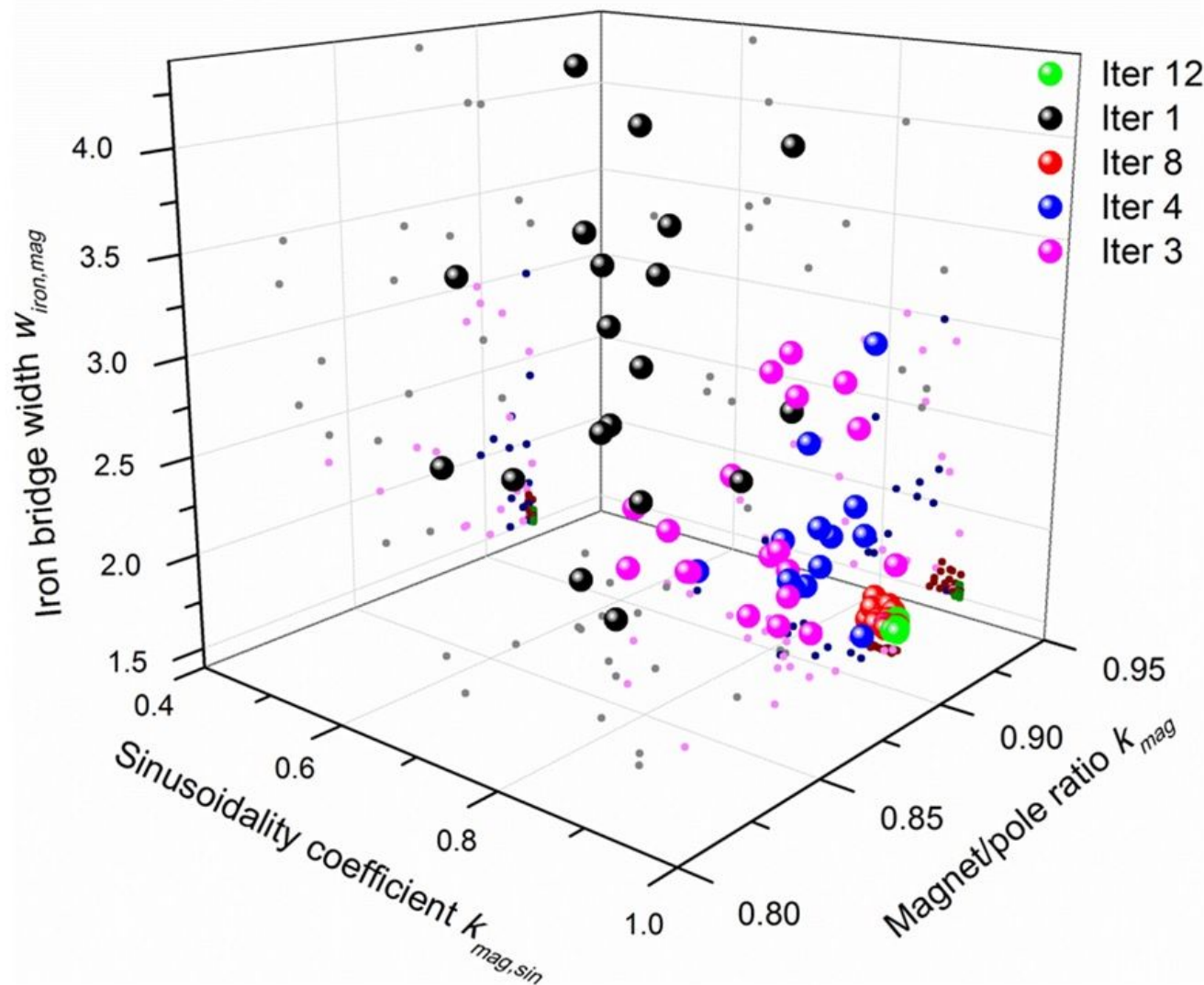
$$X_G = \begin{bmatrix} k_{\theta_mag} & k_{mag_sin} & w_{iron_mag} \end{bmatrix}$$

Το προφίλ της βελτιστοποίησης είναι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σύνθετο και η συνολική συνάρτηση κόστους έχει την παρακάτω μορφή:

$$F = w_1 \cdot \frac{T_{mean,0}}{T_{mean}} + w_2 \cdot \frac{T_{ripple}}{T_{ripple,0}} + w_3 \cdot \frac{THD_{EMF}}{THD_{EMF,0}} + w_4 \cdot \frac{(P_{Cu} + P_{Iron})}{(P_{Cu} + P_{Iron})_0}$$

Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

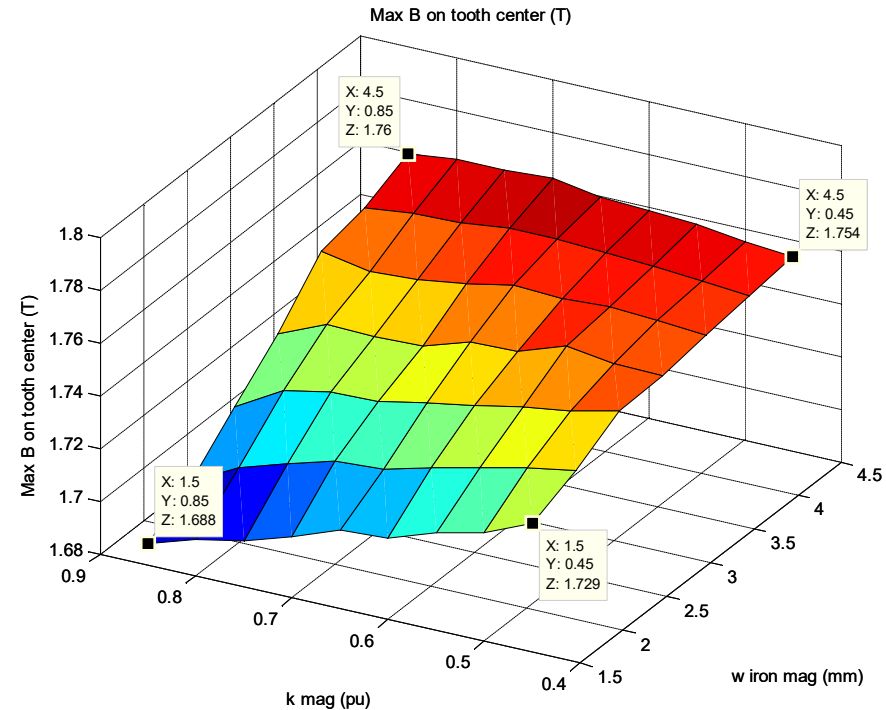
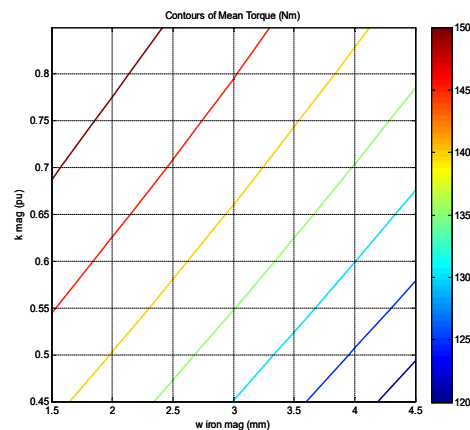
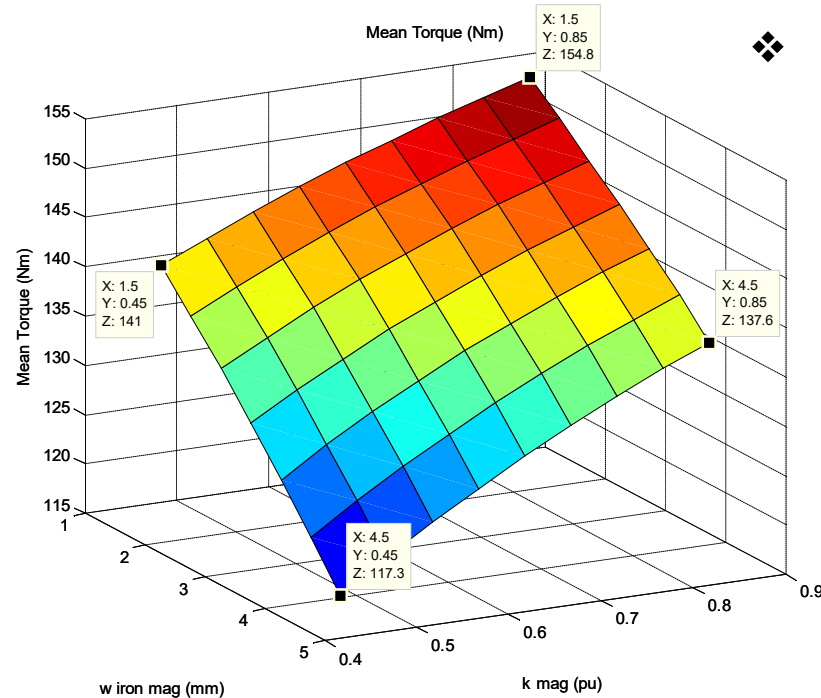
❖ Βελτιστοποίηση γεωμετρίας



- Εξέλιξη της κατανομής των μελών του τρέχοντος πληθυσμού του αλγορίθμου βελτιστοποίησης στον τρισδιάστατο χώρο των μεταβλητών σχεδίασης για διαφορετικούς αριθμούς επαναλήψεων του αλγορίθμου.
- Προβολές στα αντίστοιχα επίπεδα των μεταβλητών σχεδίασης
- Η εξέλιξη αυτή δείχνει ξεκάθαρα τη σύγκλιση σε ένα ολικό βέλτιστο.

Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

❖ Ανάλυση ευαισθησίας

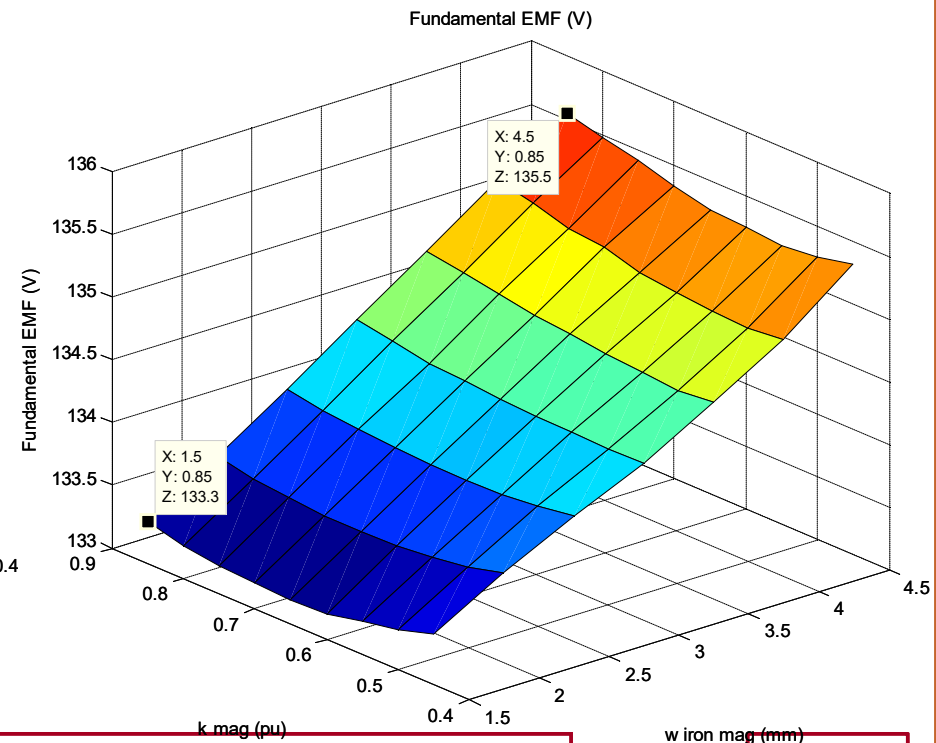
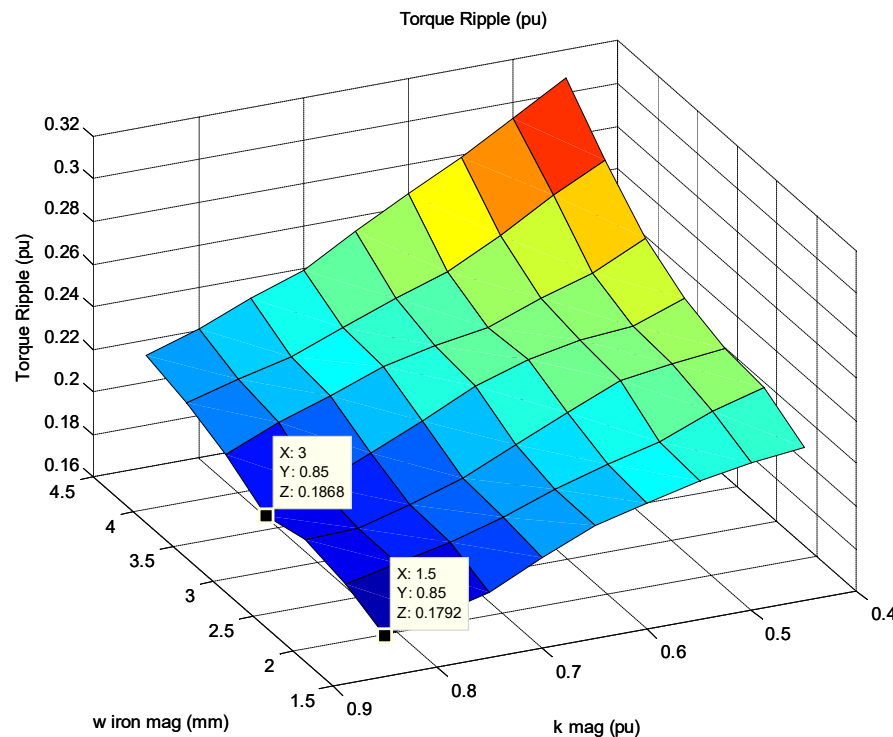


Μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μέγιστης τιμής πυκνότητας πεδίου στο δόντι του στάτη για διαφορετικές τιμές μεταβλητών σχεδίασης

Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

❖ Ανάλυση ευαισθησίας

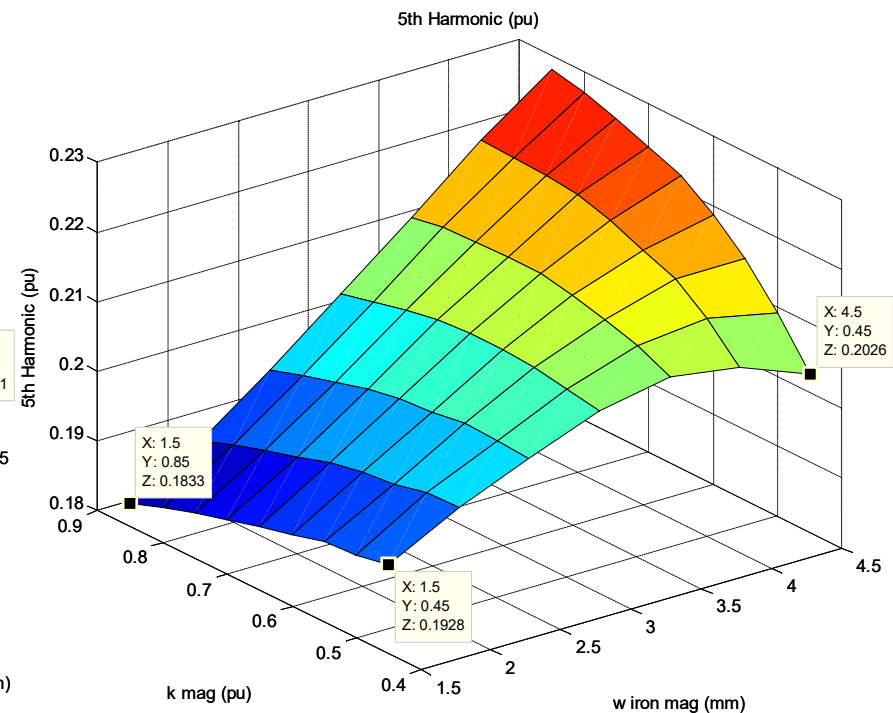
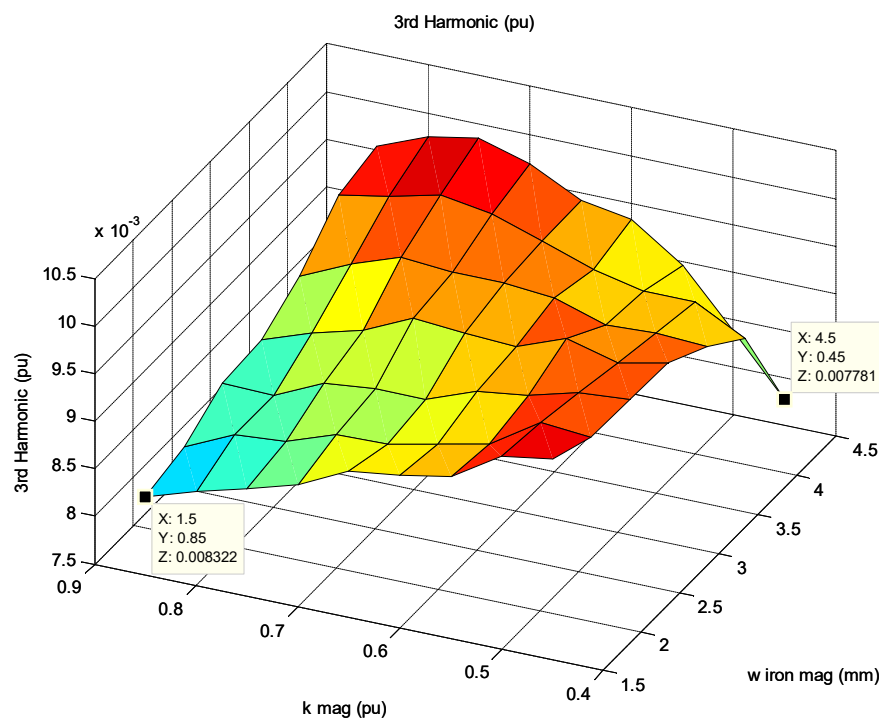
Μεταβολή της κυμάτωσης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της τιμής της θεμελιώδους συνιστώσας της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα για διαφορετικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης



Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

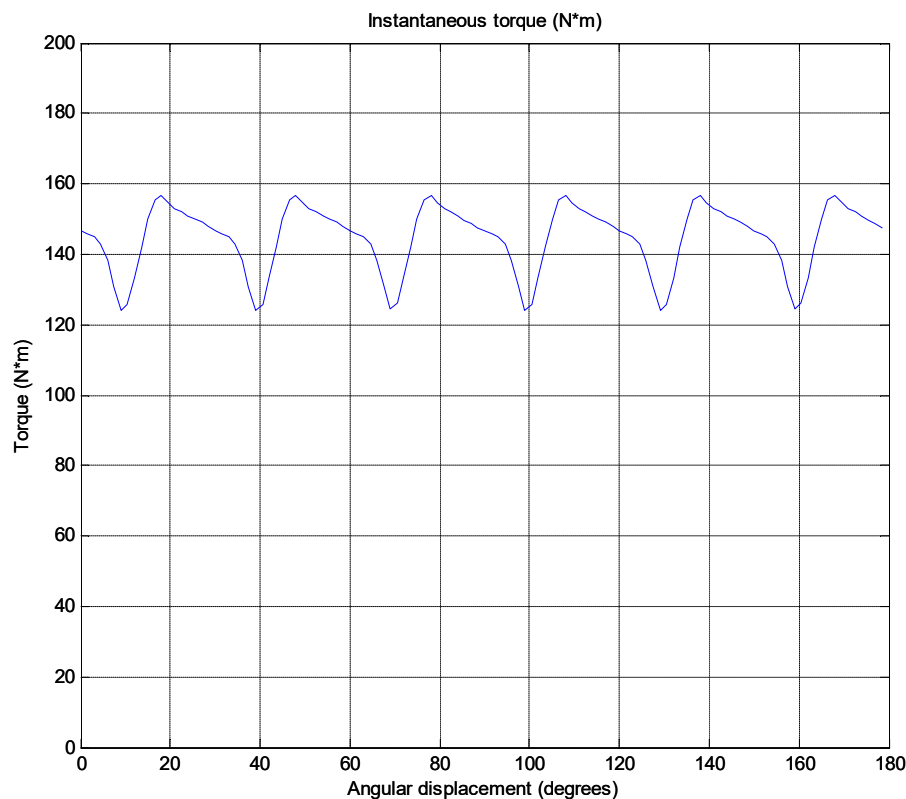
❖ Ανάλυση ευαισθησίας

Μεταβολή των τιμών των κυριότερων αρμονικών συνιστωσών της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα για διαφορετικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.

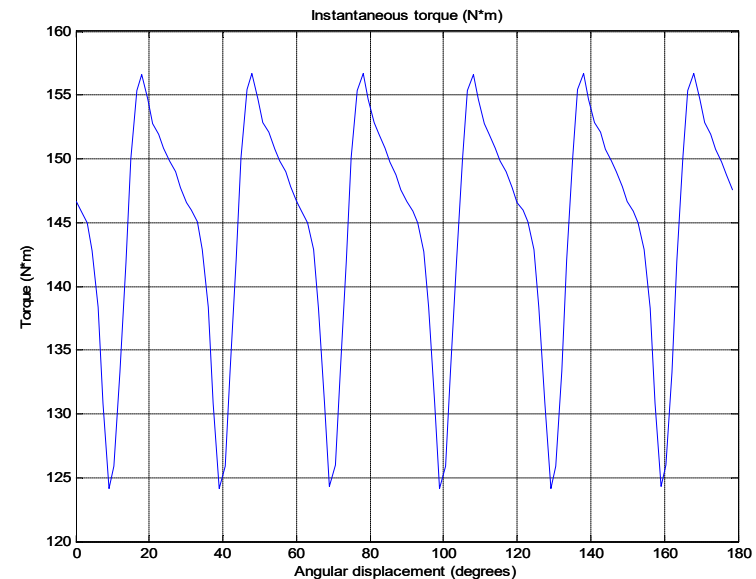


Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

❖ Τελική γεωμετρία



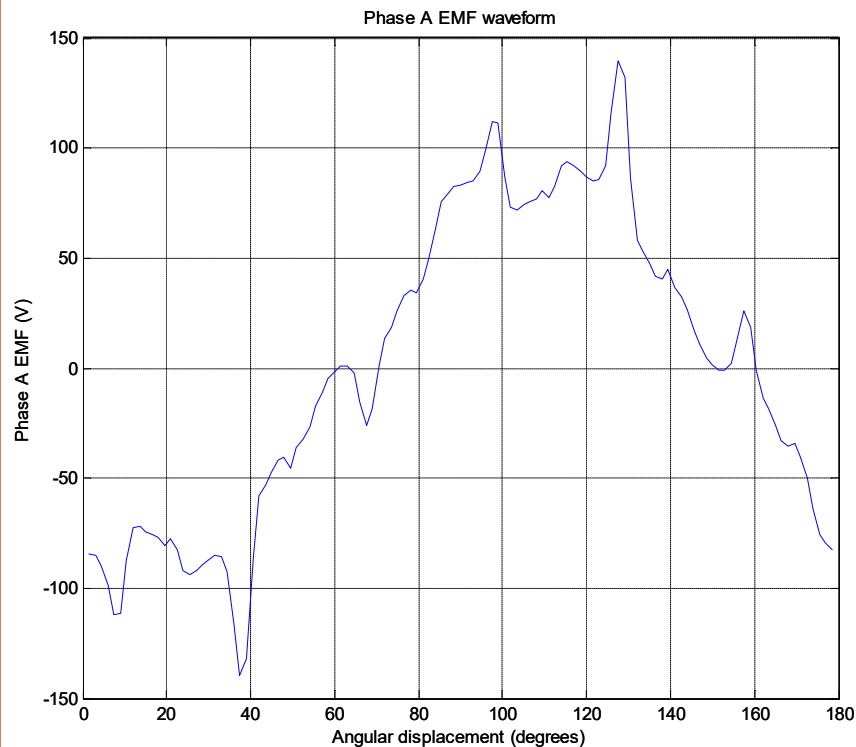
Κύρια χαρακτηριστικά επίδοσης του κινητήρα.



Mean torque	144.6904 Nm
Torque ripple	32.5727 Nm

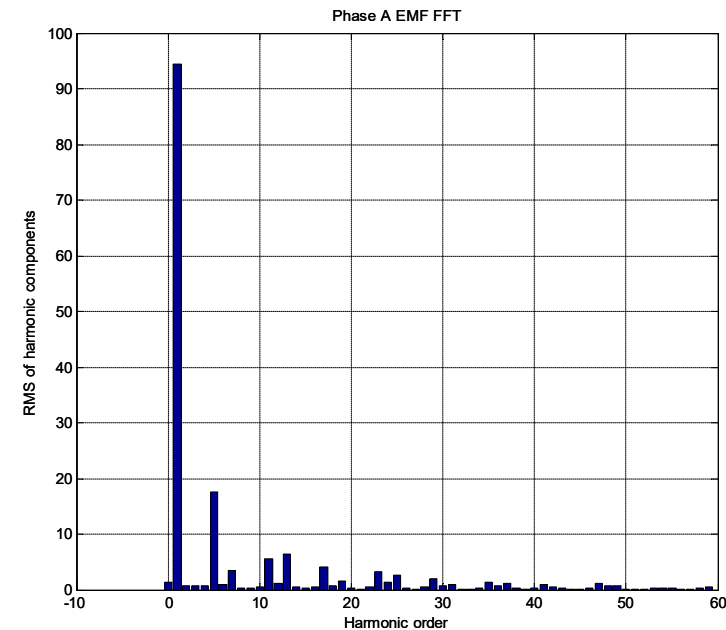
Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

❖ Τελική γεωμετρία

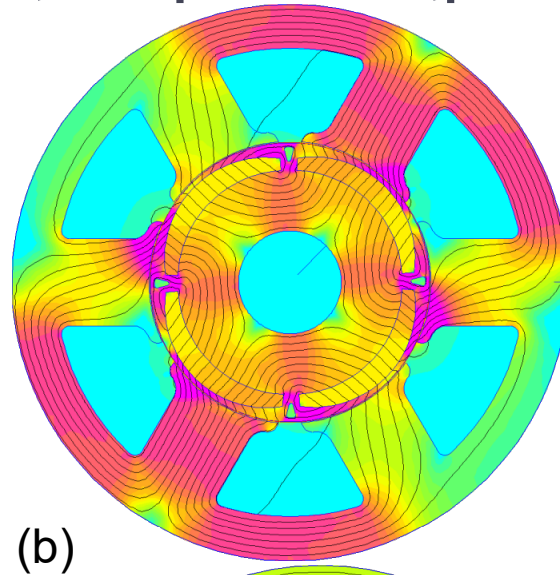
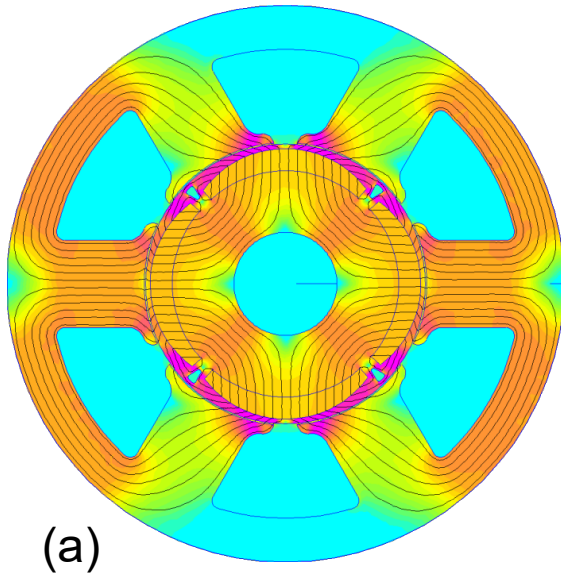


Κύρια χαρακτηριστικά απόδοσης του κινητήρα.

Fundamental component rms value = 94.38 V						
Harmonic order	3	5	7	9	11	13
% of fundamental value	0.78	17.52	3.38	0.29	5.6	6.48



Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση



B (T)

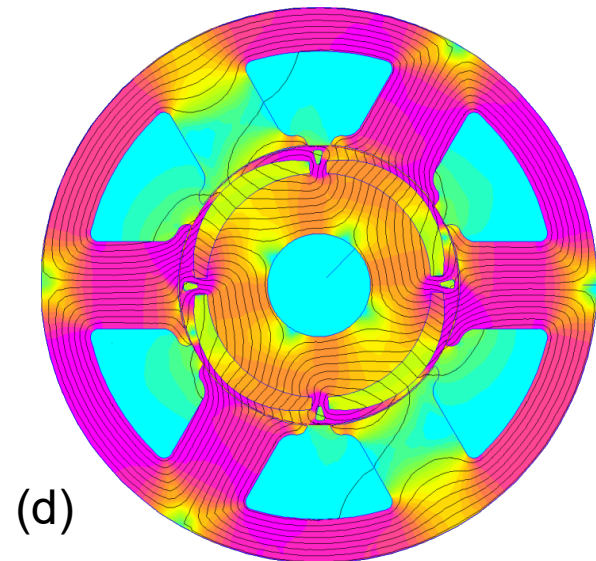
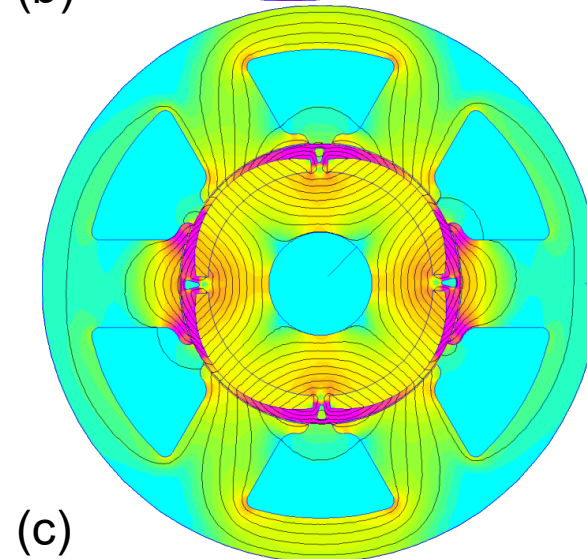
B (T)

Κατανομή του μαγνητικού πεδίου στον κινητήρα για λειτουργία ενίσχυσης ροπής για:

- Ονομαστικό φορτίο(a)
- Υπερφόρτιση (b)

Κατανομή του μαγνητικού πεδίου στον κινητήρα για λειτουργία εξασθένησης πεδίου για:

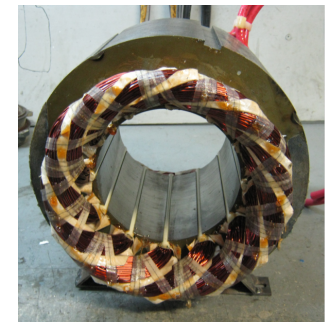
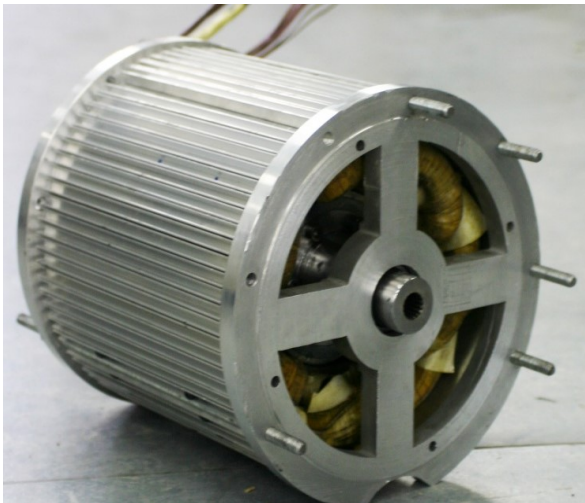
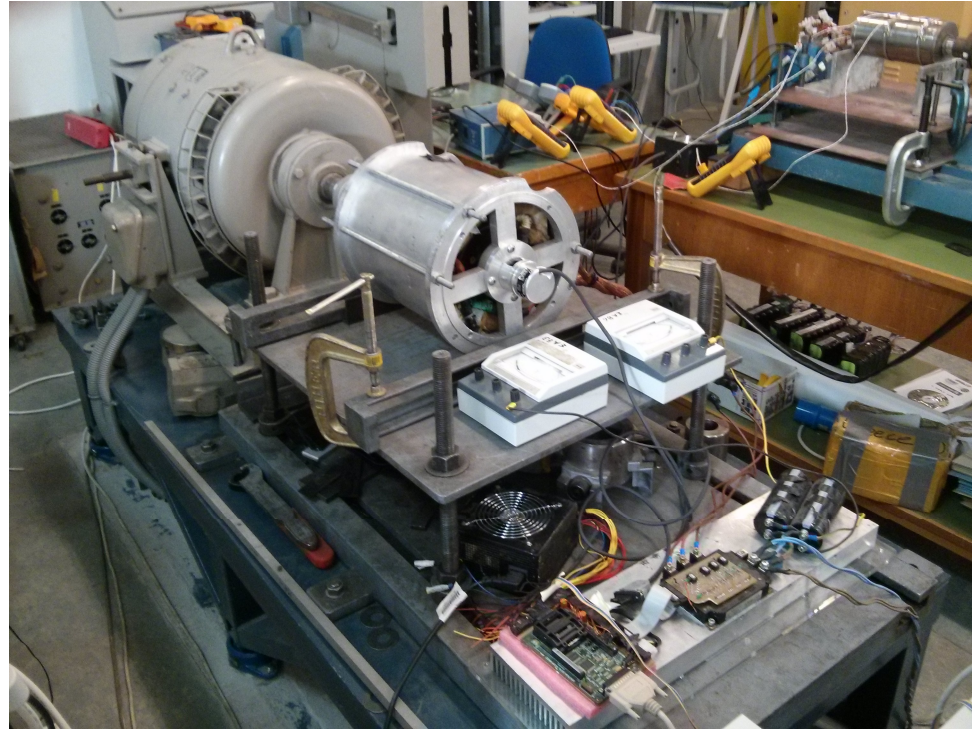
- Ονομαστικό φορτίο (c)
- Υπερφόρτιση (d)



Σχεδιασμός κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος: οριστική σχεδίαση

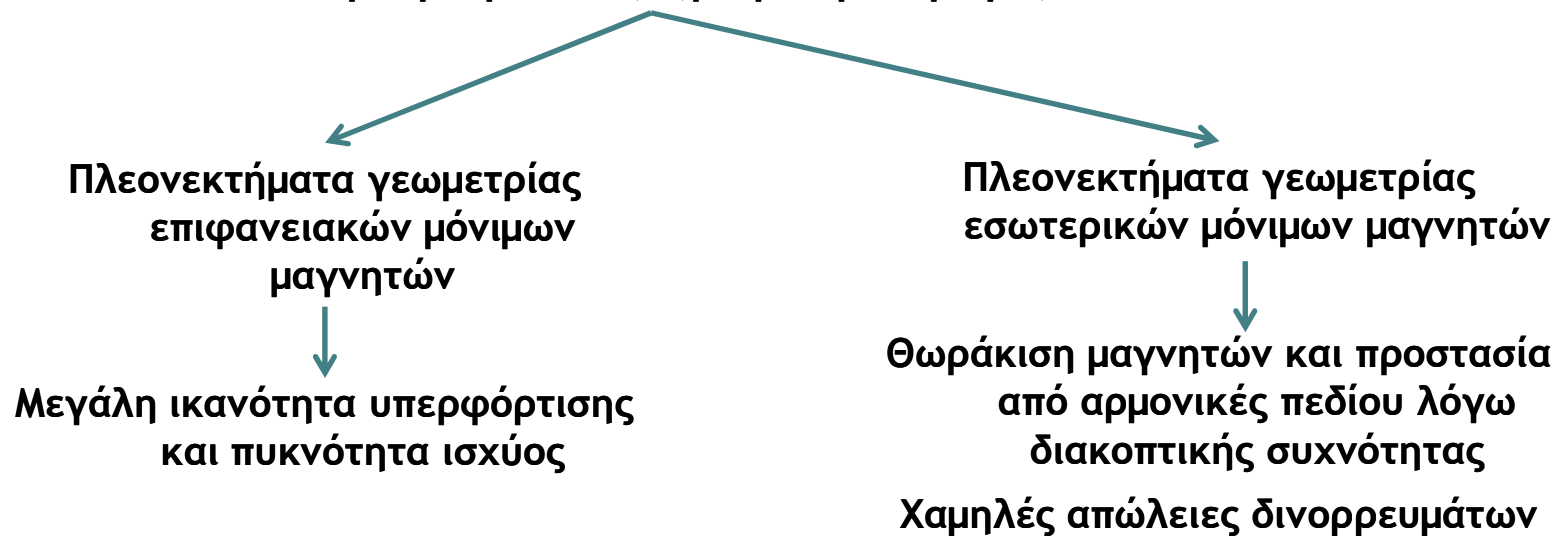
Χαρακτηριστικό	Ποσότητα
Ονομαστική ισχύς	100 kW
Ονομαστική ροπή	125 Nm
Μέγιστη ροπή	251 Nm
Ονομαστική ταχύτητα (άνευ εξασθένισης)	4500 ΣΑΛ
Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής	8500 ΣΑΛ
Ονομαστική φασική ενεργός τάση (4500 ΣΑΛ)	150 V
Βαθμός απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία	> 90%
Τοπολογία	εσωτερικού δρομέα
Βάρος κινητήρα (μαγνητικό κύκλωμα +χαλκός)	38 kG
Βάρος κινητήρα με κέλυφος και άξονα (τελική μορφή)	56 kG
Μέγιστες διαστάσεις (διάμετρος x αξονικό μήκος)	200 mm x 150 mm
Διάμετρος δρομέα	100,5 mm
Αριθμός ελιγμάτων	12
Πάχος αγωγών στάτη	25 mm ²
Συντελεστής πληρότητας αύλακος	70%
Ωμική αντίσταση ανά φάση	~ 8 mΩ

Εργαστηριακές μετρήσεις



Σημεία Καινοτομίας Προτεινόμενου Σχεδιασμού

❖ Νέα γεωμετρία κινητήρα μόνιμων μαγνητών



❖ Μόνιμοι μαγνήτες ημιτονικού σχήματος - Ημιτονικότητα πεδίου και αντι-ΗΕΔ

❖ Βέλτιστη αξιοποίηση προηγμένων υλικών

❖ Δυνατότητα εξασθένισης πεδίου - μαγνήτες θαμμένοι στο δρομέα