

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4

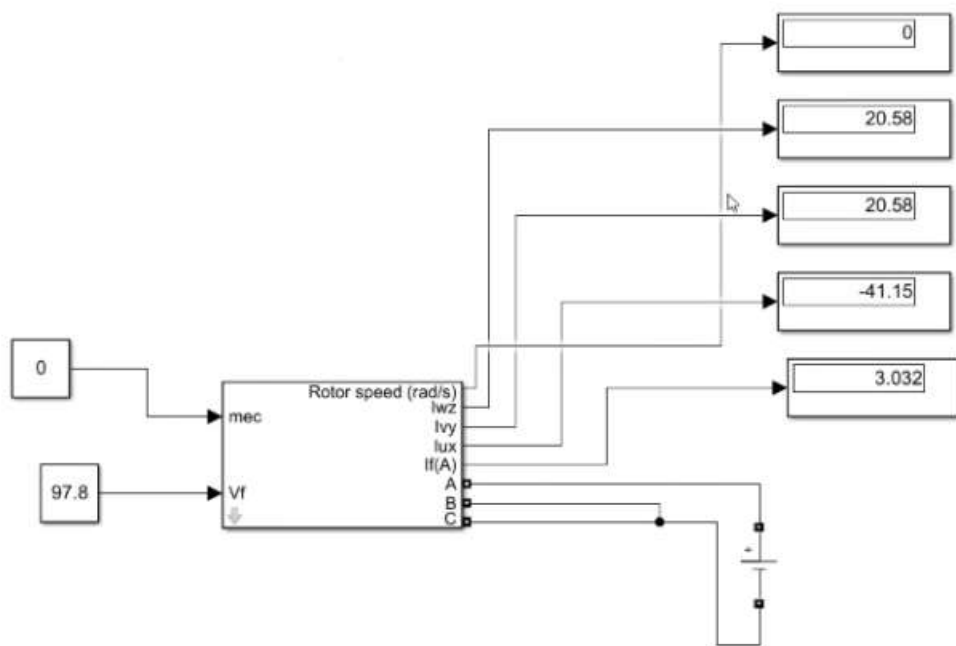
ΟΜΑΔΑ Θ4

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΜΕΡΚΟΥΡΙΑΔΗΣ	ΑΜ:1066637
ΜΑΡΙΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ	ΑΜ:1066488
ΣΩΤΗΡΗΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ	ΑΜ:1066487
ΑΛΕΞΙΑ ΣΟΥΒΑΛΙΩΤΗ	ΑΜ:1066597
ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ ΠΕΝΘΕΡΟΥΔΑΚΗΣ	ΑΜ:1066635
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΝΤΕΛΛΑΣ	ΑΜ:1070511

Σκοπός της άσκησης

Η παρατήρηση αρχής λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων εν κενώ σε βραχυκύκλωμα και σε παραλληλισμό με το δίκτυο. Θα φτιάξουμε το διανυσματικό διάγραμμα της μηχανής και θα κάνουμε τους υπολογισμούς που μπορούμε από αυτό.

ΑΣΚΗΣΗ 7.1:



Όπως φαίνεται και στην εικόνα συνδέουμε του ακροδέκτες B,C του στάτη μεταξύ τους και συνδέω μια DC πηγή και ένα Display block στο If ώστε να εμφανιστεί η τιμή του (έχουμε αλλάξει την είσοδο mec σε speed w και έχουμε δώσει 0).

Τροφοδοτούμε τον δρομέα με τάση Vf=97.8V (ονομαστική)

$$\text{Για να βρω την αντίσταση } R_{sol} \text{ χρησιμοποιώ τον τύπο : } R_{sol} = \frac{V_s}{I_s} = \frac{100}{41.15} = 2.4301$$

Διαιρώ την τιμή που βρήκα για την R_{ux} με $3/2$ και βρίσκω τελική τιμή

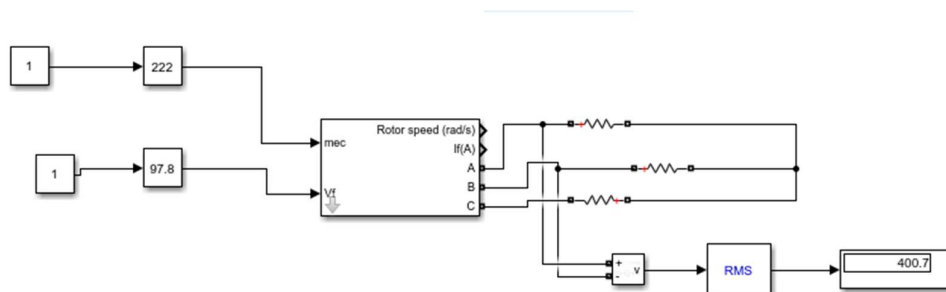
$$R_{ux} = 1.62\Omega \text{ καθώς } R_{sol} = R_s + R_s || R_s = \left(\frac{3}{2}\right) R_s$$

Με όμοιο τρόπο και βραχυκυκλώνοντας κάθε φορά τους κατάλληλους ακροδέκτες παρατηρούμε ότι έχουμε ίσες αντιστάσεις μεταξύ τους

$R_{ux} = R_{vy} = R_{wz} = 1.62\Omega$ και πως πάντα όπως θα αναμέναμε το άθροισμα των ρευμάτων των φάσεων που έχουν βραχυκυκλωθεί ισούται με το ρεύμα της φάσης στην οποία συνδέσαμε την dc πηγή δηλαδή $20.58+20.58=40.15$

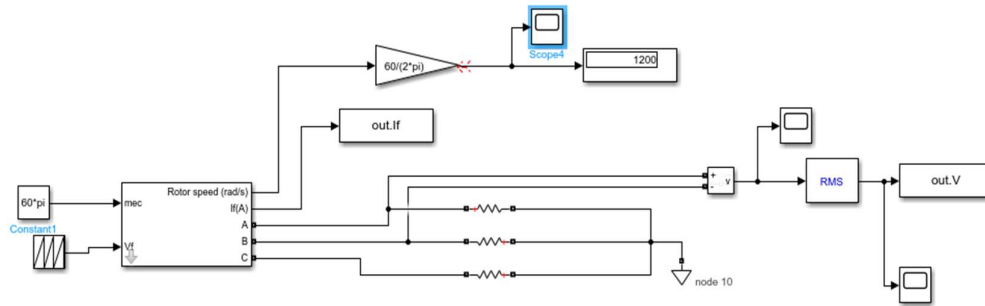
Πως βρήκαμε ότι η ονομαστική τάση διέγερσης είναι 97.8 V:

Μετά από δοκιμές παρατηρήσαμε ότι για $V_f=97.8V$ έχουμε ονομαστική τάση εν κενώ $V_{sN}=400V$ (δίνοντας επίσης και κατάλληλη μηχανική ισχύ). Για να μοντελοποιήσουμε το ανοιχτό κύκλωμα βάλαμε 3 αντιστάσεις $1M\Omega$ καθώς η ματλαμπ δε λειτουργούσε με πραγματικό ανοιχτοκύκλωμα στον στάτη.



ΑΣΚΗΣΗ 7.2:

a)Πραγματοποιούμε την παρακάω συνδεσμολογία:

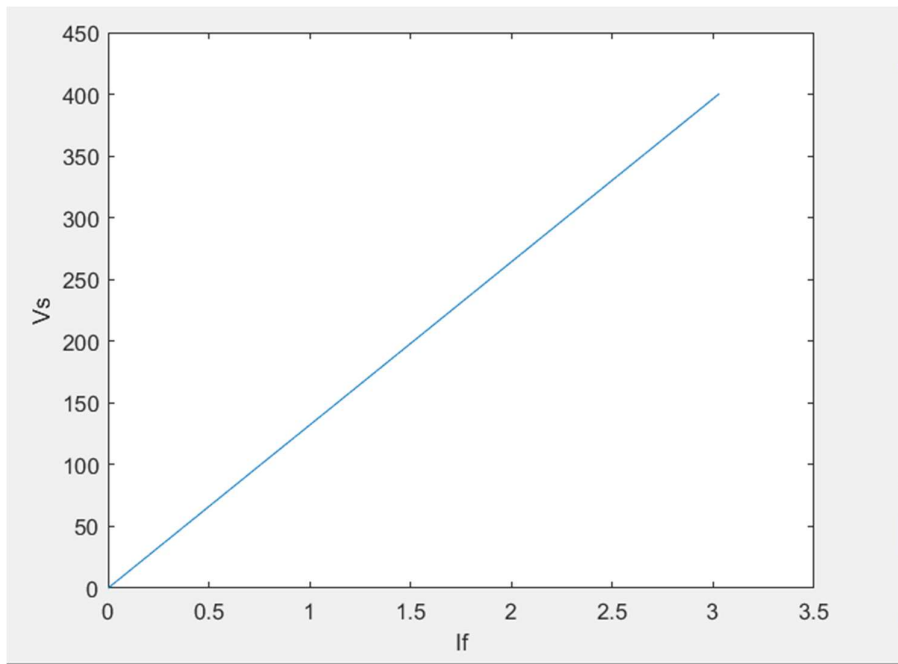


Χρησιμοποιώντας κατάλληλο κώδικα και ένα repeating sequence block (όπου δίνουμε τις μεταβλητές χρόνου και τάσης που προκύπτουν από τον κώδικα για input και output) δίνουμε τιμές V_f (άρα και I) ώστε να έχουμε μεταβολή της τάσης του στάτη ανά 50 volt κρατώντας σταθερές τις στροφές και ίσες με 1500rpm. Να σημειωθεί ότι τρέχουμε την προσομείωση με κατάλληλο χρόνο ώστε να έχουμε τιμές πάντα στη μόνιμη κατάσταση. Οι μετρήσεις είναι οι ακόλουθες:

V_f	I_f	V_{s0}
0	0	0
12.2	0.378	49.993
24.4	0.756	99.989
36.6	1.135	149.964
48.8	1.513	199.954
61	1.891	249.943
73.2	2.269	299.943
85.4	2.647	349.902
97.8	3.032	400.770

Βλέπουμε ότι πράγματι για τις παραπάνω τιμές V_f, I_f έχουμε την επιθυμητή μεταβολή στην τάση του στάτη.

Ακολουθεί η γραφική παράσταση (χαρακτηριστική εν κενώ):



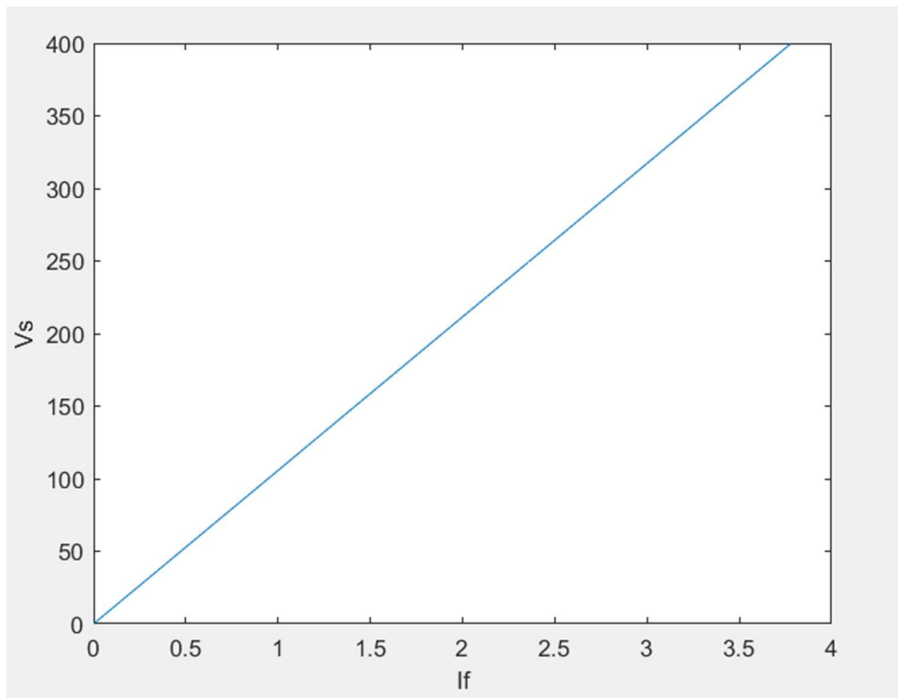
$$Vs0 = f(If)$$

Όπως και θα αναμέναμε η εξάρτηση είναι γραμμική καθώς η E_p εξαρτάται γραμμικά από το I_f και στην περίπτωση της λειτουργίας εν κενώ έχουμε $I_s=0$ άρα $E_p=Vs0$.

β) Για $n=1200\text{rpm}$ (άρα $f=40\text{Hz}$) και χρησιμοποιώντας ίδια λογική (με διαφορετικές V_f και διαφορετικές στροφές) έχουμε τα ακόλουθα:

V_f	I_f	V_{s0}
0	0	0
15.25	0.473	49.994
30.5	0.946	99.988
45.75	1.418	149.983
61	1.891	199.977
76.25	2.364	249.971
91.5	2.837	299.966
106.75	3.309	349.960
122	3.782	399.999

Παρατηρούμε και πάλι την επιθυμητή μεταβολή καθώς και την γραμμικότητα η οποία θα φανεί καλύτερα στο γράφημα που ακολουθεί (χαρακτηριστική εν κενώ).

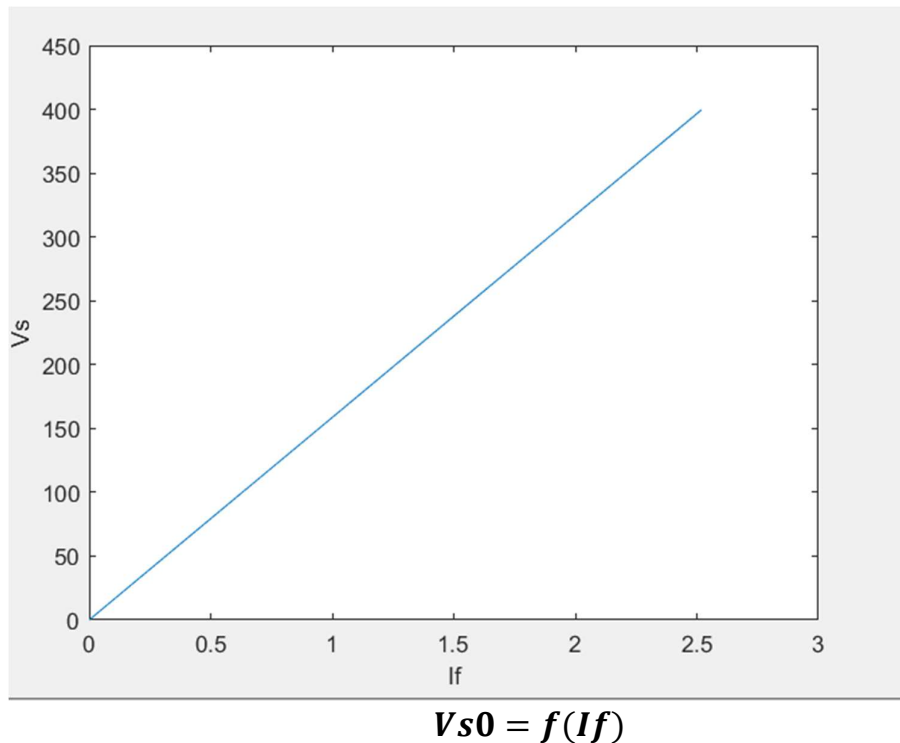


$$Vs0 = f(If)$$

C) Για $n=1800\text{rpm}$ (άρα $f=60\text{Hz}$) κάνουμε και πάλι ακριβώς την ίδια διαδικασία και παίρνουμε:

V_f	I_f	V_{s0}
0	0	0
10.17	0.315	50.012
20.34	0.6305	100.023
30.51	0.946	150.036
40.68	1.261	200.047
50.85	1.576	250.047
61.02	1.892	300.071
71.19	2.207	350.066
81.36	2.522	400.095

Είναι φανερό ότι και πάλι έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα
Παρακάτω παρουσιάζεται η χαρακτηριστική εν κενώ:



Συγκρίνοντας όλες τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις έχουμε να παρατηρήσουμε 3 πράγματα.1) Και οι τρεις έχουν γραμμική μεταβολή όπως και θα περιμέναμε.2)η γραμμική μεταβολή συνεχίζει να υπάρχει και πολύ κοντά στην ονομαστική τάση οπότε καταλαβαίνουμε ότι η ματλαμπ δε μοντελοποιεί τον κορεσμό του σιδήρου καθώς σε πραγματικές συνθήκες θα είχαμε κοντά στην ονομαστική τάση κάποια καμπύλωση στην χαρακτηριστική και επίσης δοκιμάσαμε να κάνουμε τη γραβλφική και για μεγαλύτερες τιμές τάσεις και είχαμε πάλι γραμμικότητα. (βλέπουμε και από τις παραμέτρους πως δε μοντελοποιείται κάπου ο κορεσμός).3)Για να πετύχουμε κάθε φορά μεταβολή κατά 50 V στην τάση του στάτη θέλουμε μεγαλύτερη συνεχή τάση στον δρομέα για μικρότερο αριθμό στροφών γεγονός που είναι αναμενόμενο καθώς η επαγόμενη τάση εξαρτάται και από την συχνότητα.

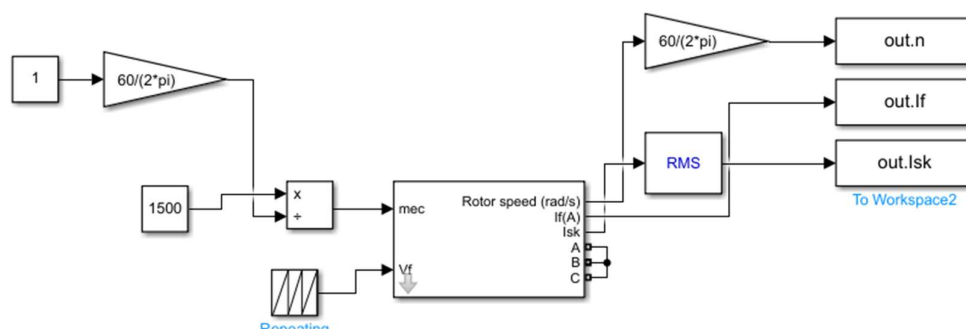
ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

Το ονομαστικό ρεύμα I_{sN} σε κάθε φάση υπολογίζεται από την σχέση

$$I_{sN} = \frac{\frac{8100}{3}}{\frac{400}{\sqrt{3}}} = 11,69A \text{ επομένως } 1.2 * 11.69 = 14.03A. \text{ Τότε θα έχουμε και}$$

I_{fmax} , και έτσι μεταβάλλουμε την τάση V_f μέχρι η τιμή του I_{sk} να είναι ίση με 14.03A. Έχουμε αλλάξει από τις παραμέτρους της μηχανής την είσοδο σε speed ω (αντί για mechanical input P_m) και έχουμε δώσει σταθερές στροφές $n_s=1500rpm$.

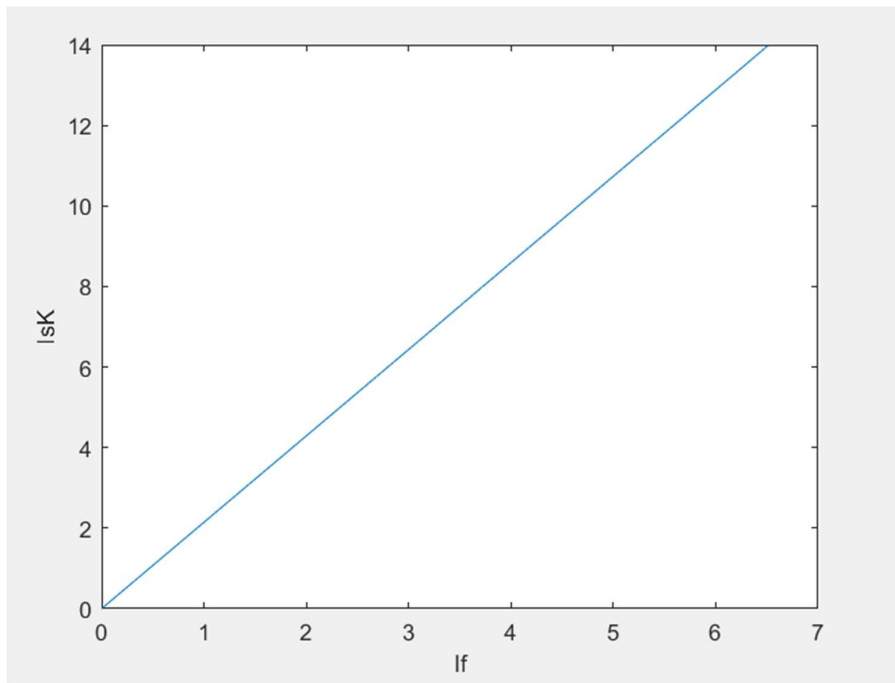
Αυτό το κάνουμε καθώς γράφουμε κώδικα για τις τιμές V_f και έτσι μεταβάλλοντας τη V_f , μεταβάλλεται το ρεύμα διέγερσης I_f επομένως και η επαγόμενη τάση στο στάτη E_r άρα και η γωνία θ μεταξύ V_s , E_r . Αυτό συνεπάγεται ότι μεταβάλλονται και οι στροφές., Επομένως δε θα μπορούσαμε να ξέρουμε από πριν για κάθε τιμή της τάσης την απαιτούμενη μηχανική ισχύ για να έχουμε 1500 στροφές(και θα έπρεπε να κάνουμε μία μία τις μετρήσεις και θα μας έπαιρνε περισσότερο χρόνο). Ακολουθεί η συνδεσμολογία στο simulink.



Παρακάτω φαίνονται οι μετρήσεις:

$V_f(V)$	$I_f(A)$	$I_{sk}(A)$
0	0	0
20	0.62	1.33
40	1.24	2.66
60	1.86	3.99
80	2.48	5.32
100	3.1	6.65
120	3.72	7.99
140	4.34	9.32
160	4.96	10.65
180	5.58	11.98
200	6.20	13.31
210	6.51	13.98

Ακολουθεί η ζητούμενη γραφική παράσταση:



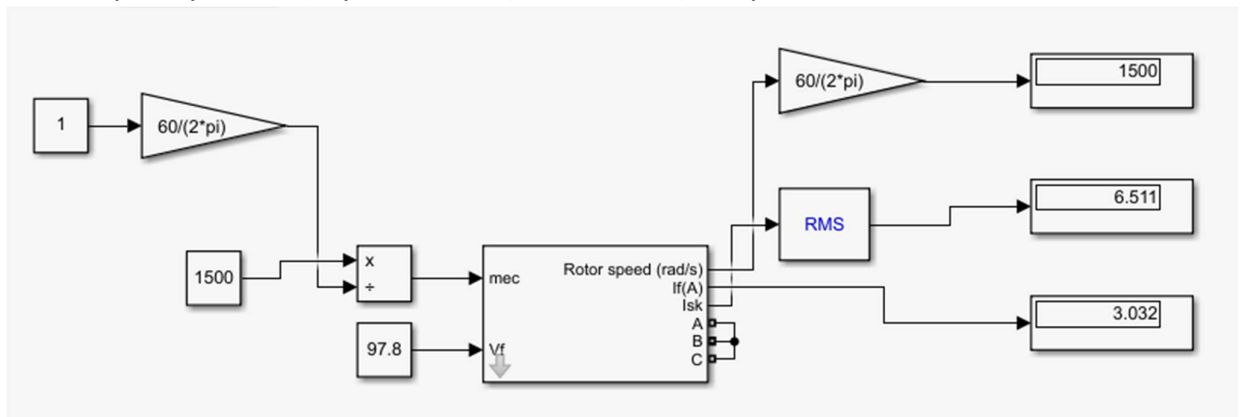
$$Isk = f(If)$$

Παρατηρούμε γραμμική μεταβολή του ρεύματος βραχυκυκλώματος με το ρεύμα διέγερσης όπως θα αναμέναμε και από τη θεωρία σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα βραχυκυκλώματος.



Όπου το E_p είναι ανάλογο του I_f .

Για τον υπολογισμό του I_{k0} θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα I_{Sk} δηλαδή το ρεύμα μόνιμου βραχυκυκλώματος όταν έχουμε ρεύμα διέγερσης ίσο με το ρεύμα διέγερσης σε λειτουργία εν κενώ υπό ονομαστική τάση διέγερσης 97.8V, δηλαδή $V_f=97.8V$, $I_f=3.032$. Η συνδεσμολογία και η τιμή του I_{k0} φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Παρατηρούμε ότι πάντα $n=n_s=1500\text{rpm}$ και ότι $I_{k0}=6.51A$

Επομένως:

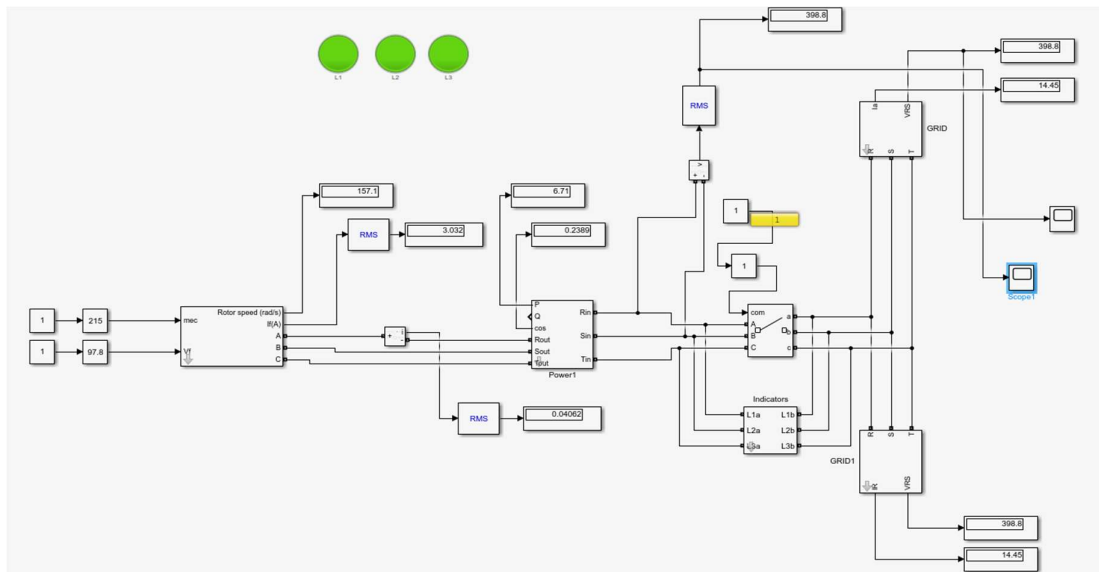
Συντελεστής αναλογίας κενού βραχυκυκλώματος:

$$\lambda = \frac{I_{k0}}{I_N} = \frac{6.51}{11.69} = 0.557$$

$$X_d = \frac{V_{SN}}{I_{SN} * \lambda} = 35.467$$

Άσκηση 7.4)

Για τον συγχρονισμό της μηχανής με το δίκτυο χρησιμοποιούμε το παρακάτω μοντέλο:



Η εικόνα δεν είναι ευδιάκριτη αλλά η συνδεσμολογία φαίνεται καθαρά στο αρχείο που θα υποβληθεί(το βατόμετρο χρειάζεται για την επόμενη άσκηση 7.5). Συνδέουμε στη μηχανή 3 λαμπτήρες και αξιοποιούμε και τους διακόπτες που μας έχουν δοθεί. Οι λαμπτήρες συνδέονται ανάμεσα στους ακροδέκτες της μηχανής και του δικτύου. Πρέπει να προσέξουμε οι διακόπτες να κλείσουν όταν οι λαμπτήρες είναι πράσινοι(σβηστοί) δηλαδή να μην υπάρχει διαφορά τάσης στα άκρα τους ώστε να έχουμε παραλληλισμό με το δίκτυο. Διαφορετικά είναι πιθανό να έχουμε μεγάλα ρεύματα και καεί η μηχανή. Επομένως όταν εκκινούμε την μηχανή οι διακόπτες θα πρέπει να είναι ανοιχτοί. Δίνουμε ονομαστική τάση Vf και μηχανικό φορτίο το οποίο αυξάνουμε προσεκτικά μέχρι τον παραλληλισμό. Με την εκκίνηση του μοντέλου οι λυχνίες είναι κόκκινες και αναβοσβήνουν λόγω της διαφορετικής συχνότητας του δικτύου και της μηχανής(δηλαδή δημιουργείται διαφορά τάσης στα άκρα τους). Μεταβάλλοντας κατάλληλα τη μηχανική ισχύ μόλις οι λυχνίες γίνουν πράσινες τότε κλείνω τους διακόπτες και έχω πετύχει τον παραλληλισμό. Αν τσεκάρω τις ενδείξεις των βολτομέτρων παρατηρώ τον συγχρονισμό όπως θα περιμέναμε την τιμή να είναι περίπου 400Volt και μια αμελητέα ταλάντωση από περίπου 400 μέχρι 403. Η ένδειξη των στροφών είναι σταθερή (157.1rad/s άρα $n=n_s=1500\text{rpm}$) ωστόσο το ρεύμα του στάτη εκτελεί μια αμελητέα ταλάντωση.

Άσκηση 7.5)

Η συνδεσμολογία είναι ίδια όπως της προηγούμενης φωτογραφίας και σε αυτή την περίπτωση θα αξιοποιήσουμε τις ενδείξεις του βαττομέτρου για να εξάγουμε συμπεράσματα(εφόσον βρισκόμαστε σε παραλληλισμό). Όπως και στην προηγούμενη άσκηση παρατηρούμε και εδώ πως υπάρχει ταλάντωση στην ενεργό και στην άεργο ισχύ και έτσι προσπαθούμε με μεταβολές της μηχανικής ισχύος να τις περιορίσουμε(στην τάση και στο ρεύμα αμελητέες).

Αφού στη συνδεσμολογία έχουμε τοποθετήσει το βαττόμετρο να παίρνει είσοδο από το δίκτυο (δηλαδή μοντέλο “καταναλωτή” για την γεννήτρια, δηλαδή το βαττόμετρο βλέπει ως φορτίο την γεννήτρια) $P > 0$ σημαίνει ότι η μηχανή προσλαμβάνει ενεργό ισχύ (άρα κινητήρας) $P < 0$ αποδίδει(γεννήτρια). Επίσης $Q > 0$ σημαίνει ότι προσλαμβάνει άεργο ισχύ από το δίκτυο (υποδιέγερση) και $Q < 0$ σημαίνει ότι αποδίδει(υπερδιέγερση) καθώς τα πρόσημα ορίζονται με βάση τη μεριά του δικτύου.

Για $V_f = 97.8V$ και $P_m = 400W$ παίρνουμε τα παρακάτω.

$P = -177W$ και $Q = -16VA$ με κάποια μικρή ταλάντωση.

Επομένως αφού και οι 2 τιμές είναι αρνητικές η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια σε υπερδιέγερση (παρέχει ενεργό και άεργο ισχύ).

Για $V_f = 97.8V$ και $P_m = 100W$ παίρνουμε τα παρακάτω:

$P = 122W$ και $Q = -32VA$ με κάποια μικρή ταλάντωση.

Επομένως σε αυτή την περίπτωση αφού η μηχανή δέχεται ενεργό ισχύ και παράγει άεργο ,λειτουργεί ως κινητήρας σε υπερδιέγερση.

Για $V_f = 75V$ και $P_m = 100W$ παίρνουμε τα παρακάτω:

$P = 32W$ και $Q = 1018VA$ με κάποια μικρή ταλάντωση.

Επομένως αφού προσλαμβάνει ενεργό ισχύ και άεργο η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας σε υποδιέγερση

Για $V_f = 75V$ και $P_m = 550W$ παίρνουμε τα παρακάτω:

$P=-317W$ και $Q=1048VA$ με κάποια μικρή ταλάντωση.

Εδώ έχουμε την τελευταία περίπτωση όπου αποδίδει ενεργό ισχύ και προσλαμβάνει άεργη επομένως γεννήτρια σε υποδιέγερση.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις υπάρχει συγχρονισμός καθώς έχουμε $V_s=V$ δικτύου και $n=n_s$ (και κάποιες πολύ μικρές ταλαντώσεις)

**Στη συνέχεια , δίνοντας στη μηχανή $V_f=97.8V$, $P_m=500W$ παίρνουμε:
 $\cos\phi=0.999$ περίπου 1 , $P_{εν}=-276W$, $I_f=3.032A$, $V_s=403V$, $I_s=0.40A$**

**Τέλος , δίνοντας στη μηχανή $V_f=150V$, $P_m=221W$ παίρνουμε:
 $\cos\phi=0.02$ περίπου 0 , $P_{εν}$ περίπου 0, $I_f=4.65A$, $V_s=401V$, $I_s=3.51A$**

Παρατηρούμε ότι χρειαζόμαστε μεγαλύτερες τιμές V_f, I_f, I_s (αλλά μικρότερη P_m) για συντελεστή ισχύος=0 και μικρότερες (αλλά μεγαλύτερη P_m) για συντελεστή=1 και ότι το V_s μένει ουσιαστικά σταθερό. Ουσιαστικά βλέπουμε ότι για μεγάλο P_m και σχετικά μικρό V_f έχουμε απόδοση μεγάλης ενεργού ισχύος από τη μηχανή σε σχέση με Q που είναι ουσιαστικά 0(αφού $\cos\phi=1$) ενώ για μεγάλη τάση V_f και μικρή σχετικά μηχανική ισχύ έχουμε μεγάλο μέγεθος άεργου ισχύος σε σχέση με την ενεργό(αφού $\cos\phi=0$). Συμπερασματικά καταλήγουμε στο ήδη γνωστό πράγμα σχετικά με την εξάρτηση της ενεργού ισχύος από τη μηχανική ροπή στον άξονα και την εξάρτηση της άεργου ισχύος από το ρεύμα διέγερσης.

Άσκηση 7.6)

Δεν καταφέραμε να λύσουμε την ασκ. 7.6 επειδή δεν κατανοήσαμε την εκφώνηση και τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να δουλέψουμε εδώ.

Άσκηση 7.7)

Θα σχεδιάσουμε το διανυσματικό διάγραμμα της σύγχρονης μηχανής σε λειτουργία ως γεννήτρια, με ονομαστική τάση στο στάτη και ρεύμα στο στάτη ίσο με 70% του ονομαστικού. Ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας σε αυτή την λειτουργία είναι 0.86 επαγωγικός, δηλαδή η γεννήτρια βρίσκεται σε υποδιέγερση. Ο ΣΙ βρέθηκε επαγωγικός μέσω δοκιμών στην ματλαμπ, όπου για τα παραπάνω μεγέθη, η γεννήτρια βρέθηκε ότι καταναλώνει άεργο ισχύ, άρα είναι σε υποδιέγερση. Ακολουθά ο κώδικας την επεξήγηση του και το διάγραμμα που προκύπτει.

```

1 %vec diag 77
2 USN = 230.94;
3 US_anigm = 1;
4 ISN = 11.69;
5 IS_anigm = 0.7;
6 fn = 30.68341711*(pi/180); % in rad
7 Rs = (ISN/USN)*1.62;
8 Xsc = 1.422199;
9 Xhd = 34.117696;
10 Xhq = 16.257742;
11 Xd = Xhd + Xsc;
12 Xq = Xhq + Xsc;
13 xsc = (ISN/USN)*Xsc
14 xd = (ISN/USN)*Xd; %USN is phase
15 xq = (ISN/USN)*Xq;
16
17 cla
18 %US'
19 US_V = US_anigm;
20 quiver(0, 0, 0, US_V, 'off');
21 hold on
22 %IS'
23 IS_U = IS_anigm*sin(fn);
24 IS_V = -IS_anigm*cos(fn);
25 quiver(0, 0, IS_U, IS_V, 'off')
26 %RSIS
27 RS_U = Rs*IS_U;
28 RS_V = Rs*IS_V;
29 quiver(-RS_U, -RS_V + US_V, RS_U, RS_V, 'off')
30 %j*xqIS
31 XQS_X = -RS_U;
32 XQS_Y = US_V-RS_V;
33 XQS_U = xq*IS_anigm*(cos(fn));
34 XQS_V = xq*IS_anigm*(sin(fn));
35 quiver(XQS_X - XQS_U, XQS_Y - XQS_V, XQS_U, XQS_V, 'off')
36 %jxscIS
37 XSC_U = xsc*IS_anigm*(cos(fn));
38 XSC_V = xsc*IS_anigm*(sin(fn));
39 quiver(XQS_X - XSC_U, XQS_Y - XSC_V, XSC_U, XSC_V, 'off')
40 ...

```

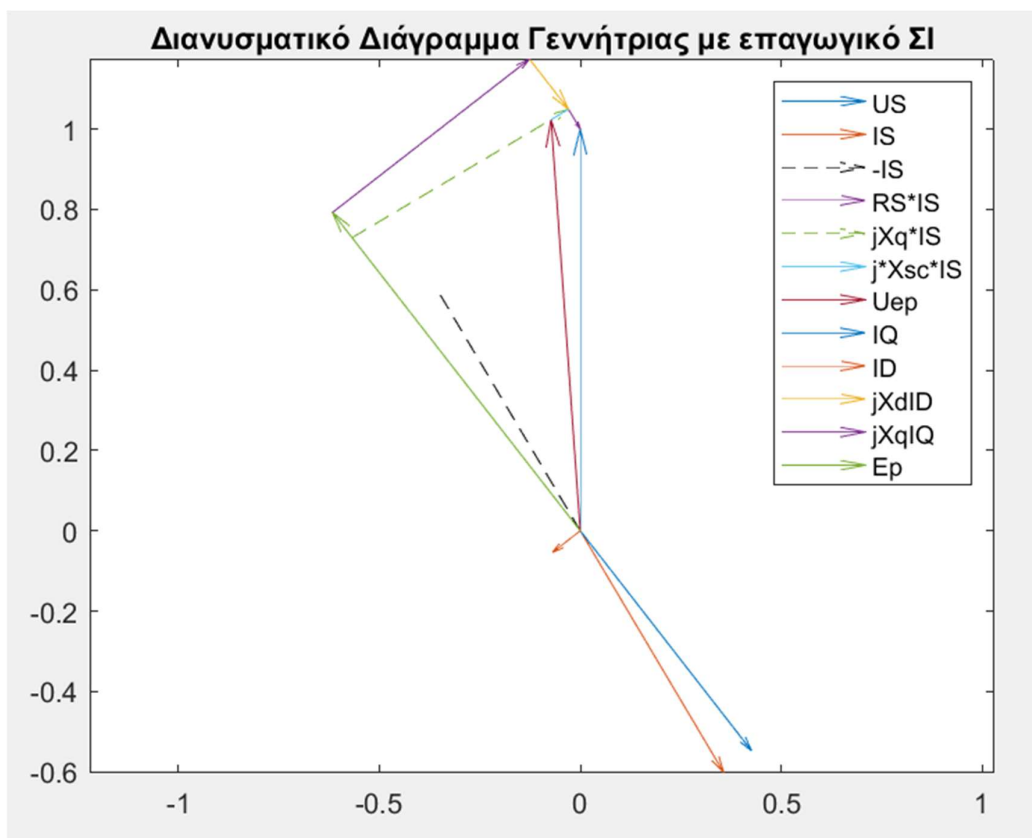
```

40 %Uep
41 Uep_X = XQS_X - XSC_U;
42 Uep_Y = XQS_Y - XSC_V;
43 quiver(0, 0, Uep_X, Uep_Y, 'off')
44 %theta
45 A_X = XQS_X - XQS_U;
46 A_Y = XQS_Y - XQS_V;
47 thetan = atan(-A_X/A_Y); %37.9002 deg
48 %quiver(0, 0, A_X, A_Y, 'off')
49 psin = (thetan-fn); %7.2167 deg
50 IQ = IS_anigm*cos(psin);
51 ID = IS_anigm*sin(psin);
52 %IQ
53 IQ_U = IQ*cos(pi/2 - thetan);
54 IQ_V = -IQ*sin(pi/2 - thetan);
55 quiver(0, 0, IQ_U, IQ_V, 'off')
56 %ID
57 ID_U = -ID*cos(thetan);
58 ID_V = -ID*sin(thetan);
59 quiver(0, 0, ID_U, ID_V, 'off')
60 % %jXDID
61 XD_U = xd*ID*sin(thetan);
62 XD_V = -xd*ID*cos(thetan);
63 quiver(-XD_U + XQS_X, -XD_V + XQS_Y, XD_U, XD_V, 'off')
64 % %jXQIQ
65 XQ_X = -XD_U + XQS_X;
66 XQ_Y = -XD_V + XQS_Y;
67 XQ_U = xq*IQ*cos(thetan);
68 XQ_V = xq*IQ*sin(thetan);
69 quiver(XQ_X - XQ_U, XQ_Y - XQ_V, XQ_U, XQ_V, 'off')
70 %E
71 E_X = XQ_X - XQ_U;
72 E_Y = XQ_Y - XQ_V;
73 quiver(0, 0, E_X, E_Y, 'off')|
74 % ( Uep_X^2 + Uep_Y^2 )^(1/2) = 1.0262
75 % ( E_X^2 + E_Y^2 )^(1/2) = 1.0042
76 axis equal
77 legend('US', 'IS', 'RS*IS', 'jXq*IS', 'j*Xsc*IS',
78 'Uep', 'IQ', 'ID', 'jXdID', 'jXqIQ', 'Ep')

```

Αρχικά, ορίζουμε τις ονομαστικά και ανα βάση μεγέθη της τάσης και του ρεύματος στον στάτη. Ορίζουμε επίσης και τις ανα βάσεις αντιστάσεις και αντιδράσεις του δρομέα σύμφωνα με τον τύπο: $xq = \frac{ISN}{VSN} * Xd$. Τα μεγέθη Xsc , Xhq , Xhd τα γνωρίζουμε από τις παραμέτρους της μηχανής. Εφόσον σχεδιάσουμε τα US με πλάτος 1 και IS με πλάτος 0.7 και φάση $180 + \arccos(0.86)$ στο 4^ο τεταρτημόριο, λόγω του

επαγωγικού Σ.Ι., σχεδιάζουμε τα $RS*IS$, $j*X_{sc}*IS$, $j*X_q*IS$. Μέσω των $RS*IS$, $j*X_{sc}*IS$, βρίσκουμε το διάνυσμα της επαγόμενης τάσης U_{ep} . Προσθέτοντας το $j*X_q*IS$ στο $RS*IS$, βρίσκουμε το διάνυσμα E_p' που έχει την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα E_p και μέσω των συντεταγμένων του διανύσματος E_p' βρίσκω την πολική γωνία $\theta_N = \arctan\left(\frac{E_p'X}{E_p'Y}\right) = 37.9002^\circ$. Παίρνοντας την αρνητική προέκταση του IS βρίσκω ότι η γωνία ψ του E_p με το $-IS$ ισούται με την γωνία του E_p με την VS (θ_N) μείον την γωνία του $-IS$ με το VS (ϕ_N). Υπολογίζω το $\psi = \theta_N - \phi_N = 7.2167^\circ$. Βρίσκουμε τις I_d , I_q συνιστώσες μέσω της γωνίας ψ , και τα $j*X_d*I_d$, $j*X_q*I_q$. Παρατίθεται το διάγραμμα.



Φαίνονται τα διανύσματα, σύμφωνα με το legend. Βλέπουμε ότι η τάση E_p προπορεύεται της U_S , όπως και πρέπει στην λειτουργία της ΣΜ ως γεννήτριας. Παρατηρούμε επίσης ότι το διάνυσμα $RS*IS$ είναι πολύ μικρό, αλλά όχι αμελητέο για ακριβείς πράξεις. Τέλος, βλέπουμε ότι το διάνυσμα $U_{epd} = jX_{hd}I_d = jX_dI_d - jX_{sc}I_d$ (το κίτρινο διάνυσμα στο

διάγραμμα είναι το jXdl, άρα το Uεpd έχει ίδια κατεύθυνση με ελάχιστα μικρότερο μέτρο) έχει αντίθετη κατεύθυνση από το διάνυσμα E_p, άρα ισχύει ότι $\vec{U}l = \vec{E}p + \vec{Uεpd}$, άρα η μηχανή όντως καταναλώνει άεργο ισχύ και βρίσκεται σε υποδιέγερση.