

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Ηλεκτρικές Μηχανές
Ατομική εργασία μαθήματος

Παυλόπουλος Χρήστος 2018030139

Χανιά, Δεκέμβριος 2022

Υπολογισμός χαρακτηριστικών της άσκησης με βάση τον Α.Μ. :

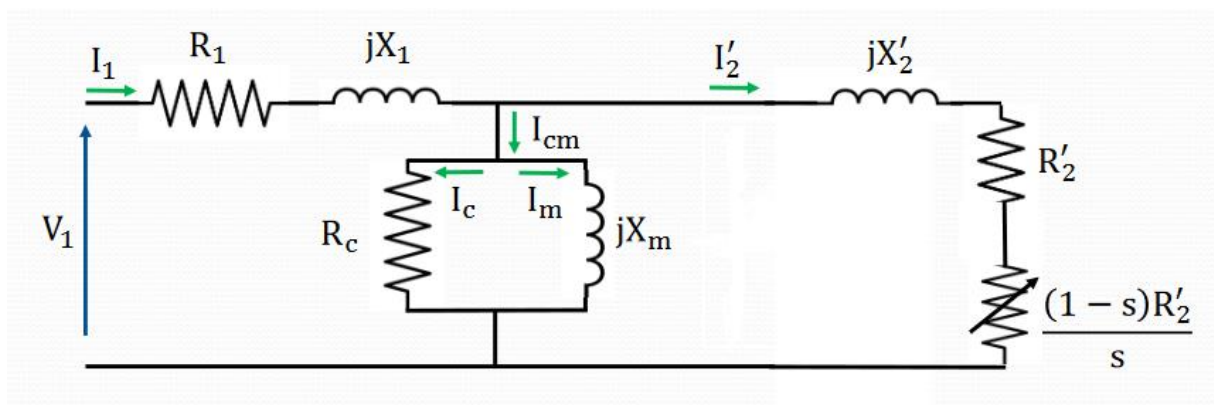
- Τάση λειτουργίας: 400V
- Πόλοι: 4
- Συχνότητα: 60Hz
- Σύνδεση: Τρίγωνο

Υπολογισμός παραμέτρων από τα τεστ συνεχούς ρεύματος (direct current), ακινητοποιημένου δρομέα (locked rotor) και εν κενώ (no load).

- Από το τεστ DC: Μέτρηση ωμομέτρου 1.4Ω
- Από το τεστ LR: $V_{ph} = 100V$, $I_L = 10.6A$, $P_{ph} = 332W$
- Από το τεστ NL: $I_L = 1.9A$, $P_{ph} = 136W$

Ερώτημα Α)

Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα έχει την παρακάτω μορφή:

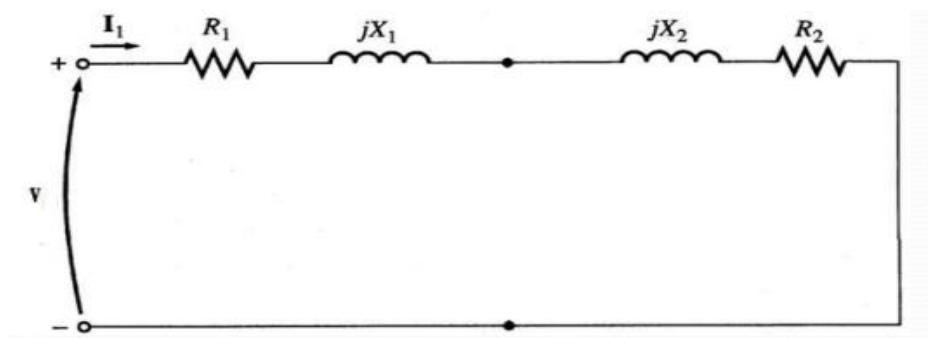


Αρχικά μετατρέπω τα δοσμένα μεγέθη σε φασικά. Έχοντας σύνδεση σε τρίγωνο η δεδομένη τιμή τάσης είναι και η φασική τιμή. Το ρεύμα γραμμής διαιρείται με $\sqrt{3}$ για να έχω την φασική του τιμή.

Από το DC test μετريέται η τάση του τυλίγματος στάτη άρα έχω $R_1 = 1.4\Omega$

Για το LR test αρχικά μετατρέπω το ρεύμα από γραμμής σε φασικό $I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = 6.12A$. Ο δρομέας κλειδώνεται στην ακινησία και έτσι η ολίσθηση γίνεται $s = 1$. Η αντίσταση του δρομέα γίνεται ελάχιστη και τα στοιχεία του παράλληλου κλάδου αμελούνται.

Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζει την παρακάτω μορφή:



Έχουμε τις παρακάτω πράξεις:

$$|S_{ph}| = |V_{ph}| \cdot |I_{ph}| = 100 \cdot 6.12 = 612 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi = P_{ph} / S_{ph} = 0.54$$

$$\varphi = 57.3^\circ$$

$$S_{ph} = 612 \angle 57.3^\circ \text{ VA}$$

$$Q_{ph} = \sqrt{S_{ph}^2 - P_{ph}^2} = 515 \text{ VAR}$$

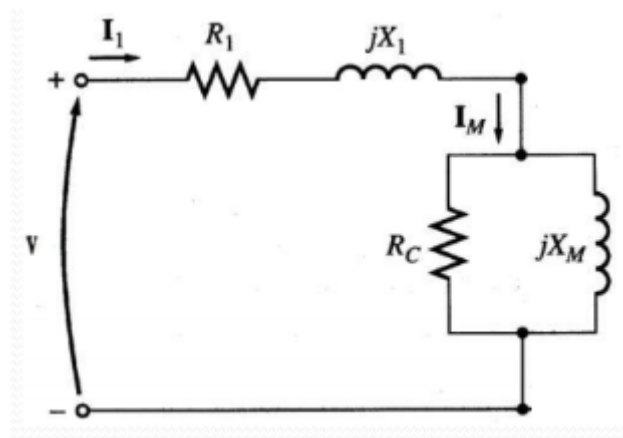
$$P_{ph} = I_{ph}^2 \cdot (R_1 + R_2') \Rightarrow (R_1 + R_2') = P_{ph} / I_{ph}^2 \Rightarrow R_2' = 7.46 \Omega$$

$$Q_{ph} = I_{ph}^2 \cdot (X_1 + X_2') \Rightarrow (X_1 + X_2') = Q_{ph} / I_{ph}^2 = 13.75 \Omega$$

$$\text{Υποθέτω, } X_1 = X_2' = 6.875 \Omega$$

Για το NL test, έχουμε τον κινητήρα να τροφοδοτείται με ονομαστική τάση $V_{ph} = 400\text{V}$ και στρέφεται με τον δρομέα να μην συνδέεται με φορτίο. Άρα το ρεύμα στον δρομέα είναι σχεδόν μηδέν και αμελούμε την σύνθετη αντίσταση του δρομέα.

Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα γίνεται:



Από τα δεδομένα βρίσκω $I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = 1.09\text{A}$ και έχω $P_{ph} = 136\text{W}$.

Έχουμε τις παρακάτω πράξεις:

$$I_M \approx I_1$$

$$P_1 = I_{ph}^2 \cdot R_1 = 1.66 \text{ W}$$

$$Q_1 = I_{ph}^2 \cdot X_1 = 8.17 \text{ VAR}$$

$$|S_{ph}| = |V_{ph}| \cdot |I_{ph}| = 400 \cdot 1.09 = 436 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi = P_{ph} / S_{ph} = 0.31$$

$$\varphi = 71.8^\circ$$

$$S_{ph} = 436 \angle 71.8^\circ \text{ VA}$$

$$Q_{ph} = \sqrt{S_{ph}^2 - P_{ph}^2} = 414.2 \text{ VAR}$$

$$Z_1 = 1.4 + j6.875 \Omega$$

$$V_1 = I_1 * Z_1 = 7.63 \text{ V}$$

$$V_{parallel} = 400 - 7.63 = 392.37 \text{ V}$$

Στον παράλληλο κλάδο καταναλώνονται:

$$P_{parallel} = P_{ph} - P_1 = 136 - 1.66 = 134.34 \text{ W}$$

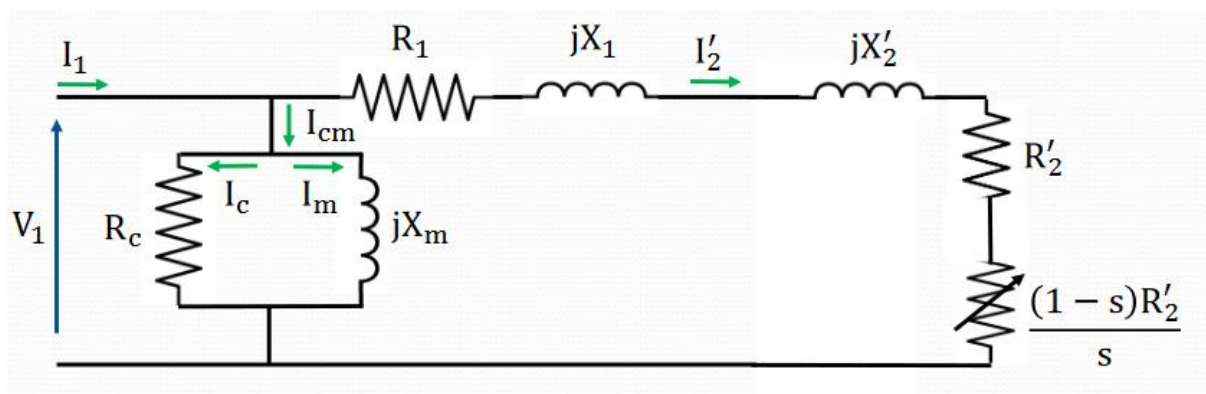
$$Q_{parallel} = Q_{ph} - Q_1 = 414.2 - 8.17 = 406.03 \text{ VAR}$$

$$R_C = \frac{V_{parallel}^2}{P_{parallel}} = 1146 \Omega$$

$$X_M = \frac{V_{parallel}^2}{Q_{parallel}} = 379.1 \Omega$$

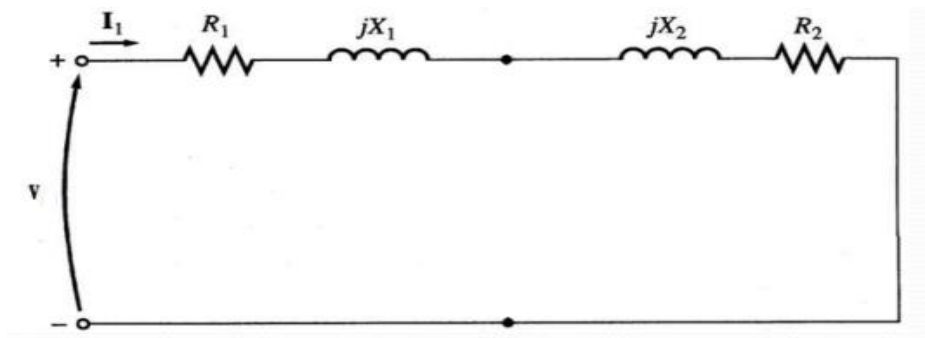
Ερώτημα Β)

Ζητήθηκε ο υπολογισμός των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος με τα παράλληλα στοιχεία μετατοπισμένα στην είσοδο, δηλαδή του ακόλουθου κυκλώματος:



Θα ξεκινήσω ξανά με το DC test από το οποίο διατηρούμε την ίδια τιμή στην αντίσταση του στάτη $R_1 = 1.4\Omega$.

Στο LR test αμελώ τα παράλληλα στοιχεία ξανά και το κύκλωμα έχει την μορφή του LR test του ερωτήματος Α:

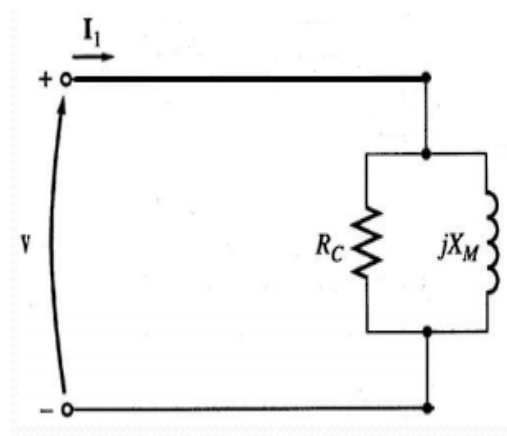


Έτσι οι τιμές των στοιχείων jX_1 , R_2' , jX_2 διατηρούνται όσο τις υπολόγισα στο ερώτημα Α

Άρα, $R_2' = 7.46 \Omega$, $X_1 = X_2' = 6.875 \Omega$

Για το NL test, έχουμε ξανά τον κινητήρα να τροφοδοτείται με ονομαστική τάση $V_{ph} = 400V$ και στρέφεται με τον δρομέα να μην συνδέεται με φορτίο. Η σύνθετη αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μεγάλη και έτσι το ρεύμα I_{ph} διαρρέει μόνο τον παράλληλο κλάδο.

Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα γίνεται:



Έχω ξανά το $I_{ph} = 1.09A$, $P_{ph} = 136W$ το οποίο εισέρχεται στον παράλληλο κλάδο.

Η τάση V_{ph} εισέρχεται και στο R_C και στο X_M αυτούσια άρα την χρησιμοποιώ για να υπολογίσω ξανά τις αντιστάσεις του παράλληλου κλάδου.

$$P_{ph} = V_{ph} * I_{ph} * \cos\varphi \Rightarrow \varphi = 71.8^\circ$$

$$Q_{ph} = V_{ph} * I_{ph} * \sin\varphi = 400 * 1.09 * \sin(71.8^\circ) = 414.2 \text{ VAR}$$

$$P_{ph} = \frac{V_{ph}^2}{R_C} \Rightarrow R_C = 1176.4 \Omega$$

$$Q_{ph} = \frac{V_{ph}^2}{X_M} \Rightarrow X_M = 414.2 \Omega$$

Ερώτημα Γ)

Σε αυτό το ερώτημα ζητήθηκαν οι χαρακτηριστικές ροπής - στροφών και οι χαρακτηριστικές ρεύματος στάτη - στροφών για τα δύο ισοδύναμα κυκλώματα.

Σαν τύπο της ροπής χρησιμοποίησα για το κύκλωμα Α το:

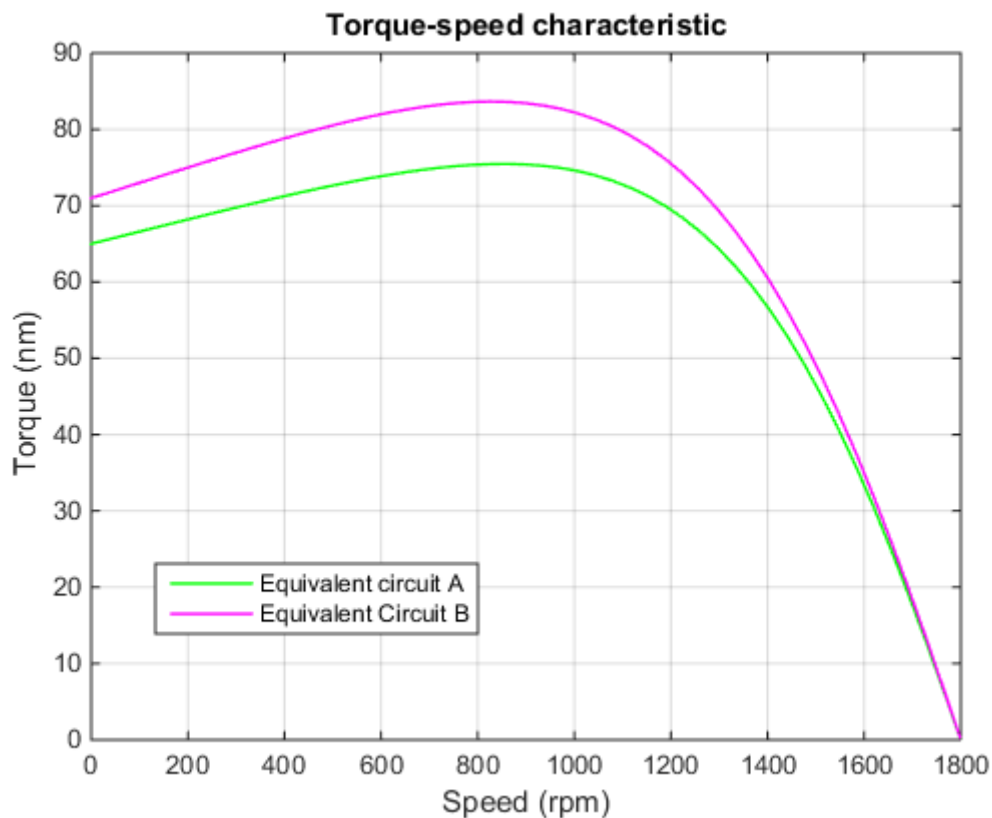
$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{E_1^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right) + X_2'} \frac{R_2'}{s}, \text{ όπου } E_1 = V_1 - I_1 (R_1 + jX_1)$$

και για το κύκλωμα Β το:

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) + (X_1 + X_2')} \frac{R_2'}{s}$$

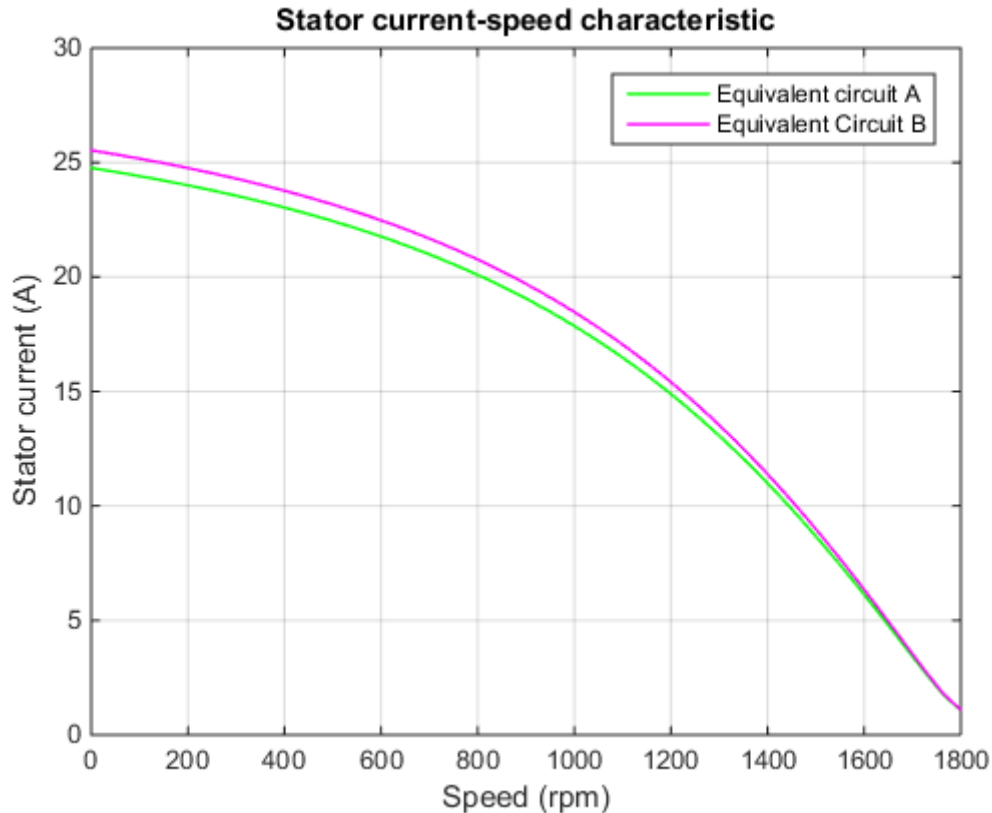
Υπολογίζοντας προσεκτικά σε MATLAB την συνολική αντίσταση του πρώτου κυκλώματος μέσα σε μια for-loop, για αρκετές τιμές s στο (0,1), πήρα τις τιμές για το I_1 και στη συνέχεια για το E_1 .

Παρακάτω οι χαρακτηριστικές ροπής - στροφών των δυο κυκλωμάτων:



Για τον υπολογισμό του ρεύματος στάτη ακολούθησα παρόμοια διαδικασία και στα δύο κυκλώματα με συνολικό υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης, μέσα σε μια for-loop, για το κάθε κύκλωμα και διαιρώντας την ονομαστική τάση με αυτήν.

Έτσι, πήρα το ρεύμα στάτη που παρουσιάζεται συνάρτησε της ταχύτητας παρακάτω:



Βλέπω μικρή αλλά αξιοπρόσεχτη διαφορά στις γραφικές παραστάσεις. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις διαφορετικές τιμές αντιστάσεων του παράλληλου κλάδου. Παρατηρώ πως τόσο η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών καθώς και αυτή του ρεύματος στάτη-στροφών παρουσιάζουν μορφές φαινομενικά σωστές. Η πρώτη θυμίζει με την μορφή της την μορφή κινητήρων με NEMA rotor design D ενώ οι δεύτερη παρουσιάζει το αναμενόμενο υψηλό αρχικό ρεύμα στο στάτη.

Ερώτημα Δ)

Σε αυτό το ερώτημα ο κινητήρας εργάζεται με ολίσθηση $s = 6\%$ υπό ονομαστική τάση και συχνότητα. Υπολογίζω την μεταβλητή αντίσταση $R_2'/s = 124.3 \Omega$ για $s = 0.06$.

Έχοντας όλες τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος υπολογισμένες υπολόγισα την συνολική αντίσταση του κυκλώματος μέσω της σχέσης:

$$Z_T = R_1 + jX_1 + [(R_C // jX_M) // (R_2'/s + jX_2)]$$

Επειδή οι πράξεις σε αυτό το ερώτημα ήταν αρκετά περίπλοκες δημιούργησα αρχείο MATLAB στο οποίο υπολογίστηκαν με αρκετή ευκολία.

$$\text{Έχουμε, } Z_T = 101.8 + j41.6 \Omega = 110 \angle 21.8^\circ \Omega$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_T} = \frac{400 \angle 0^\circ}{110 \angle 21.8^\circ} = 3.6 \angle -21.8^\circ \text{ A}$$

$$P_{1ph} = V_S * I_1 * \cos(-21,8^\circ) = 1324.8 \text{ W}$$

$$P_{el} = 3 * P_{1ph} = 3974.4 \text{ W}$$

$$I_2 = \frac{V_1}{Z_2} = \frac{400 \angle 0^\circ}{124.5 \angle 3.14^\circ} = 3.2 \angle -3.14^\circ \text{ A}$$

(η Z₂ υπολογίστηκε από την MATLAB)

$$I_{CM} = I_1 - I_2 = 1.21 \angle -82.51^\circ \text{ A}$$

(υπολογισμός από το MATLAB)

$$P_{AG\ ph} = I_2^2 * (R_2' / s) = 1272.8 \text{ W}$$

$$P_{AG} = 3 * P_{AG\ ph} = 3818.4 \text{ W}$$

$$P_{mech} = 3 * (1-s) * P_{AG} = 3589.2 \text{ W}$$

$$n = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = 0.903 = 90.3\%$$

$$S = \frac{P_{el}}{\cos\varphi} < \varphi = 4320 \angle -21,8^\circ \text{ VA}$$

$$|Q| = \frac{P_{el}}{\sin\varphi} = 1598.4 \text{ VAR}$$

ztotal =

$$1.0181e+02 + 4.1674e+01i$$

za =

$$110.0126$$

i1 =

$$3.3650 - 1.3773i$$

ila =

$$3.6359$$

i2 =

$$3.2074 - 0.1774i$$

i2a =

$$3.2123$$

icm =

$$0.1576 - 1.2000i$$

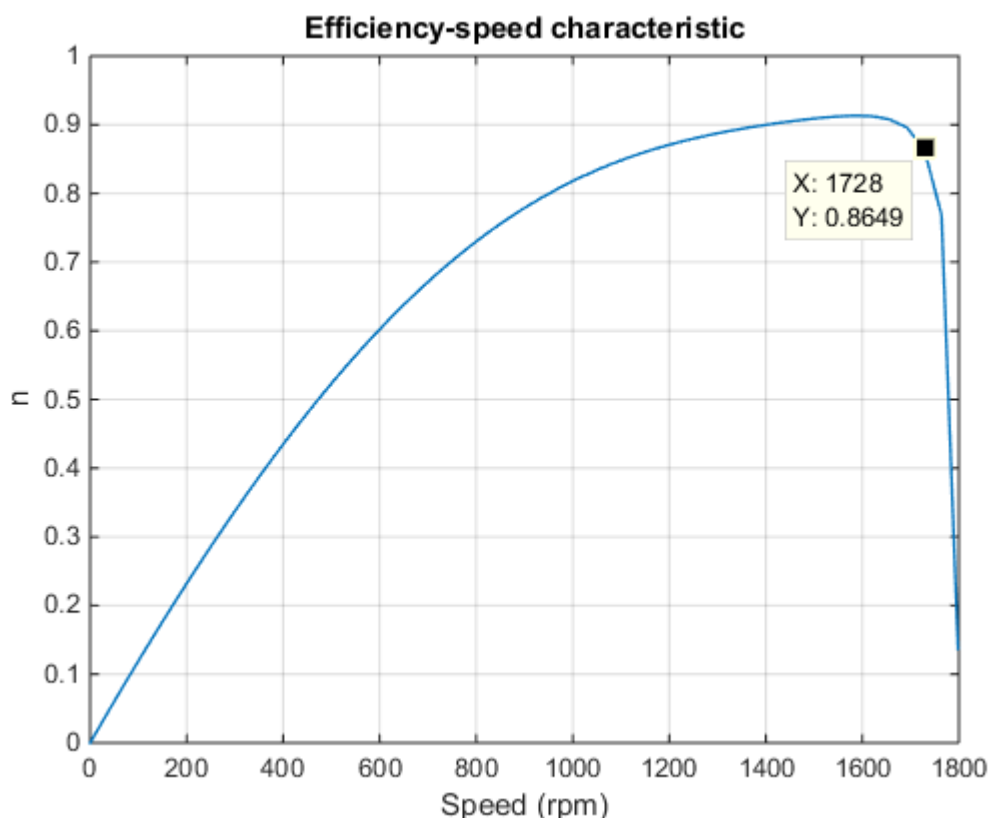
icma =

$$1.2103$$

Ερώτημα Ε)

Για να απαντήσω σε αυτό το ερώτημα δημιούργησα στη MATLAB την χαρακτηριστική απόδοσης-στροφών. Με οδηγό το ερώτημα γ κατασκεύασα μία for-loop για αρκετές τιμές s στο διάστημα $(0,1)$. Υπολογίζω αρχικά την συνολική αντίσταση, το ρεύμα στάτη και την ισχύ για κάθε τιμή s . Ουσιαστικά γίνονται οι υπολογισμοί του ερωτήματος δ απλώς για πολλές τιμές s .

Παρακάτω παρουσιάζεται η χαρακτηριστική απόδοσης-στροφών:



[Ενδεικτικά, για την τιμή $s = 0.06$ που είχα στο προηγούμενο ερώτημα η απόδοση που δίνει το γράφημα είναι 89,6%. Το μικρό σφάλμα οφείλεται στην στρογγυλοποίηση που έχουν γίνει στις πράξεις στο χέρι.]

Για το $s = 0.04$ που ο κατασκευαστής προτείνει ως ονομαστική ολίσθηση λειτουργίας παρουσιάζεται απόδοση 86.5%. Ενώ σαν απόδοση δεν είναι κακή, με ολίσθηση λίγο μεγαλύτερη (π.χ. για ολίσθηση $s = 0.12$ έχουμε απόδοση 91,3%) έχουμε μεγαλύτερες αποδόσεις. Επίσης επιβεβαιώνεται πως ο σχεδιασμός του δρομέα είναι κλάσης D καθώς αυτοί είναι οι μοναδικοί κινητήρες που λειτουργούν αποδοτικά για τέτοιες τιμές slip.

MATLAB scripts used:

Question 3

```
clear all;
close all;
clc

%Initializing values
r1 = 1.4; %Stator resistance
x1 = 6.875; %Stator reactance
r2 = 7.46; %Rotor resistance
x2 = 6.875; %Rotor reactance
xm = 379.1; %Magnetization branch reactance
rc = 1146;

v1 = 400; %Phase voltage
ns = 1800; %Synchronous speed (rpm)
ws = 188.5; %Synchronous speed (rad/s)

%Creating many slips between 0 and 1 and starting from
%0.001 to avoid program crashing

k = [0:1:50];
s = k/50;
s(1) = 0.001;
nm = (1-s)*ns;

%Original circuit
for i = 1:51
    z1 = r1 + j*x1;
    zp = (rc*j*xm)/(rc+j*xm);
    z2(i) = r2/s(i) + j*x2;
    ztotal(i) = z1 + (z2(i)*zp)/(z2(i)+zp);
    i1(i) = 400 / ztotal(i);
    e1(i) = v1 - i1(i)*(r1+j*x1);
    t_em1(i) = (3*(real(e1(i))^2) * (r2/s(i))) / (ws * ((r2/s(i))^2 +
(x2)^2));
end

%Shifted parallel part circuit
for n = 1:51
    t_em2(n) = ( 3 * v1^2 * r2 /s(n)) / (ws * ((r1 + r2/s(n))^2 +(x1
+x2)^2 ));
end

%Plot the torque speed characteristic
figure()
plot(nm,t_em1,'g','LineWidth',1.0);
hold on;
plot(nm,t_em2,'m','LineWidth',1.0);
xlabel('Speed (rpm)');
ylabel('Torque (nm)');
title('Torque-speed characteristic');
legend('Equivalent circuit A', 'Equivalent Circuit B');
grid on;

for c = 1:51
```

```

    z1 = r1 + j*x1;
    zp = (rc*j*xm)/(rc+j*xm);
    z2(c) = r2/s(c) + j*x2;
    ztotal(c) = z1 + (z2(c)*zp)/(z2(c)+zp);
    ila(c) = v1 / abs(ztotal(c));
end

for y = 1:51
    zs(y) = r1 + j*x1 + r2/s(y) + j*x2;
    zp = (rc*j*xm)/(rc+j*xm);
    ztotal2(y) = (zs(y)*zp)/(zs(y)+zp);
    ilb(y) = v1 / abs(ztotal2(y));
end

%Plot the current speed characteristic

figure()
plot(nm, ila, 'g', 'LineWidth', 1.0);
hold on
plot(nm, ilb, 'm', 'LineWidth', 1.0);
xlabel('Speed (rpm)');
ylabel('Stator current (A)');
title('Stator current-speed characteristic');
legend('Equivalent circuit A', 'Equivalent Circuit B');
grid on;

```

Question 4

```

clear all
close all
clc

%Initializing values
r1 = 1.4; %Stator resistance
x1 = 6.875; %Stator reactance
r2 = 7.46/0.06; %Rotor resistance
x2 = 6.875; %Rotor reactance
xm = 379.1; %Magnetization branch reactance
rc = 1146;

z1 = r1 + j*x1;
zp = (rc*j*xm)/(rc+j*xm);
z2 = r2 + j*x2;

zttotal = z1 + (z2*zp)/(z2+zp)

za = abs(zttotal)

i1 = 400 / zttotal

ila = abs(i1)

i2 = 400 / z2

i2a = abs(i2)

```

```
icm = i1 - i2

icma = abs(icm)
```

Question 5

```
clear all;
close all;
clc

%Initializing values
r1 = 1.4; %Stator resistance
x1 = 6.875; %Stator reactance
r2 = 7.46; %Rotor resistance
x2 = 6.875; %Rotor reactance
xm = 379.1; %Magnetization branch reactance
rc = 1146;
v1 = 400; %Phase voltage

ns = 1800; %Synchronous speed (rpm)
ws = 188.5; %Synchronous speed (rad/s)

%Creating many slips between 0 and 1 and starting from
%0.001 to avoid program crashing

k = [0:1:50];
s = k/50;
s(1) = 0.001;
nm = (1-s)*ns;

%Original circuit
for i = 1:51
    z1 = r1 + j*x1;
    zp = (rc*j*xm)/(rc+j*xm);
    z2(i) = r2/s(i) + j*x2;
    ztotal(i) = z1 + (z2(i)*zp)/(z2(i)+zp);
    i1(i) = 400 / ztotal(i);
    ztotal_abs(i) = abs(ztotal(i));
    ztotal_theta(i) = angle(ztotal(i));
    theta_cos(i) = cos(ztotal_theta(i));
    p_ph(i) = v1 * abs(i1(i)) * theta_cos(i);
    i2(i) = 400 / z2(i);
    i2_abs(i) = abs(i2(i));
    p_el(i) = 3* p_ph(i);
    p_ag(i) = 3*(abs(i2(i))^2)* r2/s(i);
    p_mech(i) = (1-s(i))*p_ag(i);
    eff(i) = p_mech(i)/p_el(i);
end

%Plot the torque speed characteristic
figure()
plot(nm,eff,'LineWidth',1.0);
xlabel('Speed (rpm)');
ylabel('n');
title('Efficiency-speed characteristic');
grid on;
```