

## **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

### **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2**

#### **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 μελέτη και η λειτουργία του μονοφασικού μετασχηματιστή εν κενώ, όταν βραχυκυκλώνεται το δευτερεύον και υπό φορτίο. Η μέτρηση και σχεδίαση αντίστοιχων χαρακτηριστικών καμπύλων. Η μελέτη του τριφασικού μετασχηματιστή στις διάφορες λειτουργίες και συνδεσμολογίες του.

Πριν την έναρξη της προσομοίωσης σημειώνουμε ότι για την μονοφασικό μετασχηματιστή ίσχυουν τα παρακάτω και ονομαστικά μεγέθη:  $V_{1N}=230V$   $V_{2N}=115V$   $S_N=4KVA$

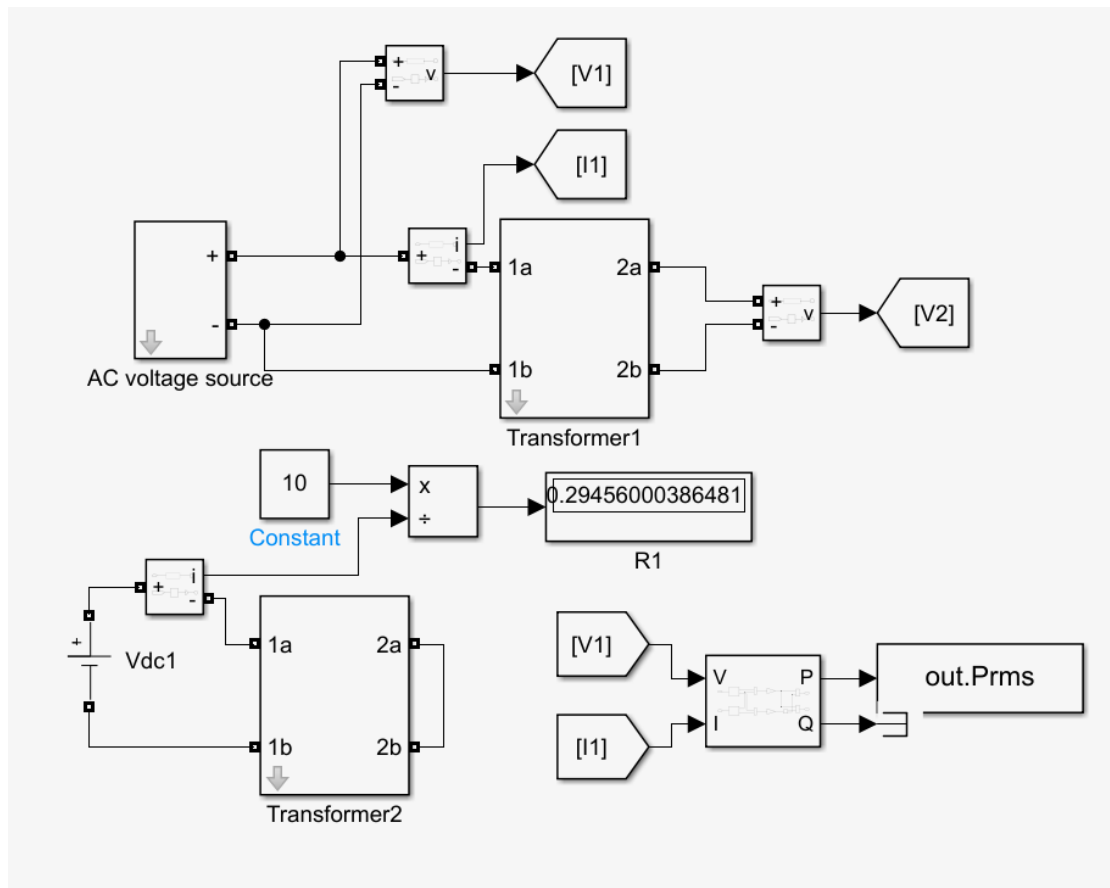
### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ**

#### **5.1 Λειτουργία εν κενώ**

Πραγματοποιούμε την συνδεσμολογία εν κενώ και να μεταβάλλουμε την τάση του πρωτεύοντος από 0 έως  $1,2 \cdot V_n = 1,2 \cdot 230 = 276V$  με βήμα των 20 V και μετράμε ρεύμα στο πρωτεύον ( $I_{10}$ ) την τάση στο δευτερεύον ( $V_{20}$ ) και την πραγματική ισχύ του πρωτεύοντος ( $P_{10}$ ).

Έχουμε ανοιχτοκυκλωμένο το δευτερεύον και τροφοδοτούμε το πρωτεύον με πηγή εναλασσόμενης τάσης η οποία αλλάζει το πλάτος τροφοδοσίας κάθε 4 δευτερόλεπτα.

Είναι χρήσιμο να υπολογίσουμε και την αντίσταση γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται με την χρήση DC τάσης ώστε να μην έχουμε μεταβαλλόμενη ροή και ο λόγος  $V/I$  να δίνει την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων.



Κάνοντας την εξομοίωση για 4 δευτερόλεπτα έτσι ώστε να έχουμε μόνιμη κατάσταση βρίσκουμε τα παρακάτω:

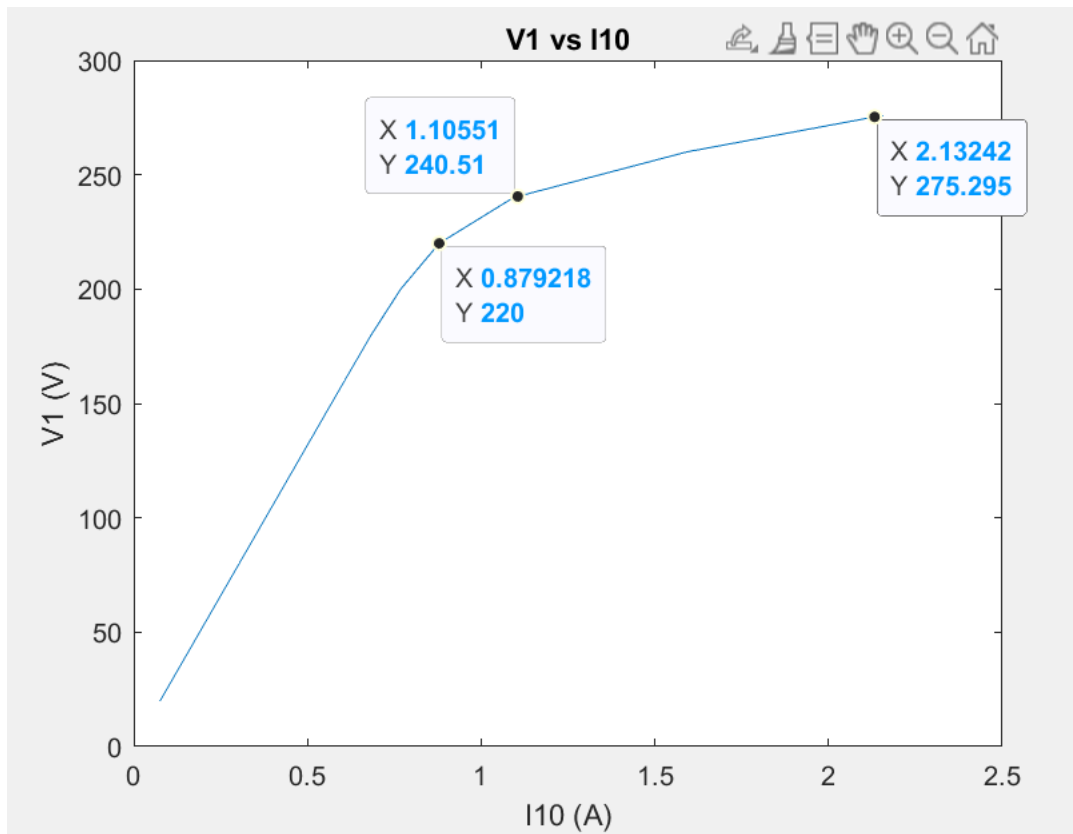
| <b>V1</b>    | <b>I10</b>  | <b>V20</b>   | <b>P10</b>   |
|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 20.0         | 0.07        | 10.5         | 0.8          |
| 40.0         | 0.15        | 21.1         | 3.4          |
| 60.0         | 0.22        | 31.8         | 7.6          |
| 80.0         | 0.30        | 42.4         | 13.6         |
| 100.0        | 0.37        | 52.9         | 21.3         |
| 120.0        | 0.45        | 63.6         | 30.6         |
| 140.0        | 0.53        | 74.1         | 41.6         |
| 160.0        | 0.60        | 84.7         | 54.4         |
| 180.0        | 0.68        | 95.3         | 68.8         |
| 200.0        | 0.76        | 105.9        | 85.0         |
| 220.0        | 0.87        | 116.5        | 102.9        |
| <b>230.0</b> | <b>0.98</b> | <b>121.8</b> | <b>112.5</b> |
| 240.0        | 1.09        | 127.1        | 122.5        |
| 260.0        | 1.59        | 137.6        | 144.0        |
| 276.0        | 2.15        | 146.0        | 162.7        |

Πίνακας 1: Μετρήσεις εν κενώ

Υπολογισμός των ζητούμενων παραμέτρων και απεικόνιση γραφικών  
παραστάσεων:

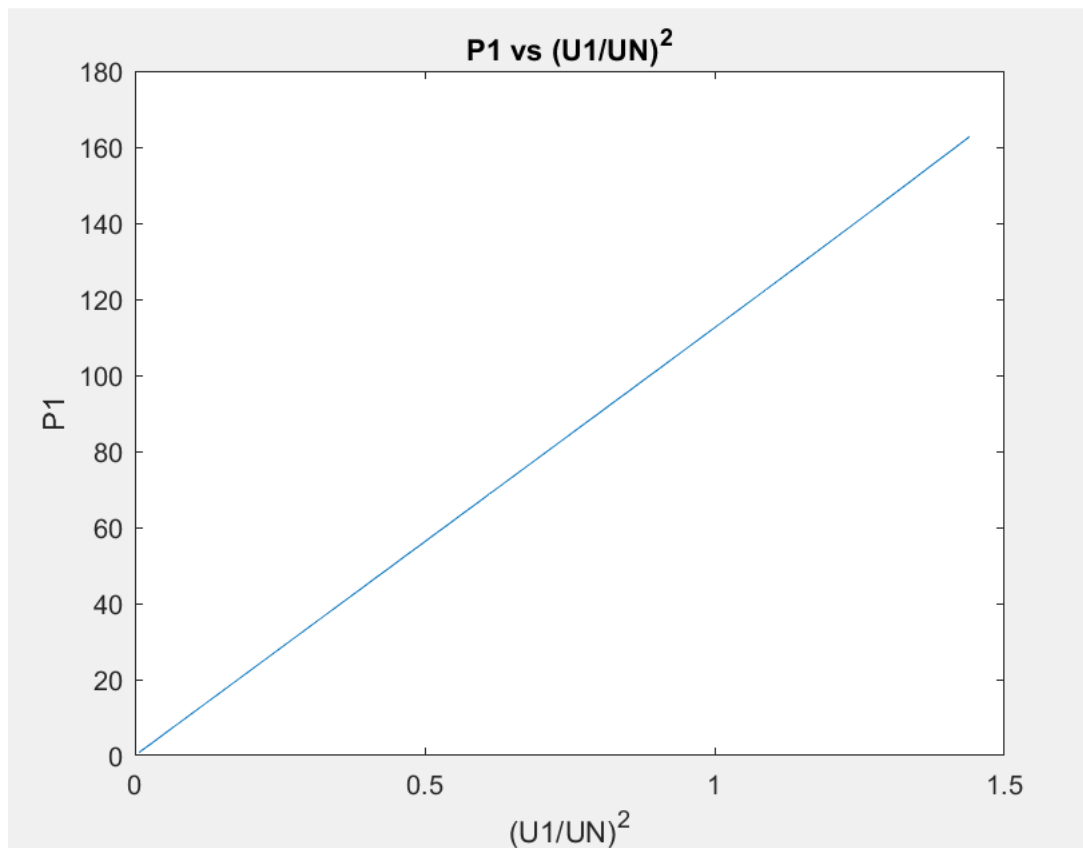
| <b><i>V1/V2</i></b> | <b><i>cos(φ0)</i></b> | <b><i>Pcu</i></b> | <b><i>PFe</i></b> | <b><i>IFe</i></b> | <b><i>I1μ</i></b> | <b><i>I10/I1N</i></b> | <b><i>PFe/PN</i></b> |
|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| 1.887               | 0.56                  | 0.002             | 0.85              | 0.042             | 0.062             | 0.004                 | 0.0002               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.006             | 3.39              | 0.084             | 0.126             | 0.008                 | 0.0008               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.015             | 7.64              | 0.127             | 0.188             | 0.013                 | 0.0019               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.027             | 13.58             | 0.169             | 0.251             | 0.017                 | 0.0033               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.042             | 21.22             | 0.212             | 0.314             | 0.021                 | 0.0053               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.061             | 30.56             | 0.254             | 0.377             | 0.026                 | 0.0076               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.083             | 41.59             | 0.297             | 0.440             | 0.030                 | 0.0103               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.108             | 54.33             | 0.339             | 0.503             | 0.034                 | 0.0135               |
| 1.887               | 0.56                  | 0.137             | 68.76             | 0.381             | 0.567             | 0.039                 | 0.0171               |
| 1.887               | 0.55                  | 0.173             | 84.88             | 0.424             | 0.640             | 0.044                 | 0.0212               |
| 1.887               | 0.53                  | 0.227             | 102.70            | 0.466             | 0.745             | 0.050                 | 0.0256               |
| 1.887               | 0.47                  | 0.351             | 122.19            | 0.509             | 0.966             | 0.062                 | 0.0305               |
| 1.888               | 0.34                  | 0.746             | 143.32            | 0.551             | 1.493             | 0.091                 | 0.0358               |
| 1.889               | 0.27                  | 1.371             | 161.40            | 0.585             | 2.076             | 0.124                 | 0.0403               |

*Πίνακας 2: Υπολογισμοί εν κενώ*



**Διάγραμμα  $V_1=f(I_{10})$**

Παρατηρούμε ότι η τάση αυξάνεται γραμμικά με το ρεύμα μέχρι ένα σημείο όπου το ρεύμα αυξάνεται γρηγορότερα γεγονός που οφείλεται στον κορεσμό του πυρήνα του μετασχηματιστή.

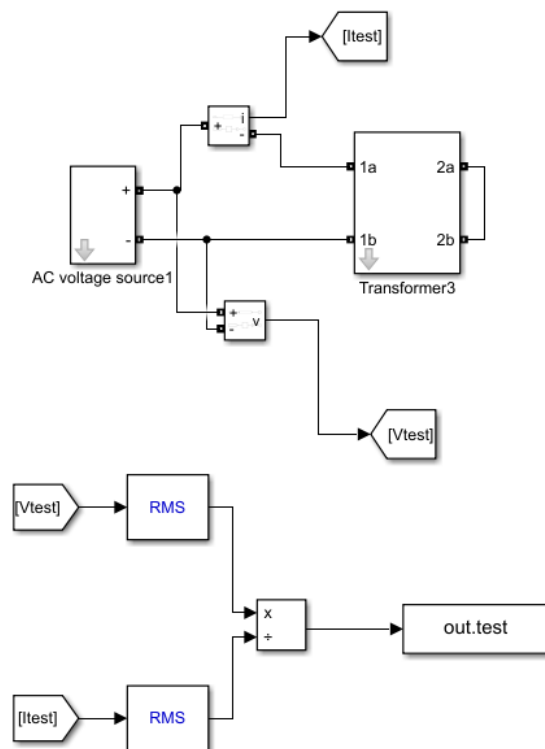


**Διάγραμμα  $P1=f((V1/V1N)^2)$**

Παρατηρούμε την γραμμική σχέση τους όπως και θα περιμέναμε καθώς ισχύει  $P_{fe} = \frac{V_1^2}{R_{fe}}$ .

## 5.2 Λειτουργία βραχυκυκλώματος

Πραγματοποιούμε την παρακάτω συνδεσμολογία για να εξετάσουμε την λειτουργία βραχυκυκλώματος:



Μεταβάλλουμε τη τάση από 0 μέχρι την τιμή που θα δώσει ονομαστικό ρεύμα. Για να το κάνουμε αυτό πρέπει πρώτα να υπολογίζουμε την  $Z_k$  η οποία υπολογίζεται από τον παραπάνω λόγο  $V_{test}/I_{test}$  αμελώντας τον κλάδο που περιλαμβάνει τις απώλειες πυρήνα και την επαγωγή μαγνήτισης και το αποτέλεσμα είναι ίση με 0.7697 όπως φαίνεται παρακάτω ( $Z_k = R1K + X2K$ ,  $R1K = R1 + R2'$ ,  $X1K = X1 + X2'$ ).

|        |        |
|--------|--------|
| 3.5555 | 0.7697 |
| 4.0000 | 0.7697 |
| 4.0000 | 0.7697 |
| 4.0000 | 0.7697 |
| 4.0000 | 0.7697 |
| 4      | 0.7697 |

Επομένως μεταβάλλουμε την τάση μέχρι την τιμή  **$Z_k \cdot I_{1N} = 13.35V$**  και προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα και οι ακόλουθες μετρήσεις. (Τα

διαγράμματα απεικονίζουν τις RMS τιμές των ζητούμενων μεγεθών για κατάλληλο χρονικό διάστημα)

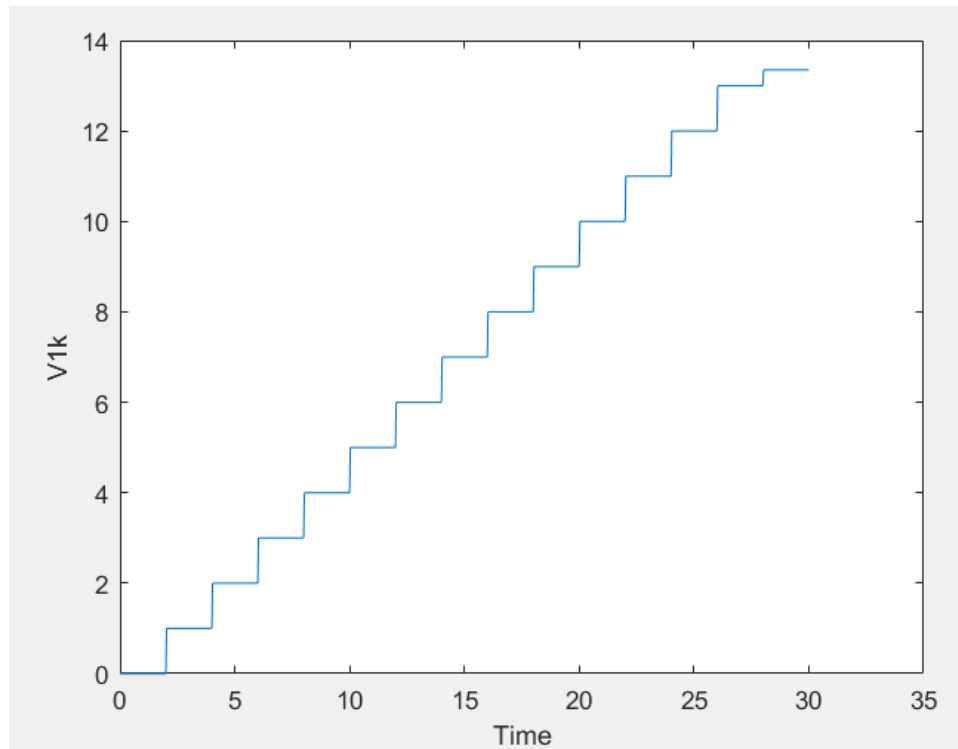


Fig5.2.1 Διάγραμμα Χρόνου/Τάσης V1k(RMS)

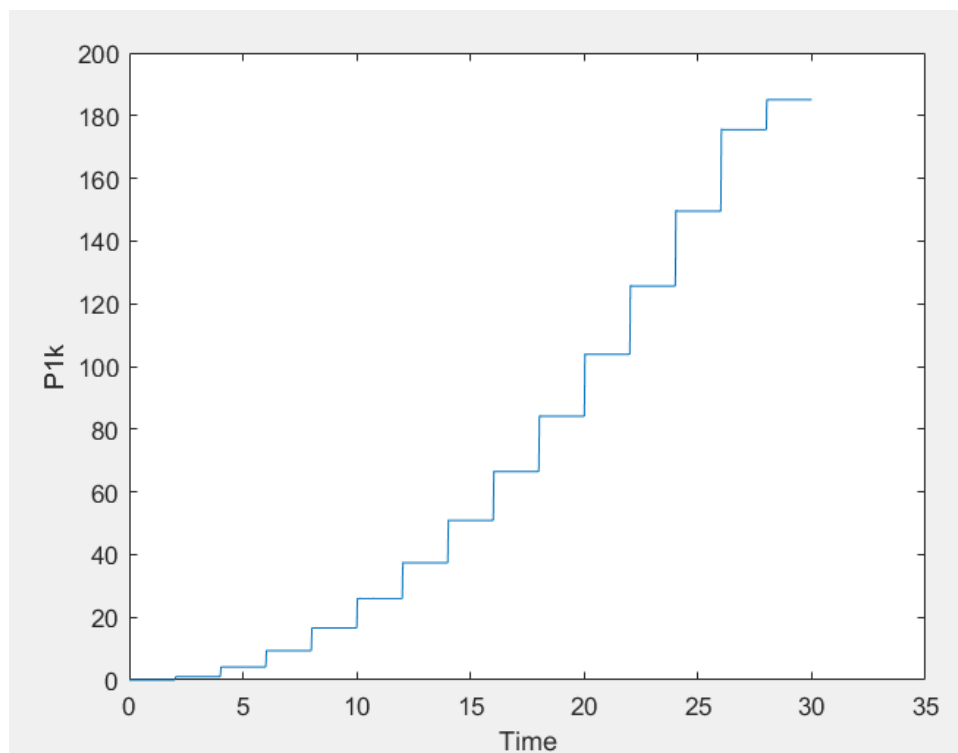


Fig5.2.1 Διάγραμμα Χρόνου/Ισχύος P1k



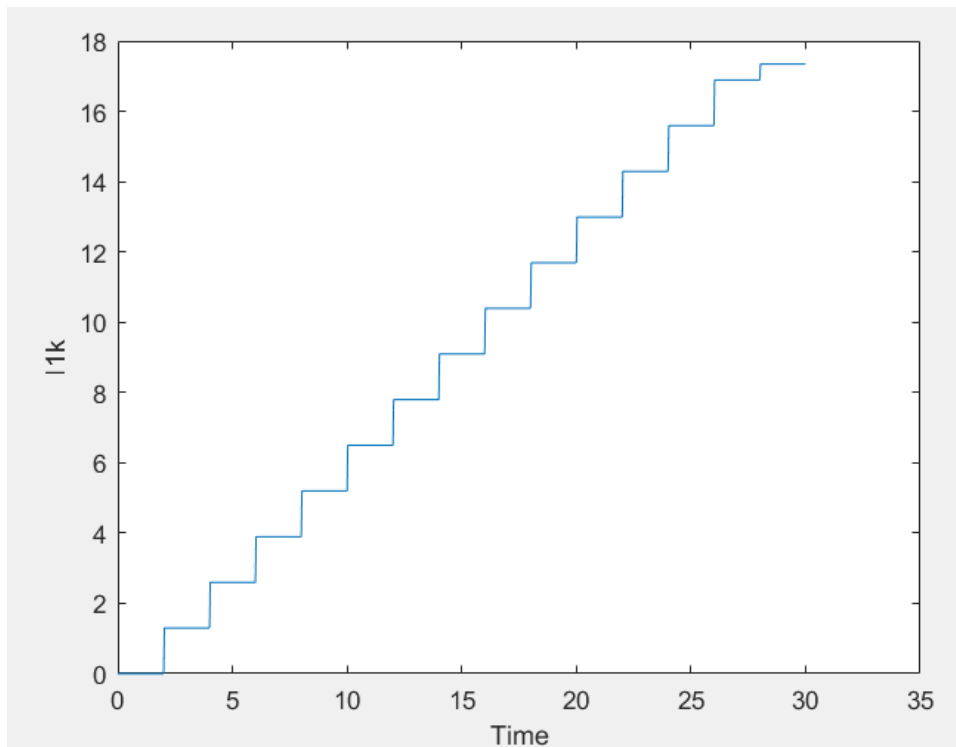
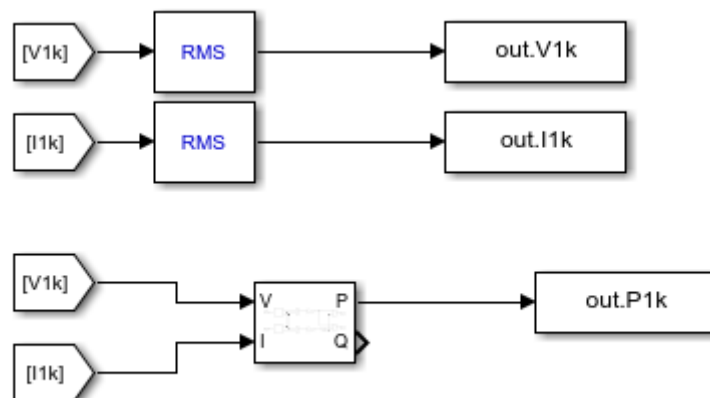


Fig5.2.1 Διάγραμμα Χρόνου/Ρεύματος I1k (RMS)

Τα διαγράμματα υλοποιήθηκαν με plot στο command window των κατάλληλων μεταβλητών και παρουσιάζονται μια φορά για να δείξουν την ορθότητα της ανάθεσης τιμών στην είσοδο για κατάλληλο χρονικό διάστημα. Σε όλες τις άλλες ασκήσεις παρουσιάζονται μόνο οι μετρήσεις των rms τιμών εκτός από όπου απαιτούνται διαγράμματα .



| I1k(A)  | V1k(V) | P1k(W)  |
|---------|--------|---------|
| 0       | 0      | 0       |
| 1.29917 | 1      | 1.03854 |
| 2.59833 | 2      | 4.15414 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 3.8975  | 3     | 9.34682 |
| 5.19666 | 4     | 16.6166 |
| 6.49583 | 5     | 25.9634 |
| 7.79499 | 6     | 37.3873 |
| 9.09416 | 7     | 50.8882 |
| 10.3933 | 8     | 66.4663 |
| 11.6925 | 9     | 84.1214 |
| 12.9917 | 10    | 103.854 |
| 14.2908 | 11    | 125.623 |
| 15.59   | 12    | 149.549 |
| 16.8891 | 13    | 175.512 |
| 17.3439 | 13.35 | 185.09  |

Πίνακας 2.Μετρήσεις σε Βραχυκύκλωμα.

Από τα αποτελέσματα που μας έδωσαν οι μετρήσεις υπολογίζουμε και τα παρακάτω:

$$\text{Ωμική αντίσταση : } R1k = \frac{P1k}{I1k^2}$$

$$\text{Επαγωγική αντίσταση βραχυκυκλώσεως : } X1k = \sqrt{(Z1k^2 - R1k^2)}$$

$$\text{Σχετική ωμική τάση : } uR = \frac{R1k \cdot I1N}{V1N}$$

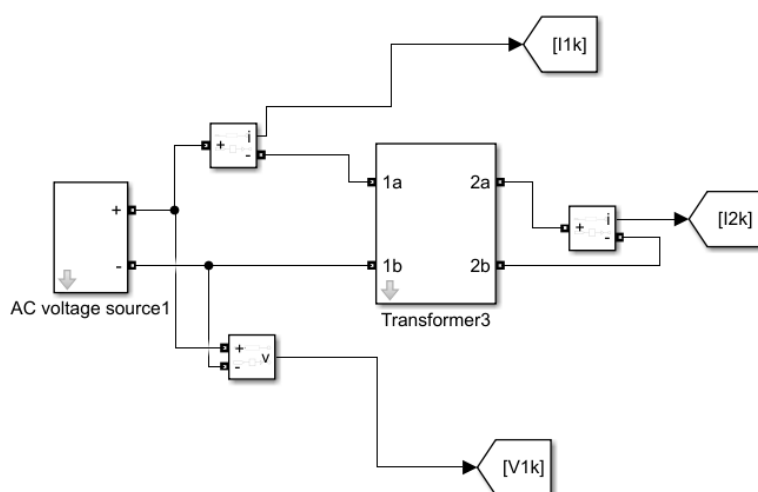
$$\text{Σχετική επαγωγική τάση : } ux = \frac{X1k \cdot I1N}{V1N}$$

$$\text{Σχετική τάση βραχυκυκλώσεως : } uk = \sqrt{uR^2 + ux^2}$$

| <b><i>R1k</i></b> | <b><i>X1k</i></b> | <b><i>Uk</i></b> | <b><i>uR</i></b> | <b><i>ux</i></b> | <b><i>cosφκ</i></b> |
|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| 0.61530           | 0.46243           | 0.05820          | 0.04652          | 0.03497          | 0.79940             |

Σημειώνουμε ότι οι τιμές προκύπτουν ίδιες για κάθε RMS τιμή της τάσης εισόδου για αυτό και εμφανίζονται μια φορά (το οποίο είναι πιθανό να μη συνέβαινε με μη ιδανικά όργανα μέτρησης).

### 5.3 Βραχυκύκλωμα μέσω αμπερομέτρου



Πραγματοποιείται η παραπάνω συνδεσμολογία. Επειδή το αμπερόμετρο στη matlab είναι ιδανικό η εσωτερική του αντίσταση θα είναι μηδενική οπότε έχουμε ουσιαστικά τις ίδιες συνθήκες με πριν.

Μεταβάλλουμε τώρα την τάση μέχρι το ρεύμα να φτάσει την τιμή  $1.2 \cdot I_{2N}$ . Παρόμοια με πριν υπολογίζουμε την τιμή της τάσης τότε να είναι 16.06V και παίρνουμε τα παρακάτω

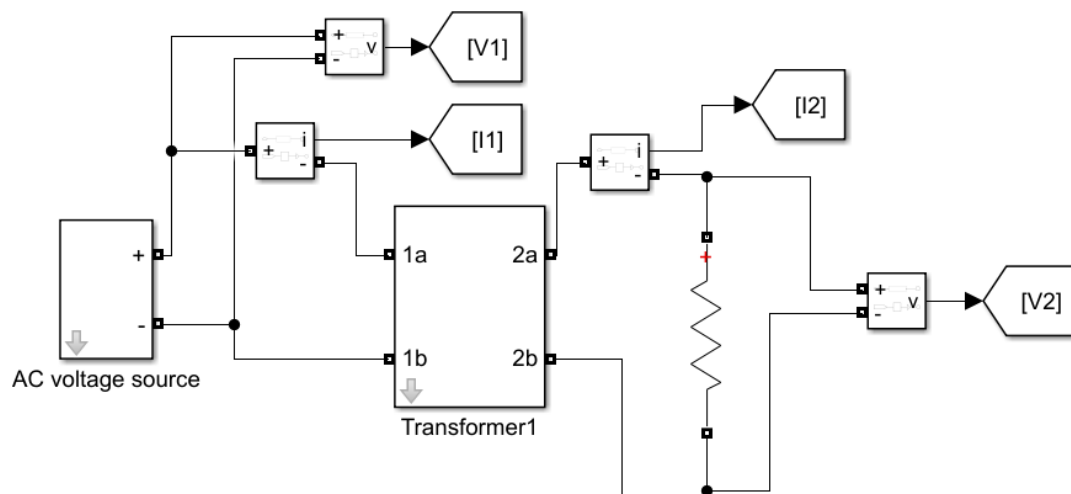
| $I1k(A)$ | $V1k(V)$ | $I2k(A)$ |
|----------|----------|----------|
| 0        | 0        | 0        |
| 1.29917  | 1        | 2.44563  |
| 2.59833  | 2        | 4.89126  |
| 3.8975   | 3        | 7.3369   |
| 5.19666  | 4        | 9.78253  |
| 6.49583  | 5        | 12.2282  |
| 7.79499  | 6        | 14.6738  |
| 9.09416  | 7        | 17.1194  |
| 10.3933  | 8        | 19.5651  |
| 11.6925  | 9        | 22.0107  |
| 12.9917  | 10       | 24.4563  |
| 14.2908  | 11       | 26.9019  |
| 15.59    | 12       | 29.3476  |
| 16.8891  | 13       | 31.7932  |
| 18.1883  | 14       | 34.2388  |
| 19.4875  | 15       | 36.6845  |
| 20.7866  | 16       | 39.1301  |
| 20.8646  | 16.06    | 39.2768  |

Πίνακας 3. Μετρήσεις βραχυκυκλώματος μέσω αμπερόμετρου

Η τιμή του λόγου  $I2k/I1k$  προκύπτει πάντα ίση με 1.882 γεγονός που είναι λογικό αφού είναι σχεδόν ίσος με 2 που είναι ο λόγος των σπειρών των 2 τυλιγμάτων (λόγος μετασχηματισμού). Το μικρό σφάλμα οφείλεται στην ύπαρξη του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος που σχετίζεται με τις απώλειες σιδήρου. Τέλος παρατηρούμε ότι ο λόγος αυτός είναι ίδιος με τον λόγο  $V1N/V20$ .

## 5.4 Φόρτιση

### 5.4.1 Καθαρά ωμικό φορτίο



*Το μοντέλο .slx της simulink*

Διατηρούμε σταθερή την τάση του πρωτεύοντος στην ονομαστική της τιμή 230 V, και υπολογίζουμε την τιμή ονομαστικού ρεύματος στο δευτερεύον:  $I2N = \frac{P2N}{U2N} = \frac{4000}{115} = 34.7826 \text{ A}$ . Θα μετρήσουμε τα  $U1$ ,  $U2$ ,  $I1$ ,  $I2$ ,  $P1$ ,  $P2$  για κάθε τιμή του  $I2$ , το οποίο θα μεταβάλλουμε από το 0 έως το  $1,2 \cdot I2N$  με βήμα  $0,1 \cdot I2N$ .

Με τον παρακάτω κώδικα, υπολογίσαμε προσεγγιστικά τις τιμές του ωμικού φορτίου  $R$  που θα συνδέσουμε στο δευτερεύον για τις επιθυμητές μεταβολές του  $I_2$ .

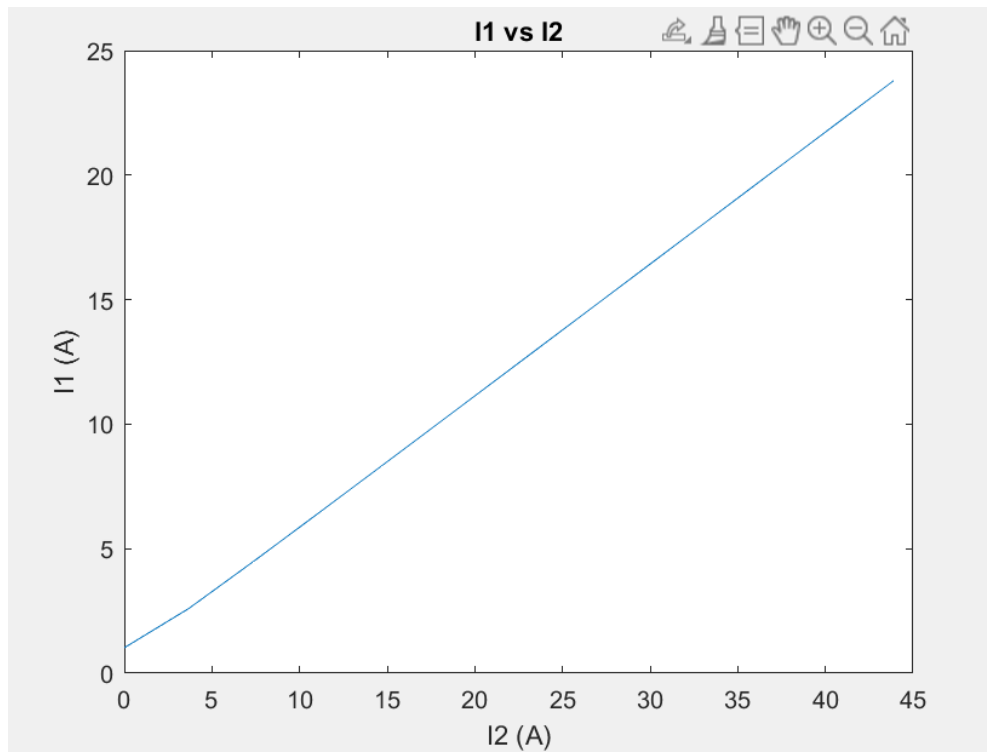
```
%polynomial to var R
Xk =0.46243;
Rk = 0.6153;
V1n =230;
I2n = 17.3913 %anigmeno

R_vals = [1000000];
for i = 0.1:0.1:1.2
    poly = [1 2*Rk (Rk^2 + Xk^2 - (V1n/(i*I2n))^2)];
    r = roots(poly);
    for j = 1:length(r)
        if r(j) > 0
            R_val = r(j);
        end
    end
    R_vals = [R_vals; R_val];
end
R_vals = R_vals/4;
```

Λύνουμε το ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού, αγνοώντας τις  $R_{fe}$ ,  $X_h$  καθώς οι τιμές  $R$  που προκύπτουν είναι αρκετά μικρές. Για αυτόν τον λόγο παρατηρούμε μία αύξηση κατά περίπου 5% στο ρεύμα του δευτερεύοντος σχετικά με τις αναμενόμενες τιμές του  $I_2$ .

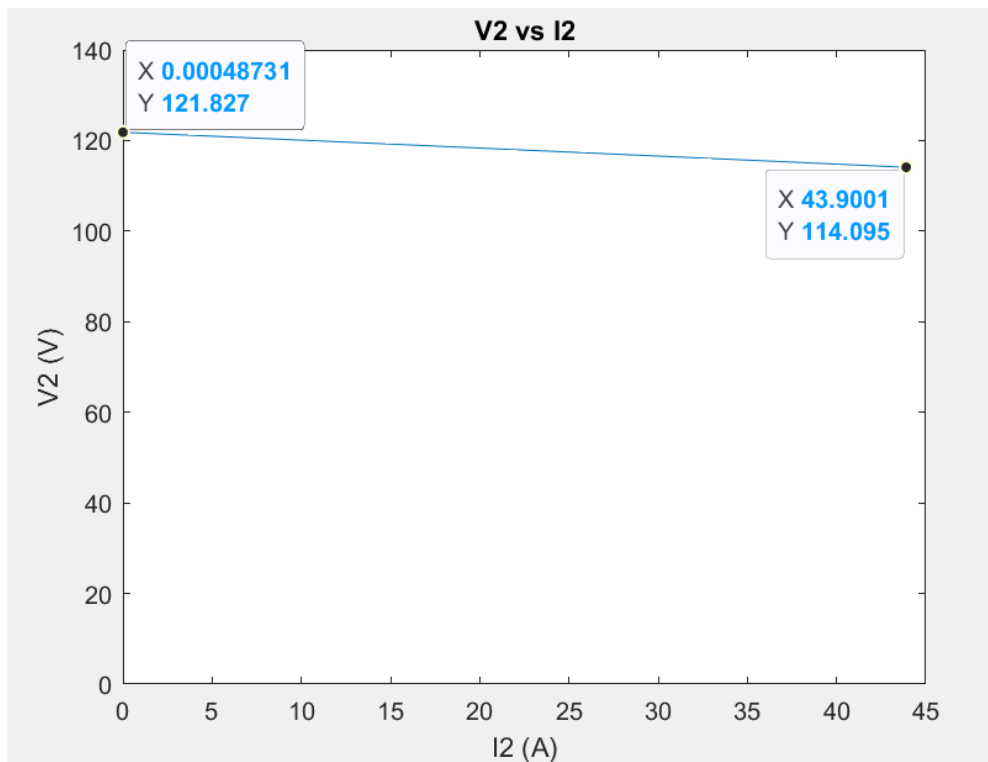
| $R (\Omega)$ | $V_1 (V)$ | $V_2 (V)$ | $I_1 (A)$ | $I_2 (A)$ | $P_1 (W)$ | $P_2 (W)$ |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 250.000      | 230.0     | 121.8     | 1.02      | 0.00      | 112.6     | 0.0       |
| 32.91        | 230.0     | 121.1     | 2.60      | 3.68      | 561.2     | 446.2     |
| 16.38        | 230.0     | 120.5     | 4.48      | 7.36      | 1009.3    | 887.3     |
| 10.87        | 230.0     | 119.9     | 6.40      | 11.03     | 1456.8    | 1323.1    |
| 8.11         | 230.0     | 119.2     | 8.33      | 14.70     | 1903.7    | 1753.7    |
| 6.46         | 230.0     | 118.6     | 10.27     | 18.36     | 2350.1    | 2179.0    |
| 5.36         | 230.0     | 117.9     | 12.20     | 22.03     | 2795.8    | 2599.1    |
| 4.57         | 230.0     | 117.3     | 14.14     | 25.68     | 3240.8    | 3013.9    |
| 3.98         | 230.0     | 116.6     | 16.07     | 29.33     | 3685.2    | 3423.4    |
| 3.52         | 230.0     | 116.0     | 18.01     | 32.98     | 4128.8    | 3827.7    |
| 3.15         | 230.0     | 115.3     | 19.94     | 36.62     | 4571.7    | 4226.6    |
| 2.85         | 230.0     | 114.7     | 21.86     | 40.26     | 5013.9    | 4620.3    |
| 2.66         | 230.0     | 114.0     | 23.79     | 43.90     | 5455.3    | 5008.7    |

Πίνακας 4. Μετρήσεις για καθαρά ωμικού φορτίου



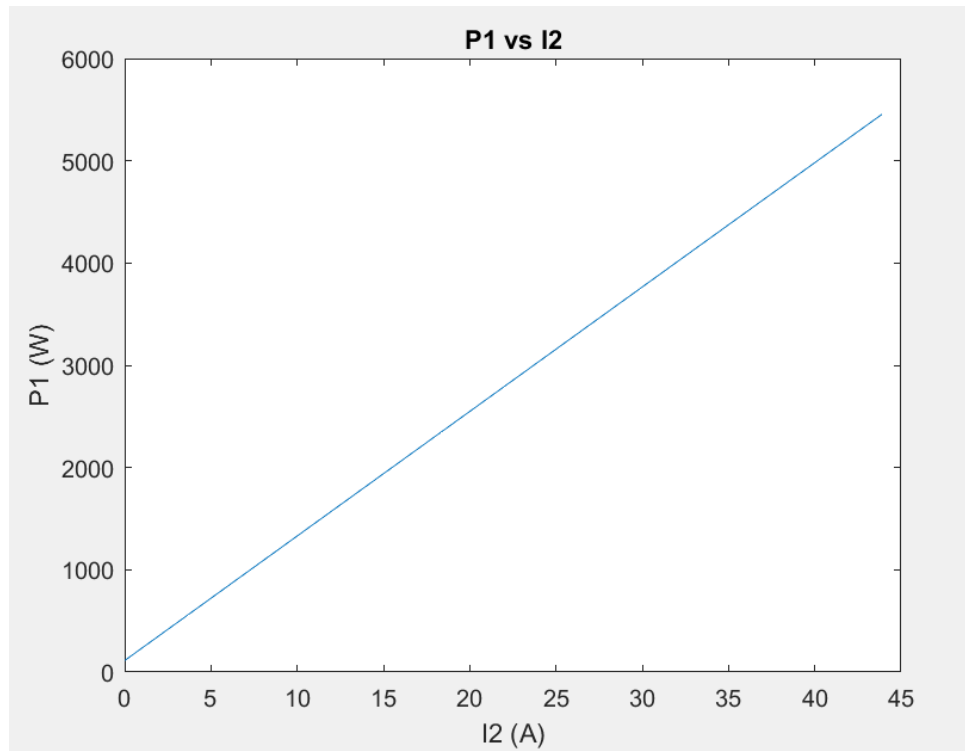
Διάγραμμα I1 RMS / I2 RMS

Παρατηρείται γραμμική σχέση ανάμεσα στο ρεύμα πρωτεύοντος I1 και δευτερεύοντος I2, πράγμα αναμενόμενο αφού συνδέονται με τον λόγο μετασχηματισμού  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}$ .



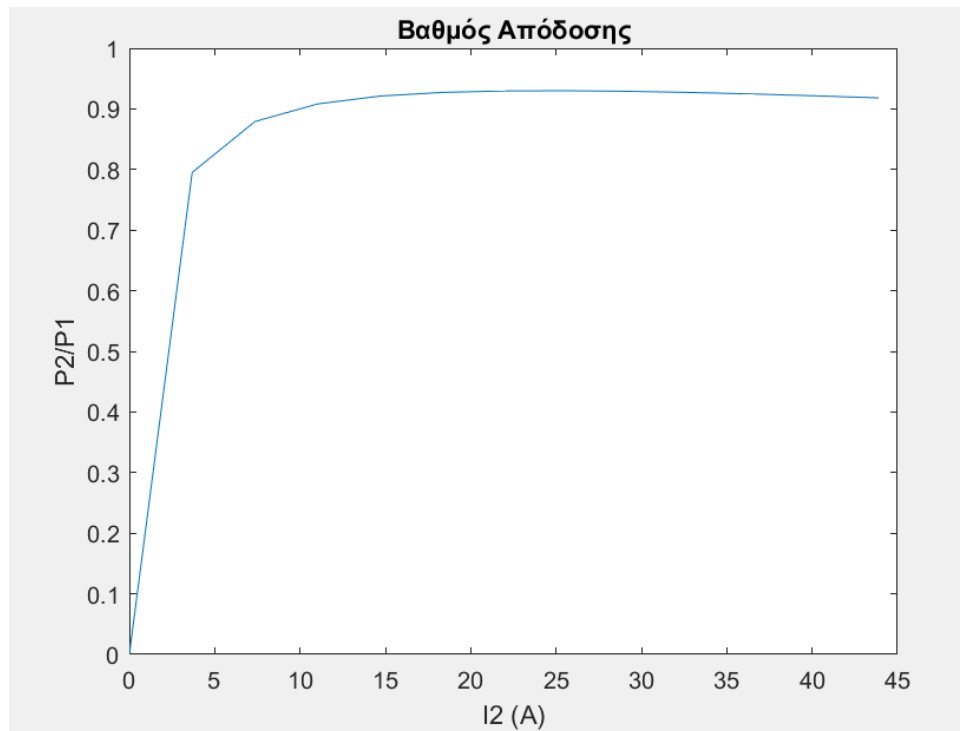
### Διάγραμμα I2 RMS / V2 RMS

Παρατηρούμε ότι η τάση του δευτερεύοντος μειώνεται γραμμικά, με μικρή κλίση, επειδή αν και κρατάμε την V1 σταθερή (άρα, εξαιτίας του λόγου μετασχηματισμού, θα έπρεπε και η V2 να μένει σταθερή) αυξάνοντας το ρεύμα, αυξάνονται και οι σχετικές ωμικές και επαγωγικές τάσεις, μειώνοντας έτσι την V2.



### Διάγραμμα P1 RMS / I2 RMS

Εφόσον κρατάμε την V1 σταθερή, και δεν υπάρχει αντίσταση μεταβλητή με ρεύμα (δηλαδή εφόσον  $I_m < 1$  A, θα αναφερθούμε παρακάτω σε αυτό) παρατηρείται γραμμική σχέση η οποία προκύπτει από τον τύπο  $P1 = V1 * I1 * \cos\varphi$  (τα ρεύματα I1, I2 συνδέονται με τον λόγο μετασχηματισμού)

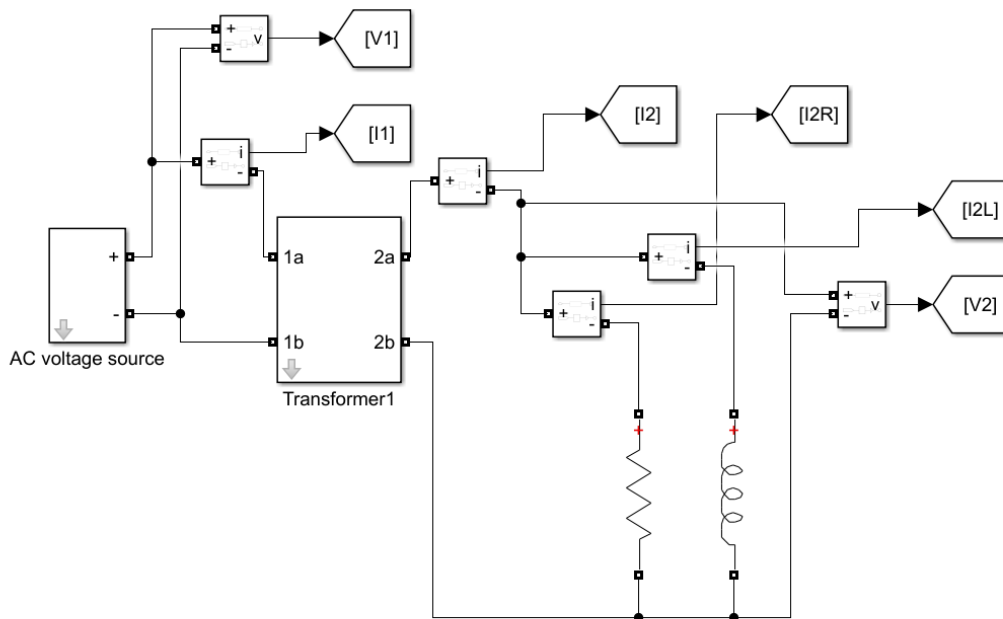


Διάγραμμα  $I_2$  RMS / Βαθμός Απόδοσης

Παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται πολύ γρήγορα για μικρές τιμές του  $I_2$ , και ότι για  $I_2 > 0.5 \cdot I_{2N}$  μεγιστοποιείται και μένει σταθερός.

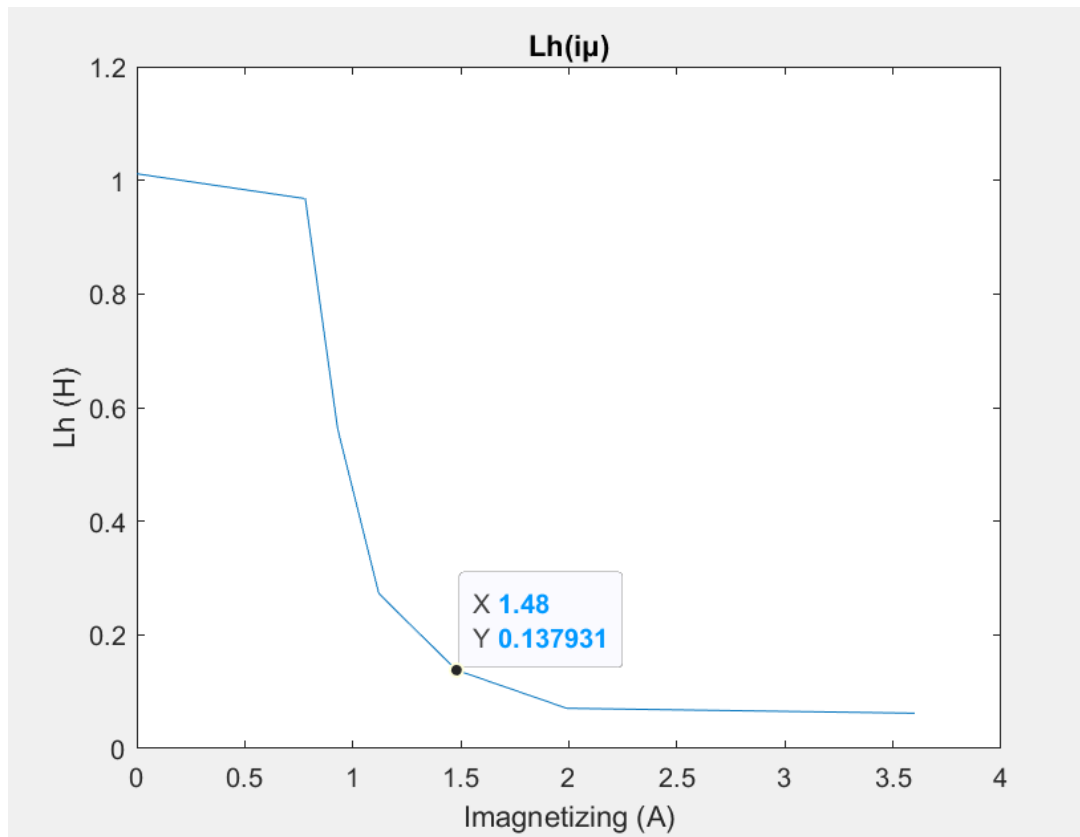
#### **5.4.2 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο**





*Το μοντέλο .slx στη Simulink*

Θέτουμε την τάση του πρωτεύοντος στην ονομαστική τιμή των 230 V. Θα υπολογίσουμε τις τιμές της αντίστασης R και επαγωγής L του φορτίου λύνοντας το ισοδύναμο κύκλωμα ανηγμένο στο πρωτεύον. Τις τιμές R1, R2 θα πάρουμε ως  $R_k/2$  και  $X_{\sigma 1}$ ,  $X_{\sigma 2}$  ως  $X_k/2$ . Επίσης θα συμπεριλάβουμε τις εμπεδήσεις  $R_{fe}$ ,  $X_h$ , τις οποίες υπολόγισα ως  $R_{fe} = \frac{U_1 N^2}{P_{fe}} = 471 \Omega$ ,  $X_h = \frac{U_1 N^2}{Q_m} = 268 \Omega$ , χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις που πήρα από το εν κενώ κύκλωμα της άσκησης 5.1 για  $U_1 = 230V$ . Η τιμή  $X_h$  δεν έβγαζε ακριβή αποτελέσματα (απόκλιση  $\sim 15\%$  από την ονομαστική τιμή  $I_{1N}$ ), και γι' αυτό βρήκαμε από τις παραμέτρους την χαρακτηριστική κορεσμού ( $\Phi_m$  προς  $i_m$ ) του μετασχηματιστή και παραγωγίζοντας την, βρήκαμε την  $L_h(i_m)$ , όπως φαίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα  $L_h / I_{mag} (RMS)$

Παρατηρούμε την κύρια αυτεπαγωγικότητα να μένει περίπου σταθερή για ρεύμα μαγνήτισης ως και 1 Αμπέρ, και μετά να μειώνεται ραγδαία μέχρι να σταθεροποιηθεί στα 2 Αμπέρ.

Για ρεύμα  $I_{1N}$ , έχουμε  $i_{\mu} = 1.5 \text{ A}$ , άρα  $L_h = 0.138 \text{ H}$ , άρα  $X_h = 44.33 \Omega$ . Σύμφωνα με τις τιμές αυτές που βρήκαμε, λύσαμε το ισοδύναμο ως προς  $L$  (με μικρή τιμή της  $R = 3.9\Omega$ , ώστε η γωνία  $\phi_2$  να είναι μικρή, εφόσον το προκύπτον μέτρο της εμπέδησης φορτίου είναι περίπου 3.5). Για να λύσουμε το κύκλωμα ως προς την αντίδραση  $X_L$ , χρησιμοποιήσαμε εξισώσεις και σύμβολα από το Symbolic Math Toolbox. Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που υπολογίζει την επαγωγή  $L$ .

```

%calc_RLforI1n
Rk = 0.6153;
Xk = 0.46243;
Rfe = 470;
Xh = 44.33; %318.23;
V1N = 230;
I1N = 17.3913;
syms XL
Zload = j*(3.9)*XL/(3.9 + j*XL);
Zload = 4*Zload;
Z1 = Zload + Rk/2 + j*Xk/2;
Zcore = j*Rfe*Xh/(Rfe+j*Xh);
Z2 = Zcore*Z1/(Zcore + Z1);
Z2 = Z2 + Rk/2 + j*Xk/2;
Zmag = ((real(Z2))^2 + (imag(Z2))^2)^(1/2);
eq1 = Zmag == (V1N/I1N);
sol = solve(eq1, XL);
sol = double(sol)/(2*pi*50)

```

Προκύπτει η τιμή της  $L = 0.0388 \text{ H}$  , άρα  $X_L = 12.1893 \Omega$ , και με  $R = 3.9 \Omega$ , είναι  $|Z_{load}| = 3.7145$ .

Παρατίθενται οι μετρήσεις:

|            |           |
|------------|-----------|
| <b>V1</b>  | 230.00 V  |
| <b>V2</b>  | 115.44 V  |
| <b>I1</b>  | 17.25 A   |
| <b>I2</b>  | 31.08 A   |
| <b>I2R</b> | 29.60 A   |
| <b>I2L</b> | 9.47 A    |
| <b>P1</b>  | 3698.69 W |
| <b>P2</b>  | 3416.98 W |

### Υπολογισμοί:

Γωνία φάσης  $\phi_1$ :  $\phi_1 = \arccos\left(\frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}\right) = 21.1891^\circ$  ,  $\cos(\phi_1) = 0.932$

Γωνία φάσης  $\phi_2$ :  $\phi_2 = \arccos\left(\frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}\right) = 17.7502^\circ$  ,  $\cos(\phi_2) = 0.953$

Παρατηρούμε ότι έχουμε ικανοποιητικά μεγάλο ποσοστό πραγματικής προς φαινόμενη ισχύς, και ότι η γωνία  $\phi_2$  είναι μικρότερη της  $\phi_1$ , λόγω της μικρότερης επαγωγικής αντίδρασης στα δεξιά του δευτερεύοντος από τα δεξιά του πρωτεύοντος.

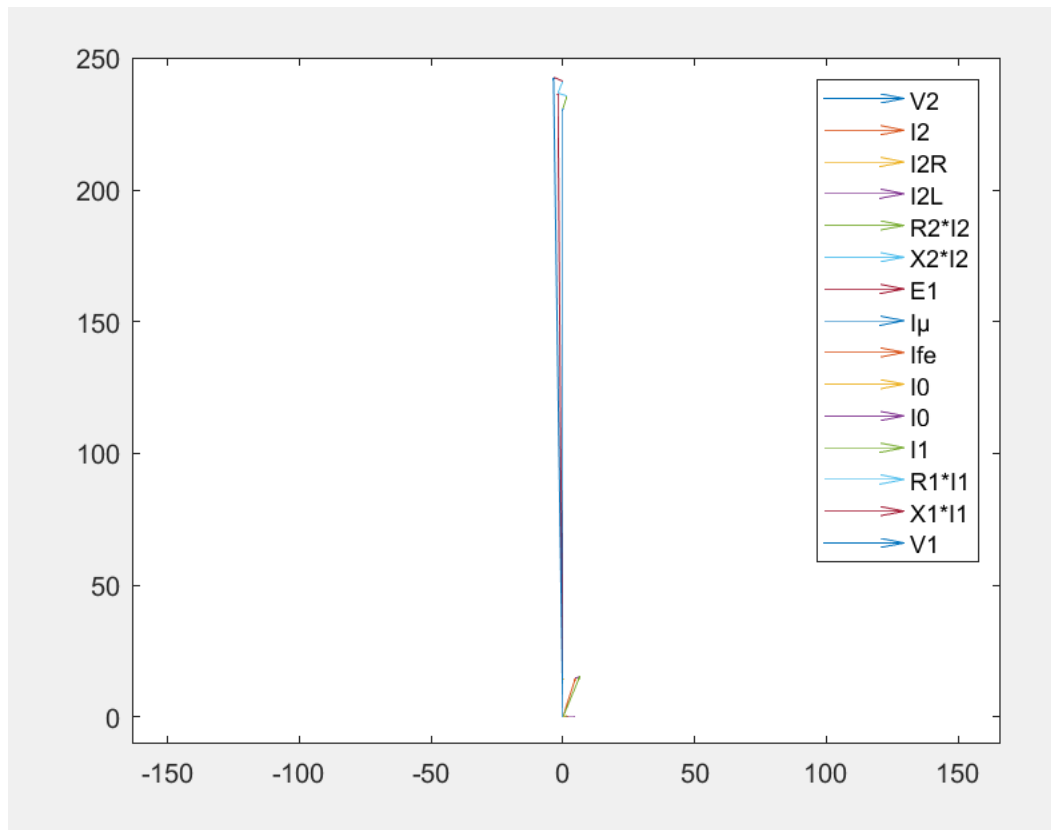
## Διανυσματικό διάγραμμα:

Θέσαμε τις τιμές των  $X_{s1}$ ,  $X_{s2}$  ως  $X_k/2$  και των  $R_1 = 0.29456 \Omega$  (από 5.1) και  $R_2' = R_k - R_1 = 0.32074 \Omega$ . Για να σχεδιάσουμε το διανυσματικό διάγραμμα χρησιμοποιήσαμε τον ακόλουθο κώδικα.

## Κώδικας:

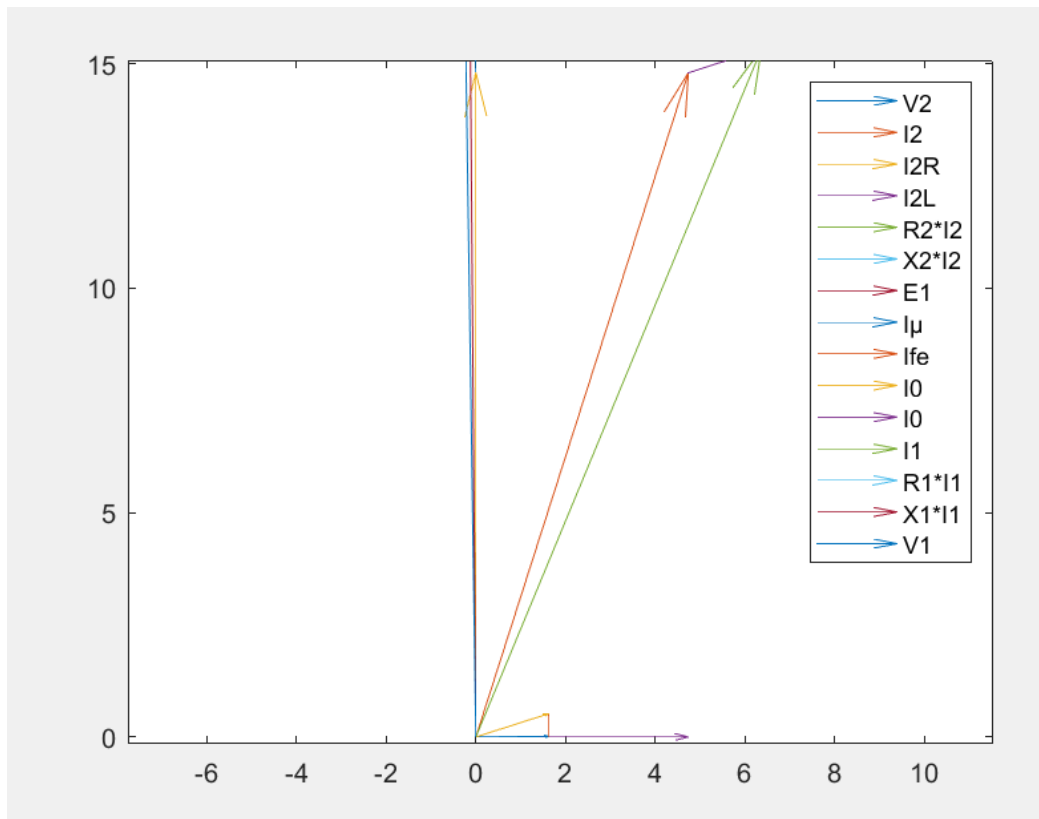
```
1 - R1 = 0.29456; %apo 5.1
2 - R2_anigm = 0.6153 - R1; %Rk - R1, Rk apo 5.2
3 - Xs1 = 0.46243/2;
4 - Xs2_anigm = 0.46243/2;
5 - V2_anigm = 233.82485992;
6 - I2_anigm = 15.99918187;
7 - I2_R_anigm = 15.79897702;
8 - I2_C_anigm = 2.52312286;
9 - f2 = -9.07406746*(pi/180);
10 - %Pfe = P1-P2-Pcu1-Pcu2, Ife=Pfe/V1
11 - %I0 = I1-I2', Im=(I0^2-Ife^2)^0.5
12 - Ife = 0.514779;
13 - Im = 1.258846;
14
15 - cla
16 - %V2'
17 - V2_V = V2_anigm;
18 - qV2 = quiver(0, 0, 0, V2_V, 'off');
19 - axis([-30 30 -10 250])
20 - set(qV2,'MaxHeadSize',0.01)
21 - hold on
22 - %I2'
23 - I2_U = I2_anigm*sin(f2);
24 - I2_V = I2_anigm*cos(f2);
25 - quiver(0, 0, I2_U, I2_V, 'off')
26 - %I2R, I2C
27 - quiver(0, 0, 0, I2_R_anigm, 'off')
28 - quiver(0, 0, -I2_C_anigm, 0, 'off')
29 - %R2'*I2'
30 - R2_U = R2_anigm*I2_U;
31 - R2_V = R2_anigm*I2_V;
32 - quiver(0, V2_V, R2_U, R2_V, 'off')
33 - %Xs2'*I2
34 - X2_X = R2_U;
35 - X2_Y = V2_V + R2_V;
36 - X2_U = Xs2_anigm*I2_anigm*(-cos(f2)); %sin(f2-90)
37 - X2_V = Xs2_anigm*I2_anigm*(sin(f2)); %cos(f2-90)
38 - quiver(X2_X, X2_Y, X2_U, X2_V, 'off')
39 - %E1
40 - E1_U = X2_X + X2_U;
41 - E1_V = X2_Y + X2_V;
42 - qE1 = quiver(0, 0, E1_U, E1_V, 'off');
43 -
44 - qE1 = quiver(0, 0, E1_U, E1_V, 'off');
45 - set(qE1,'MaxHeadSize',0.01)
46 - %Im
47 - %angle between E1,U2 is angle betwn Im, x axis
48 - %atan returns radians, cos() sin() take rad as
49 - E1_U2_angle = -atan((abs(E1_U)/E1_V))
50 - Im_U = Im*cos(-E1_U2_angle);
51 - Im_V = Im*sin(-E1_U2_angle);
52 - quiver(0, 0, Im_U, Im_V, 'off');
53 - %Ife
54 - Ife_U = Ife*sin(E1_U2_angle); %<0
55 - Ife_V = Ife*cos(E1_U2_angle);
56 - quiver(Im_U, Im_V, Ife_U, Ife_V, 'off')
57 - %I0
58 - I0_U = Im_U + Ife_U;
59 - I0_V = Im_V + Ife_V;
60 - quiver(0, 0, I0_U, I0_V, 'off');
61 - quiver(I2_U, I2_V, I0_U, I0_V, 'off');
62 - %I1
63 - I1_U = I2_U + I0_U;
64 - I1_V = I2_V + I0_V;
65 - quiver(0, 0, I1_U, I1_V, 'off');
66 - %R1*I1
67 - R1_U = R1*I1_U;
68 - R1_V = R1*I1_V;
69 - quiver(E1_U, E1_V, R1_U, R1_V, 'off');
70 - %X1*I1
71 - X1_X = E1_U + R1_U;
72 - X1_Y = E1_V + R1_V;
73 - X1_U = Xs1*(-I1_V) %X1I1 vartical to I1
74 - X1_V = Xs1*I1_U;
75 - quiver(X1_X, X1_Y, X1_U, X1_V, 'off')
76 - %V1
77 - V1_U = X1_X + X1_U;
78 - V1_V = X1_Y + X1_V;
79 - qV1 = quiver(0, 0, V1_U, V1_V, 'off');
80 - set(qV1,'MaxHeadSize',0.01)
81 - axis equal
82 - legend('V2', 'I2', 'I2R', 'I2C', 'R2*I2', 'X2*I2', 'I1', 'Ife', 'I0', 'I0', 'I1', 'R1*I1', 'X1*I1')
```

Επειδή πρόκειται για διανύσματα με πολύ διαφορετικό μήκος το ένα (τάσεις) από το άλλο (ρεύματα) θα παραθέσουμε στην αρχή ολόκληρο το διάγραμμα και μετά συγκεκριμένα μεγενθυμένα σημεία του διαγράμματος.



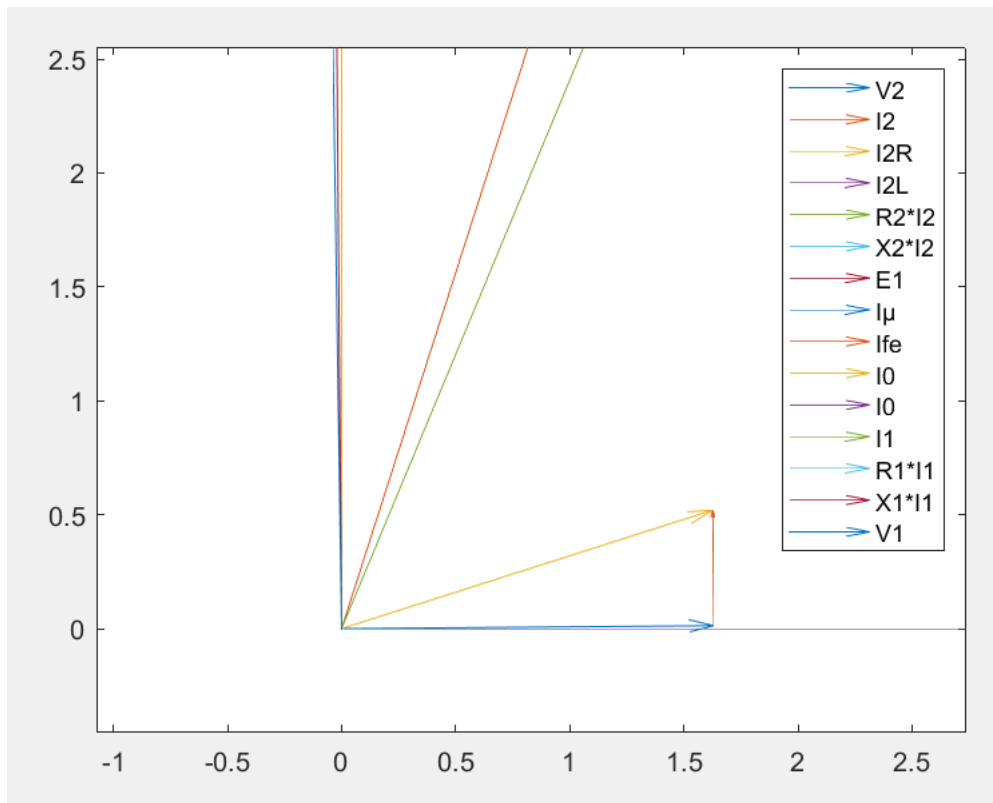
*Διανυσματικό διάγραμμα φορτίου RL*

Το διανυσματικό διάγραμμα για φορτίο RL. Παρατηρούμε ότι οι τάσεις  $V_2'$ ,  $E_1$ ,  $V_1$  δεν διαφέρουν πολύ σε μέτρο και ότι η διαφορά φάσης μεταξύ τους είναι αμελητέα.



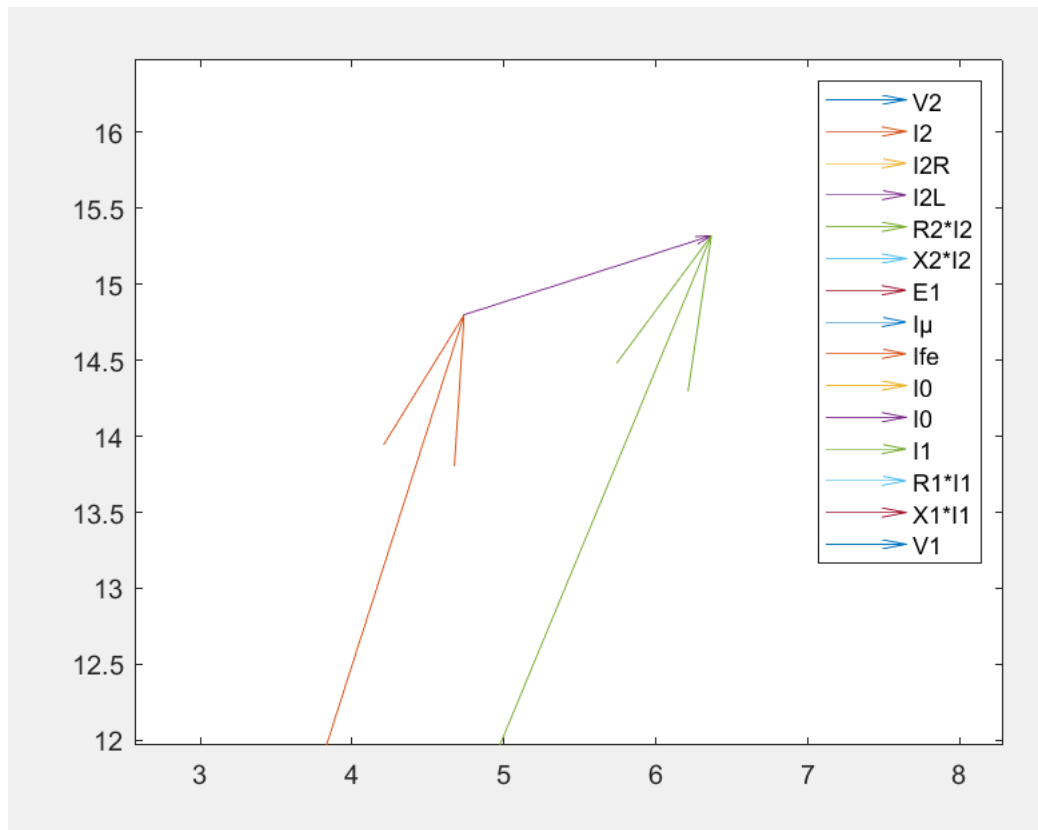
### Μεγένθυση στα ρεύματα

Μεγεθύναμε το διάγραμμα ώστε να φαίνονται τα ρεύματα:  
 Παρατηρούμε ότι το  $I_{2R}$  (κίτρινο) εφάπτεται πάνω στην  $V_2$ , ενώ το  $I_{2L}$  (μωβ) είναι κάθετο και δεξιά αυτής. Το συνολικό  $I_2$  (πορτοκαλί) δημιουργεί γωνία  $17.75$  μοίρες με την  $V_2$ , και αφού προσθέσουμε το  $I_0$  (μωβ) παίρνουμε το  $I_1$  (πράσινο).



*Μεγένθυση στα  $I_{fe}$ ,  $I_{\mu}$ ,  $I_0$*

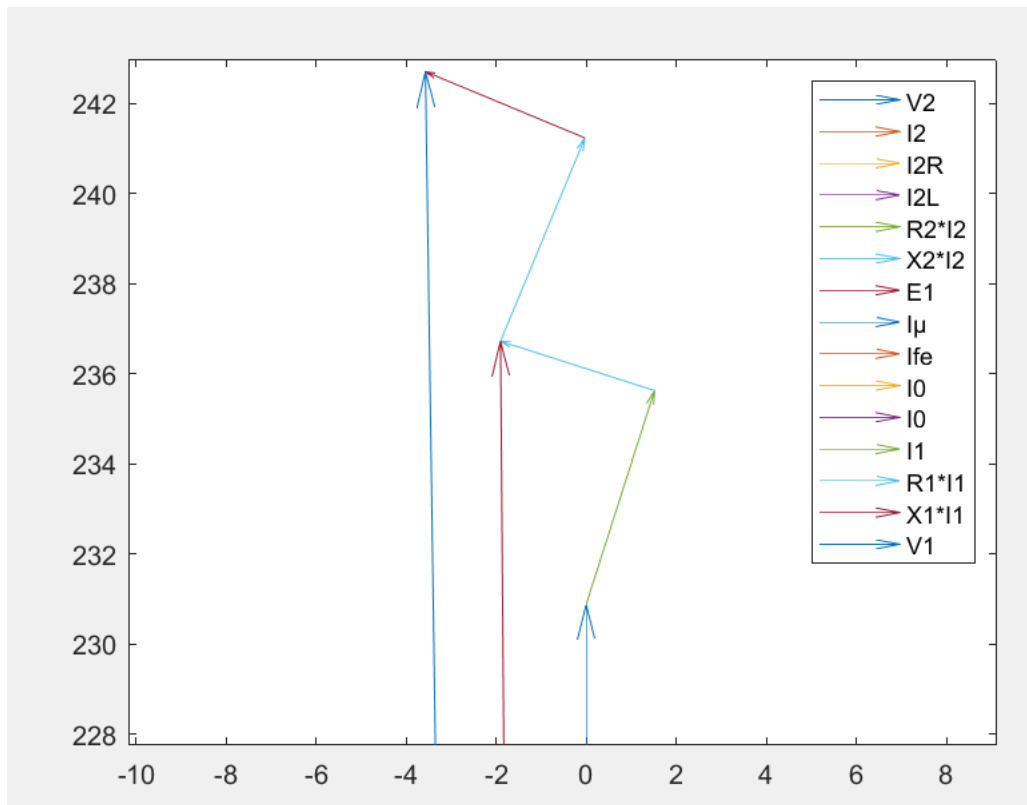
Μεγεθύνουμε ακόμα περισσότερο για να δούμε τα  $I_{fe}$  (πορτοκαλί),  $I_{\mu}$  (μπλε),  $I_0$  (κίτρινο), τα οποία υπολογίσαμε σύμφωνα με την μεθοδολογία της 5.1. Το  $I_{fe}$  είναι παράλληλο με την  $E_1$  (η οποία εμφανίζει μία γωνία 1.07 μοίρες με την  $V_2$ ) και το  $I_{\mu}$  είναι κάθετο με αυτήν. Επειδή το  $I_0$  είναι επί το πλείστον επαγωγικό ρεύμα ( $I_{\mu}$  περίπου 3 φορές μεγαλύτερο από το  $I_{fe}$ ) το  $I_0$  δημιουργεί γωνία 71.65 μοίρες με την  $V_2$ . Αυτήν την επαγωγική αντίδραση του πυρήνα θα αντισταθμίσουμε με το χωρητικό φορτίο στην επόμενη άσκηση.



### Μεγένθυση στα $I_2$ , $I_1$ , $I_0$

Εδώ βλέπουμε καθαρότερα την πρόσθεση του  $I_0$  (μωβ) στο  $I_2$  (πορτοκαλί) που μας δίνει στο  $I_1$  (πράσινο). Παρατηρούμε ότι το  $I_0$  είναι αρκετά μικρότερο από τα  $I_2$  και  $I_1$ , αλλά η κλίση του επηρεάζει σχετικά την φάση  $\phi_1$ .



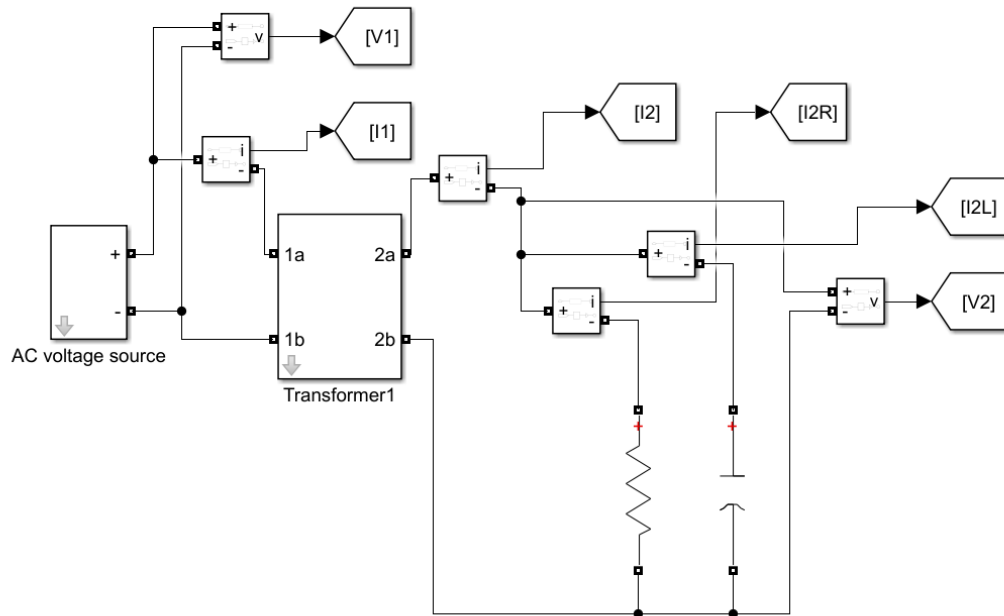


Μεγένθυση στις τάσεις

Εδώ φαίνεται το σύνολο των τάσεων στο ισοδύναμο κύκλωμα:  $V_2$  (γαλάζιο, προς τα κάτω της εικόνας),  $R_2 \cdot I_2$  (πράσινο),  $jX_2 \cdot I_2$  (γαλάζιο),  $E_1$  (κόκκινο),  $R_1 \cdot I_1$  (γαλάζιο),  $jX_1 \cdot I_1$  (κόκκινο),  $V_1$  (μπλε). Παρατηρούμε μικρή διαφορά συνολικά στο μέτρο και την φάση των τάσεων μεταξύ τους.

Χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των διανυσμάτων  $V_1$ ,  $I_1$  μετρούμε το μέτρο του  $I_1 = 16.59$ , μικρότερο του 17.24 που παρατηρήσαμε από τις μετρήσεις και την τάση  $V_1 = 242.73 \text{ V} > 230 \text{ V}$ , δηλαδή μεγαλύτερη των μετρήσεων. Βρίσκουμε επίσης από τις συντεταγμένες των  $V_1$ ,  $I_1$  την γωνία  $\phi_1$  ίση με 23.38 μοίρες μεγαλύτερη της 21.19 που υπολογίζουμε από τις μετρήσεις. Ο λόγος για αυτές τις διαφοροποιήσεις στα μεγέθη είναι κυρίως οι ανακριβείς τιμές των  $I_{fe}$  (εξαιτίας της διαίρεσης της ισχύς  $P_1$  με την τάση  $V_1$ , αντί της  $E_1$ ), και ιδιαίτερα του  $I_\mu$ , καθώς αγνοήσαμε την μεταβαλλόμενη με το ρεύμα μαγνήτισης  $I_\mu$  επαγωγή  $L_h$ . Συνείσφεραν στις αποκλίσεις των μεγεθών του πρωτεύοντος και οι προσεγγιστικές τιμές των  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_{s1}$ ,  $X_{s2}$ .

### 5.4.3 Ωμικό - χωρητικό φορτίο



Το μοντέλο .slx στη simulink

Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με πριν, υπολογίζουμε για αντίσταση  $R = 3.7\Omega$ , την τιμή του  $C = 137.39 \mu\text{F}$ , άρα  $X_C = 23.1683 \Omega$ , δηλαδή το  $|Z_{\text{load}}| = 3.6537 \Omega$ .

Παρατίθενται οι μετρήσεις:

|            |           |
|------------|-----------|
| <b>V1</b>  | 230.00 V  |
| <b>V2</b>  | 116.91 V  |
| <b>I1</b>  | 17.36 A   |
| <b>I2</b>  | 31.99 A   |
| <b>I2R</b> | 31.59 A   |
| <b>I2C</b> | 5.04 A    |
| <b>P1</b>  | 3983.45 W |
| <b>P2</b>  | 3694.18 W |

**Υπολογισμοί:**

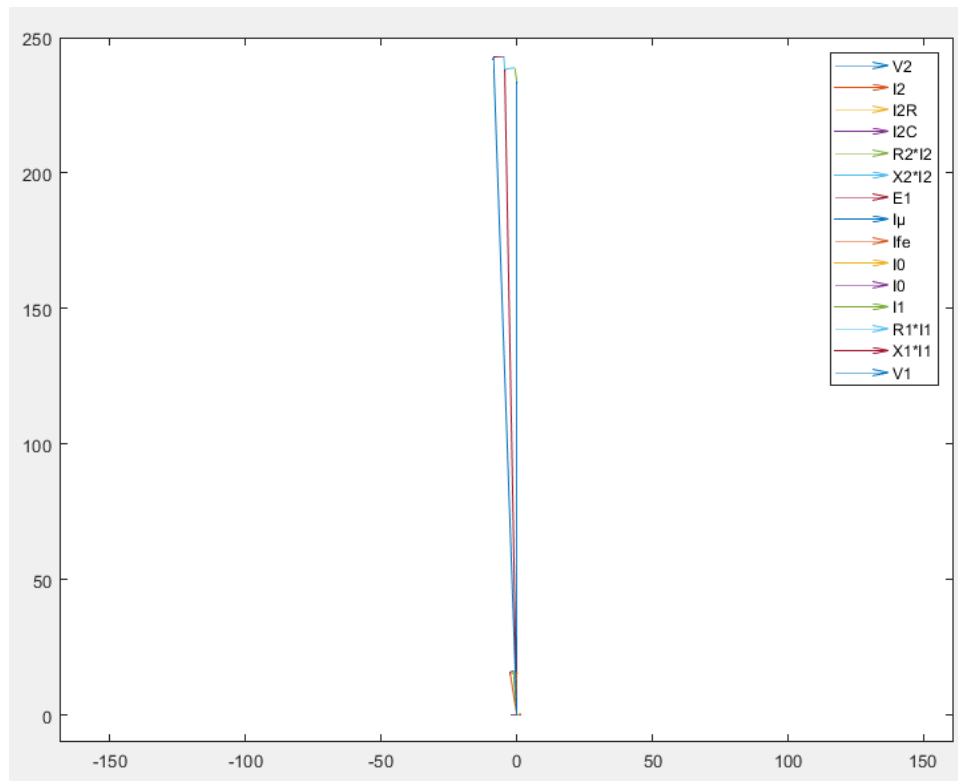
Γωνία φάσης  $\phi_1$ :  $\phi_1 = \arccos\left(\frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}\right) = -3.883^\circ$ ,  $\cos(\phi_1) = 0.9977$   
χωρητικός

Γωνία φάσης  $\phi_2$ :  $\phi_2 = \arccos\left(\frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}\right) = -9.074^\circ$ ,  $\cos(\phi_2) = 0.9874$   
χωρητικός

Παρατηρούμε ότι το χωρητικό φορτίο αντιστάθμισε την επίδραση της εσωτερικής στον πυρήνα επαγωγικής αντίδρασης ως προς το πρωτεύον και μείωσε σημαντικά την γωνία  $\phi_1$ . Η γωνία  $\phi_2$  έγινε αρνητική, αφού τώρα δεξιά της υπάρχει μόνο χωρητικό φορτίο. Στο command window μετά απο πράξεις με τις παραμέτρους του κυκλώματος, βρήκαμε επίσης ότι η Ζολική που βλέπουμε από το πρωτεύον έχει χωρητική συνιστώσα, άρα και η γωνία  $\phi_1$  είναι αρνητική. Και οι δύο συντελεστές ισχύος  $\cos(\phi_1)$  και  $\cos(\phi_2)$  τείνουν πιο κοντά στο 1. Εξίσου σημαντικό για σωστή αντιστάθμιση είναι το ρεύμα  $I_2R$  να είναι αρκετά μεγαλύτερο του  $I_2C$  (άρα και η  $P_2$  αρκετά μεγαλύτερη της  $Q_2$ ), άρα η αντίσταση  $R$  πρέπει να είναι πιο κοντά στο  $|Z_{load}|$  από την  $X_C$ . Για αυτό τον λόγο δώσαμε στην αρχή τιμή της  $R = 3.7 \Omega$ , πιο κοντά στην  $3.6537$  από την  $X_C = 23.1683 \Omega$ .

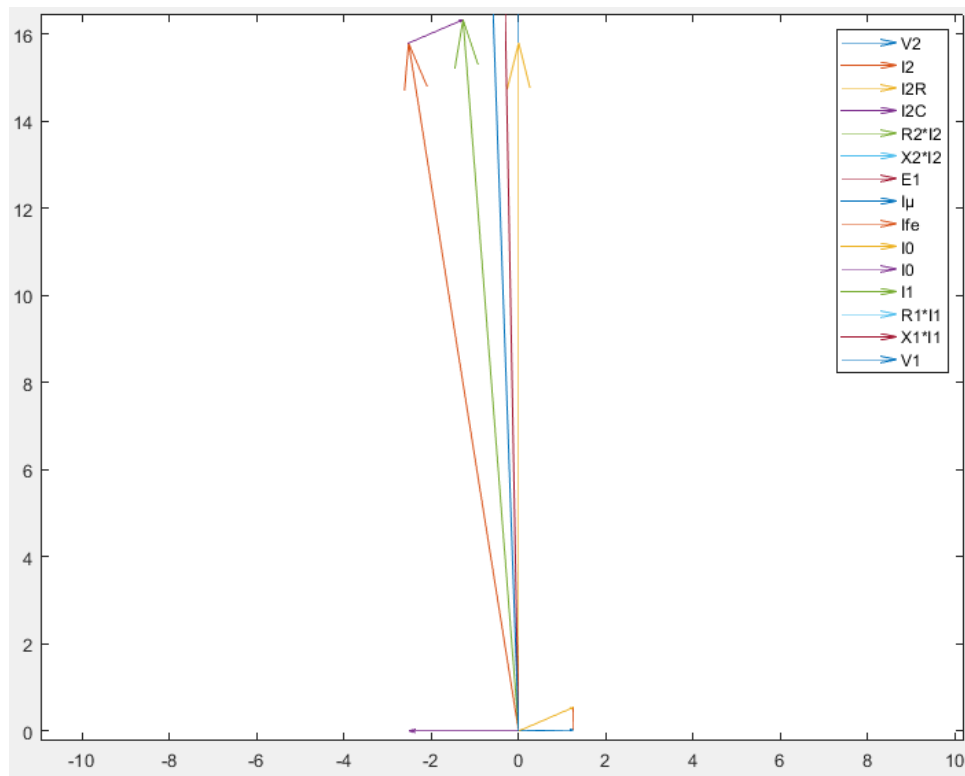
### **Διανυσματικό διάγραμμα:**

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές των εμπεδήσεων για το ισοδύναμο κύκλωμα με πριν και τις αντίστοιχες μετρήσεις των  $V_2$ ,  $I_2$ ,  $\phi_2$ , στον κώδικα που χρησιμοποιήσαμε και στην προηγούμενη άσκηση, σχεδιάζουμε το διανυσματικό διάγραμμα.



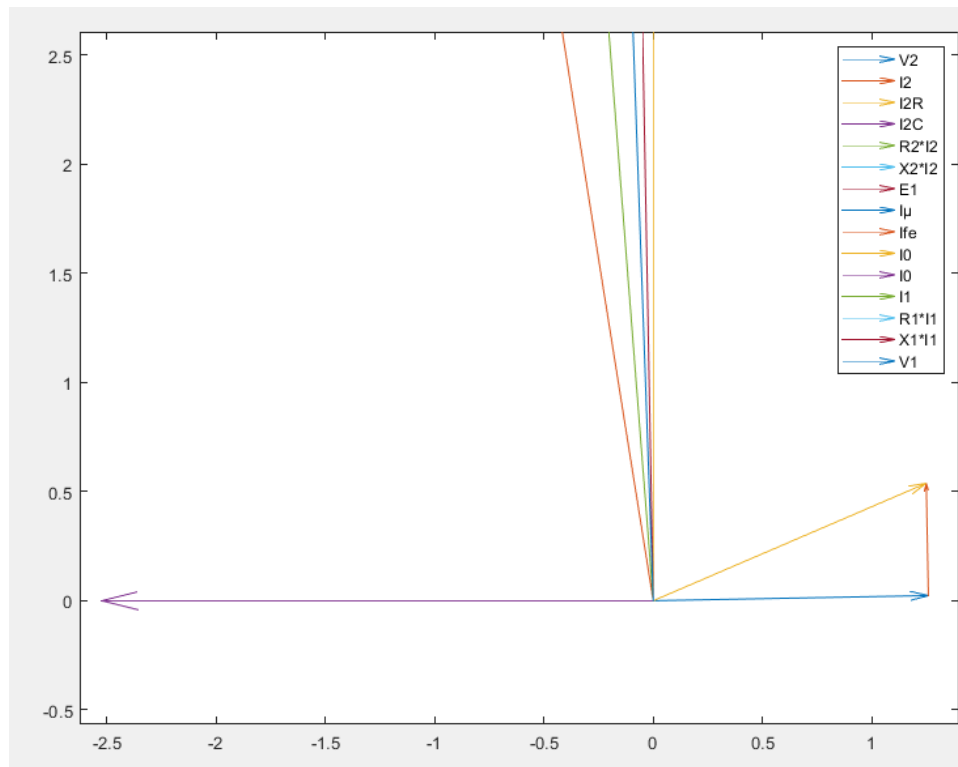
*Συνολικό Διάγραμμα*

Οι τάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τα ρεύματα, άρα πρέπει να μεγενθύνουμε για να τα δούμε ξεκάθαρα, αλλά ήδη βλέπουμε ότι οι τάσεις είναι αρκετά όμοιες σε μέτρο με μικρή διαφορά φάσης μεταξύ τους.



### Μεγένθυση στα ρεύματα

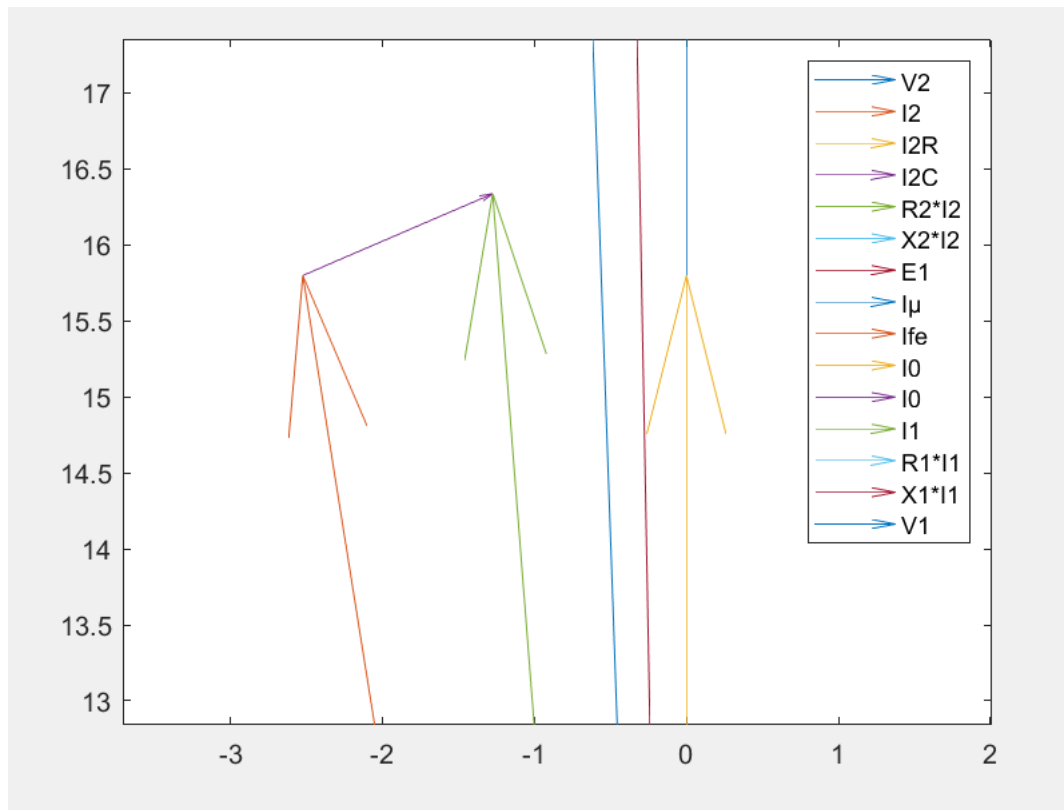
Παρατηρούμε ότι το  $I_{2R}$  (κίτρινο) εφάπτεται πάνω στην  $V_2$  (μπλέ), ενώ το  $I_{2C}$  (μώβ) βρίσκεται κάθετα και αριστερά της. Τα  $I_{2R}$  και  $I_{2C}$  αθροίζονται για να δώσουν το  $I_2$  (πορτοκαλί), το οποίο εμφανίζει αρνητική γωνία  $-9.07$  μοιρών. Προσθέτοντας σε αυτό το  $I_0$  (μώβ), το οποίο έχει συνιστώσα επαγωγικού ρεύματος, παίρνουμε το  $I_1$  (πράσινο) με γωνία  $\phi_1$ , μικρότερη σε μέτρο της  $\phi_2$ .



### Μεγένθυση στο τρίγωνο ρευμάτων ( $I_0$ , $I_\mu$ , $I_{fe}$ )

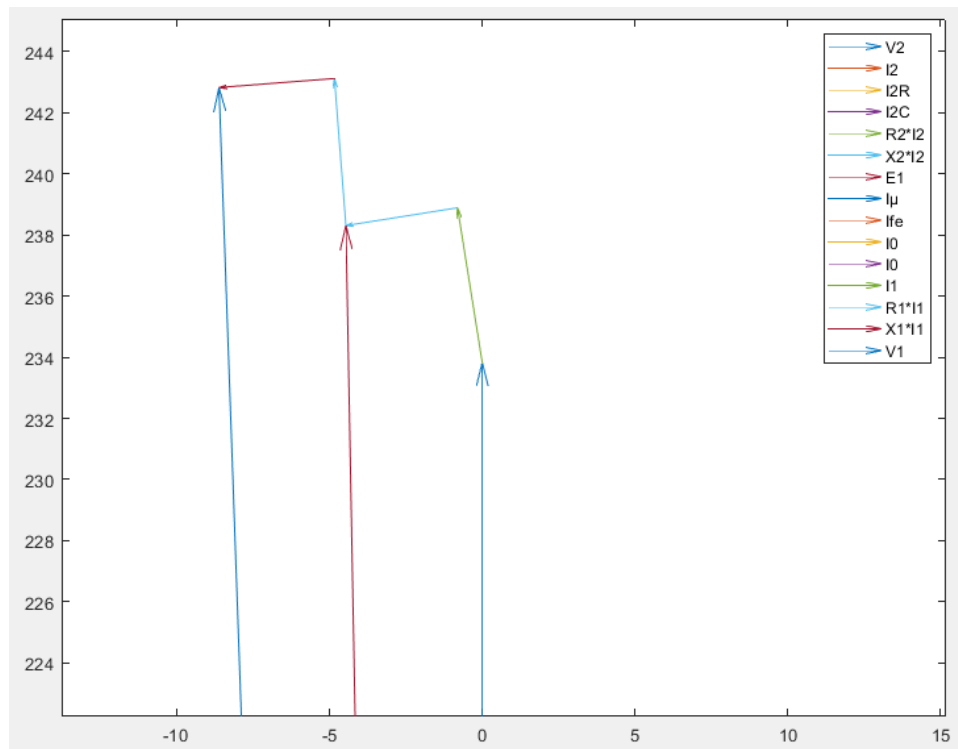
Βλέπουμε το ρεύμα απωλειών σιδήρου  $I_{fe}$  (πορτοκαλί) και το ρεύμα μαγνήτισης  $I_\mu$  (μπλέ), και αθροίζοντάς τα, έχουμε το ρεύμα  $I_0$  (κίτρινο).

Βλέπουμε ταυτόχρονα το χωρητικό ρεύμα φορτίου  $I_{2C}$  (μώβ), και παρατηρούμε ότι αν είχαμε επιλέξει μεγαλύτερη  $X_C$  (και άρα μικρότερη  $R$ ), θα ήταν  $I_{2C} \approx I_\mu$ , και θα είχαμε ακόμα μεγαλύτερο Συντελεστή Ισχύος στο πρωτεύον.



*Μεγένθυση στα  $I_2$ ,  $I_0$ ,  $I_1$*

Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα πως προκύπτει το  $I_1$  από πρόσθεση του  $I_0$  στο  $I_2$ . Παρατηρούμε ότι το  $I_1$  εδώ έχει αρνητική γωνία, αρα η Ζολική που βλέπουμε από το πρωτεύον έχει χωρητική συνιστώσα, όπως είχαμε επιβεβαιώσει και από τις μετρήσεις.



Μεγένθυση στις τάσεις

Εδώ βλέπουμε πως προκύπτει από την  $V_2$  (μπλέ) με πρόσθεση των  $R_2 \cdot I_2$  (πράσινο) και  $jX_2 \cdot I_2$  (γαλάζιο) η τάση  $E_1$  (κόκκινο). Προσθέτουμε στην  $E_1$  τα  $R_1 \cdot I_1$  (γαλάζιο) και  $jX_1 \cdot I_1$  (κόκκινο) για να πάρουμε την  $V_1$  (μπλε).

Χρησιμοποιήσαμε τις συντεταγμένες των  $I_1$  και  $V_1$  για να υπολογίσουμε από το διανυσματικό διάγραμμα τα μέτρα των παραπάνω και την γωνία  $\phi_1$  που σχηματίζεται μεταξύ τους. Το μέτρο του  $I_1$  βρήκαμε να είναι 16.39 μικρότερο του 17.36 που μετρήσαμε στο μόντελο της Simulink, και το μέτρο της τάσης  $V_2$  βρήκαμε να είναι 242.98 μεγαλύτερο του 230 που μετρήσαμε. Την γωνία  $\phi_1$  βρήκαμε  $-2.4281$  μοίρες, που αποκλίνει σχετικά από την τιμή  $-3.883$  που μετρήσαμε, αλλά είναι και αυτή μικρή και αρνητική. Αυτά τα σφάλματα τα αποδίδουμε κυρίως στις ανακριβείς τιμές των  $I_{fe}$  και  $I_m$  (βρίσκουμε το  $I_{fe}$  διαιρώντας την  $P_{fe}$  με  $V_1$  αντί για  $E_1$ , και δεν παίρνουμε υπόψη την μεταβολή της  $L_h$ ), που επηρεάζουν το  $I_1$  μέσω του  $I_0$ , άρα και την  $V_1$ . Συνεισφέρουν στα σφάλματα οι προσεγγιστικές τιμές των εμπεδήσεων του ισοδύναμου κυκλώματος.

## ΑΣΚΗΣΗ 2



## ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ

### 5. Διεξαγωγή της άσκησης

#### Τριφασικός μετασχηματιστής:

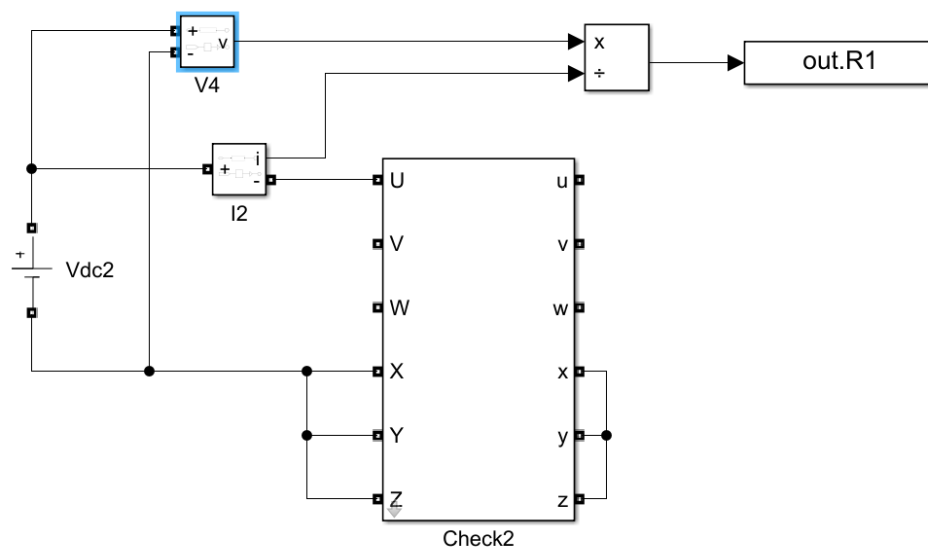
Ονομαστικά μεγέθη: Φασική τάση :  $V_1=230V$   $V_2=115V$

Φαινόμενη ισχύς:  $P_N=12KVA$

#### 5.1 Μετρήσεις ενός τριφασικού μετασχηματιστή

Πραγματοποιούμε την παρακάτω συνδεσμολογία δηλαδή:

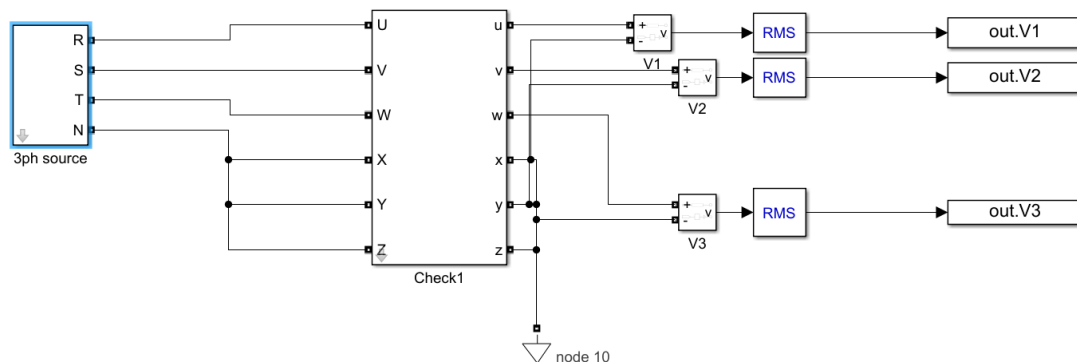
Βραχυκυκλώνουμε στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τα XYZ και xyz μεταξύ τους. Για να μετρήσουμε την αντίσταση του πρωτεύοντος τοποθετούμε στα άκρα UX του πρωτεύοντος μια DC πηγή τάσης 10V και παρεμβάλουμε σε σειρά ένα αμπερόμετρο. Λόγω της DC τάσης δεν έχουμε μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, επομένως δεν έχουμε λειτουργία του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα η διαίρεση της RMS τιμής της τάσης με την αντίστοιχη του ρεύματος να μας δίνει την αντίσταση R1 του πρωτεύοντος (0.2989).



|   |        |
|---|--------|
| 1 | 0.2989 |
|---|--------|

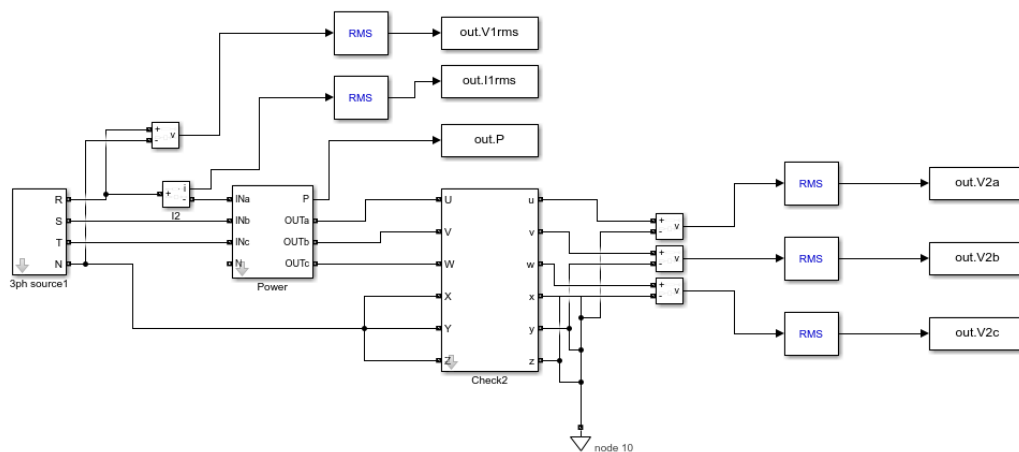
Με παρόμοιο τρόπο προκύπτει για το δευτερεύον  $R2=0.09$ .

B)



Πραγματοποιούμε συνδεσμολογία Υγ για τον τριφασικό μετασχηματιστή (ανοιχτοκυκλωμένο δευτερεύον) και τον τροφοδοτούμε με την τριφασική πηγή τάσης στην οποία δίνουμε πολική τάση 400V ώστε να έχουμε ονομαστική φασική τιμή 230 V. Τοποθετώντας ένα βολτόμετρο στο δευτερεύον(εδώ έχει τοποθετηθεί ένα σε κάθε φάση για να διαπιστωθεί η ισότητα των τάσεων) μετράμε την τάση και υπολογίζουμε τον λόγο  $V1N/V20 = 230/121,35 = 1.89$  όπως και θα περιμέναμε (πολύ κοντά στον λόγο μετασχηματισμού).

## 5.2 Λειτουργία εν κενώ



Με την συνδεσμολογία που βλέπουμε παραπάνω (μετασχηματιστής Υγ,ανοιχτοκυκλωμένο δευτερεύον) παίρνουμε τις ακόλουθες μετρήσεις ( $P_0, I_0, V_{20}$ ) και στη συνέχεια υπολογίζουμε κατάλληλα τις υπόλοιπες ζητούμενες παραμέτρους (ώστε να γίνουν μετά οι γραφικές παραστάσεις).

Το βαττόμετρο υπολογίζει απευθείας την τριφασική ισχύ  $P_0$ .

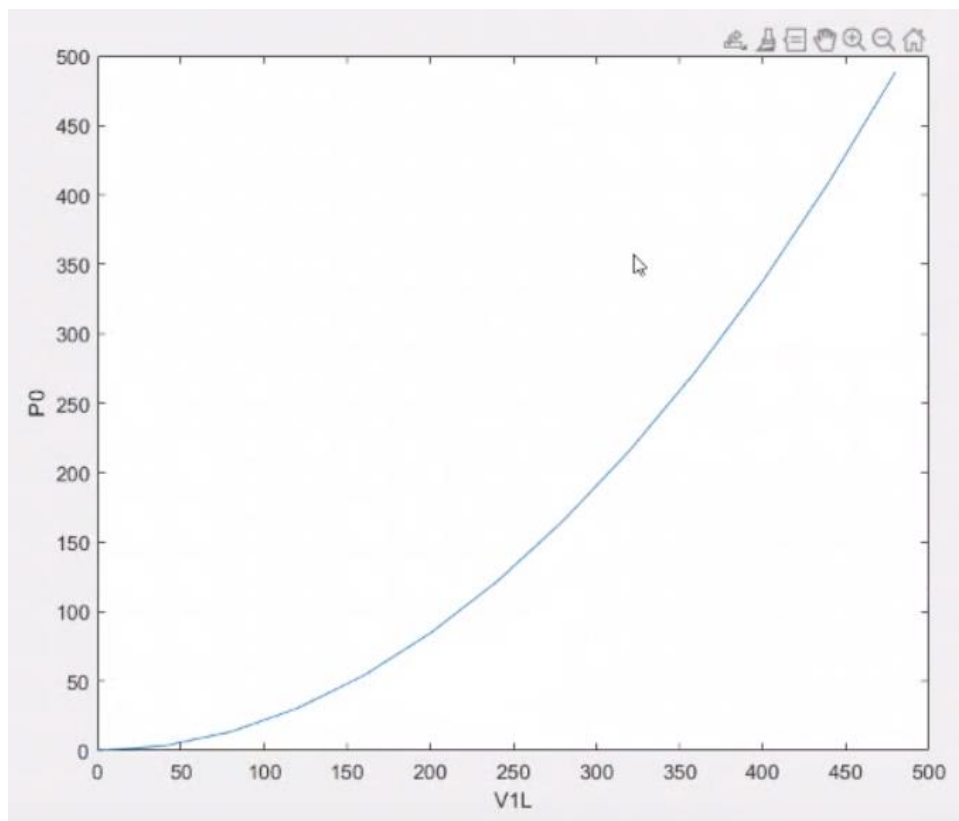
Υπολογίσαμε το  $\cos\phi_0$  από την σχέση  $\cos\phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_0}$  και τις απώλειες σιδήρου από τη σχέση  $P_{fe} = P_0 - 3 \cdot R \cdot I_1^2$  όπου  $R=0.298$

| $P_0(W)$        | $I_0(A)$      | $V_{1L}(\text{πολική})$ | $\cos\phi_0$  | $V_{20}(V)$     | $P_{fe}(W)$     |
|-----------------|---------------|-------------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 0               | 0             | 0                       | 0             | 0               | 0               |
| 3.3763          | 0.0873        | 40                      | 0.5582        | 21.1050         | 3.3695          |
| 13.5061         | 0.1745        | 80                      | 0.5585        | 42.2099         | 13.4789         |
| 30.3594         | 0.2618        | 120                     | 0.5579        | 63.3146         | 30.2981         |
| 54.0079         | 0.3490        | 160                     | 0.5584        | 84.4196         | 53.8990         |
| 84.3999         | 0.4364        | 200                     | 0.5582        | 105.9247        | 84.2296         |
| 121.4650        | 0.5236        | 240                     | 0.5580        | 126.6296        | 121.2199        |
| 165.3230        | 0.6109        | 280                     | 0.5580        | 147.7344        | 164.9893        |
| 215.9380        | 0.7003        | 320                     | 0.5563        | 168.8342        | 215.5000        |
| 273.2530        | 0.8036        | 360                     | 0.5453        | 189.9314        | 272.6757        |
| <b>337.6050</b> | <b>0.9669</b> | <b>400</b>              | <b>0.5040</b> | <b>211.0278</b> | <b>336.7692</b> |
| 409.1990        | 1.3767        | 440                     | 0.39          | 232.1831        | 407.5046        |
| 488.4250        | 2.1612        | 480                     | 0.27          | 253.0145        | 484.2493        |

Πίνακας 4. Μετρήσεις τριφασικού MT εν κενώ

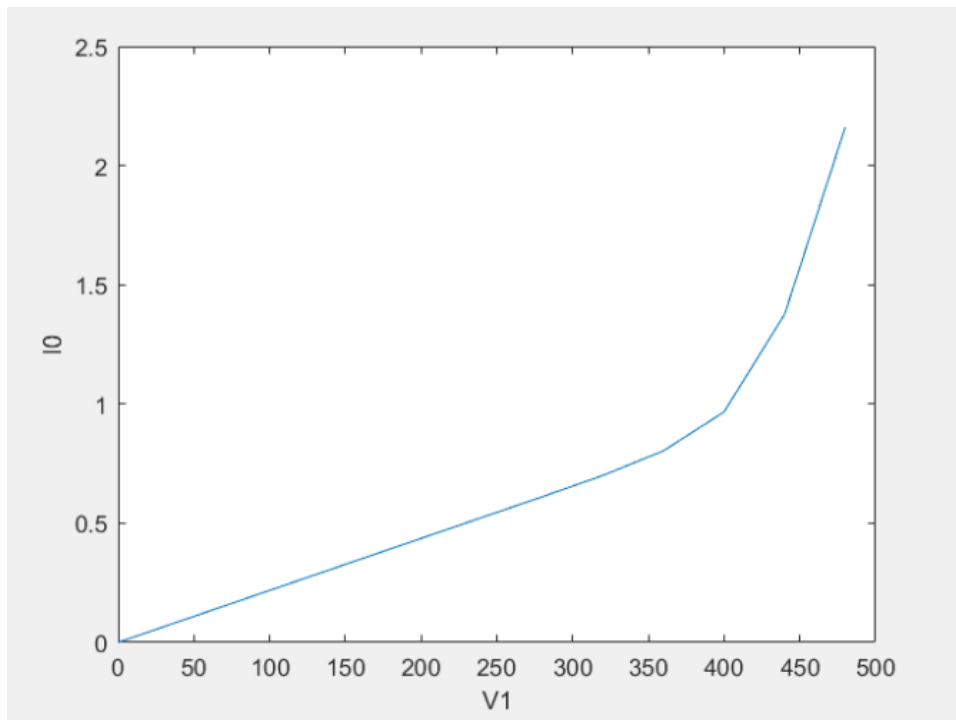
Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούμε ότι όταν αυξήσουμε την τάση πάνω από την ονομαστική της τιμή ο πυρήνας οδηγείται στον κόρο (κόρος βρόχου υστέρησης) και επομένως παρατηρούμε μεγαλύτερη αύξηση του ρεύματος (εκθετική) σε σχέση με πριν (γραμμική) για ίδια αύξηση της τάσης(άρα και της μαγνητικής ροής) απότομη πτώση του συντελεστή ισχύος και πιο απότομη αύξηση των απωλειών πυρήνα. Οι απώλειες σιδήρου είναι πολύ κοντά στην τιμή της ισχύος  $P_0$  λόγω της πολύ μικρής αντίστασης τυλιγμάτων.

Τα προαναφερθέντα επιβεβαιώνονται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν:



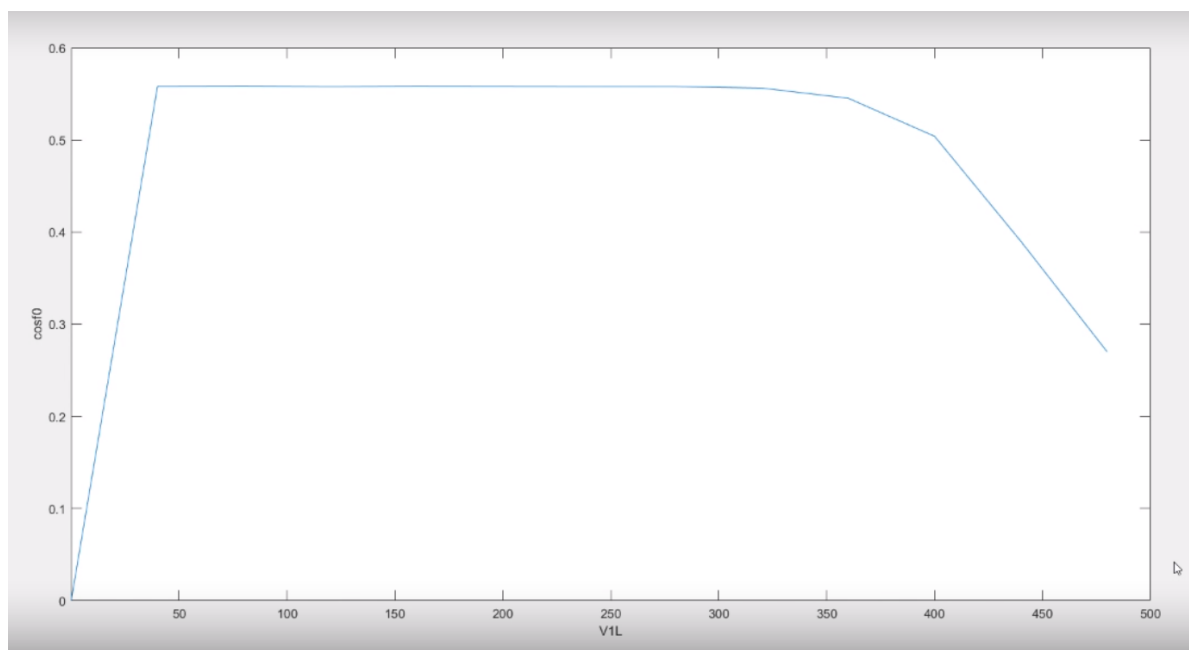
**Διάγραμμα  $P_0=f(V_{1L})$**

Όπως και θα περιμέναμε παρατηρούμε την τετραγωνική εξάρτηση της ισχύος από την τάση



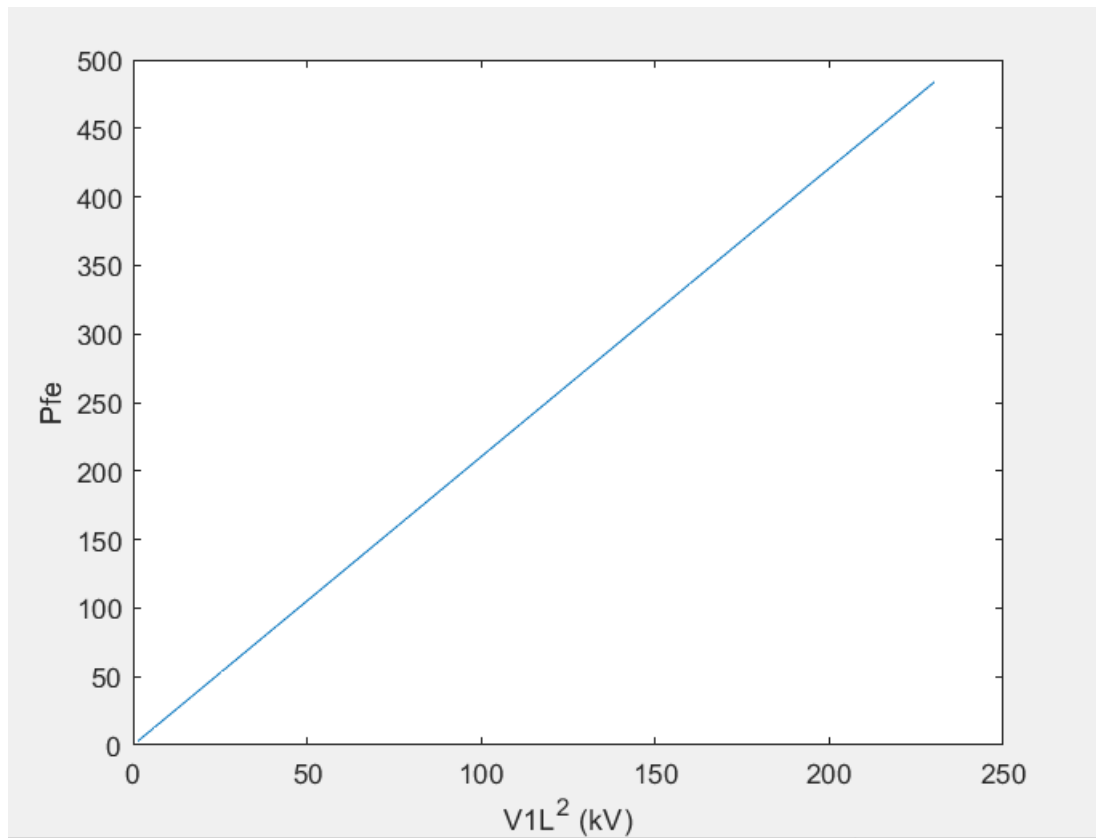
**Διάγραμμα  $P_0=f(V_1L)$**

Όπως και θα αναμέναμε το ρεύμα μεταβάλλεται αρχικά γραμμικά με την τάση μέχρι το σημείο κορεσμού του μετασχηματιστή όπου παρουσιάζει εκθετική αύξηση.



**Διάγραμμα  $\cos\phi=f(V_1L)$**

Παρατηρούμε την απότομη πτώση λόγω του ότι ο μετασχηματιστής οδηγείται στο κόρο.



**Διάγραμμα  $P_{fe}=f(V1L)$**

Παρατηρούμε την γραμμική σχέση μεταξύ των απωλειών σιδήρου και του τετραγώνου της τάσης

Θεωρούμε αμελητέες την σκέδαση και τις απώλειες των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή.

Εφαρμόζουμε τάση  $V1$  στα άκρα της  $R_{fe}$  και ισχύει η σχέση:  $P_{fe} = \frac{V1^2}{R_{fe}}$

Έχουμε μονοφασικό ισοδύναμο, άρα  $P_{fe} = 336.7692/3 = 112,2564$  και

$$V1 = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230V.$$

$$\text{Επομένως, } R_{fe} = \frac{V1^2}{P_{fe}} = 471,24262 \Omega$$

$$\text{Για το ρεύμα ισχύει: } I_{fe} = \frac{V1}{R_{fe}} = 0.4860 A$$

Ισχύει ότι :  $I_0 = 0.9669 = \sqrt{I_{fe}^2 + I_{\mu}^2}$  άρα  $I_{\mu} = 0,8359 A (<1)$

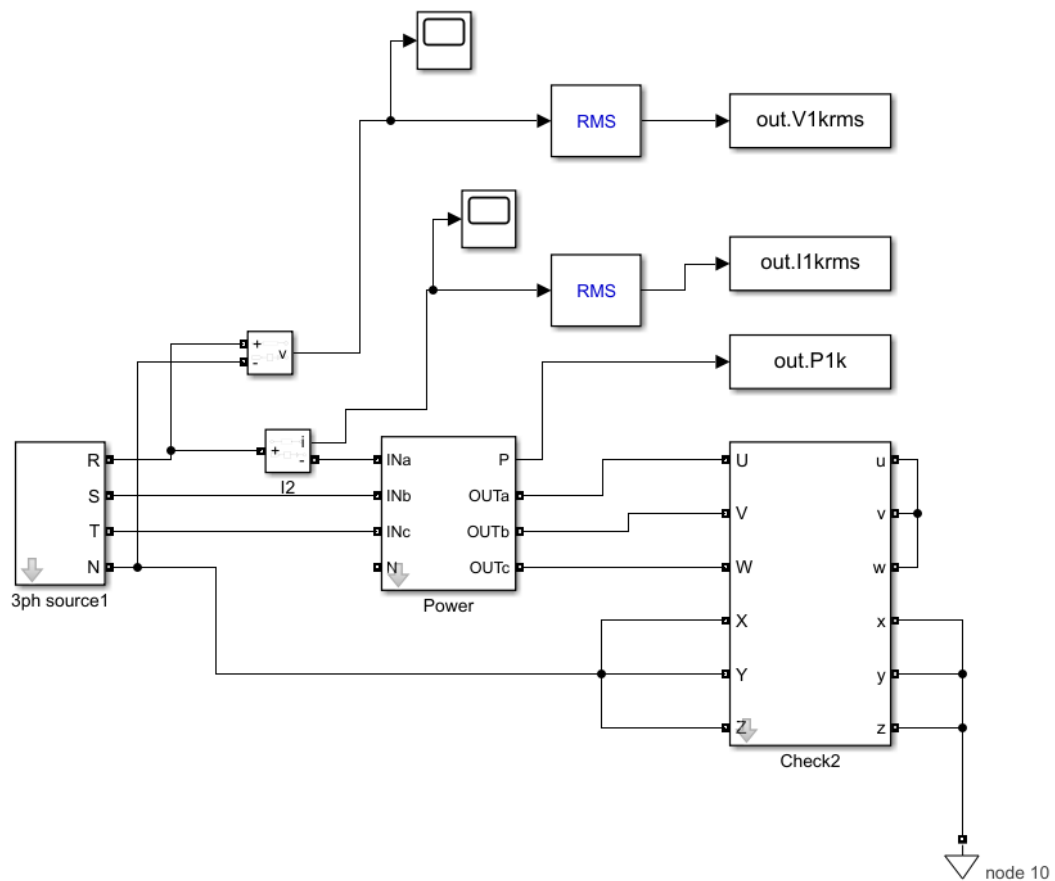
$$I_{\mu} = \frac{V_1}{X_h} \Rightarrow X_h = 275,15 \Omega$$

$$\omega L_h = X_h \Rightarrow L_h = X_h / 2 * \pi * f = 0,8758 H. \text{ όπου } f = 50 \text{ Hz.}$$

### 5.3 Βραχυκυκλώματα

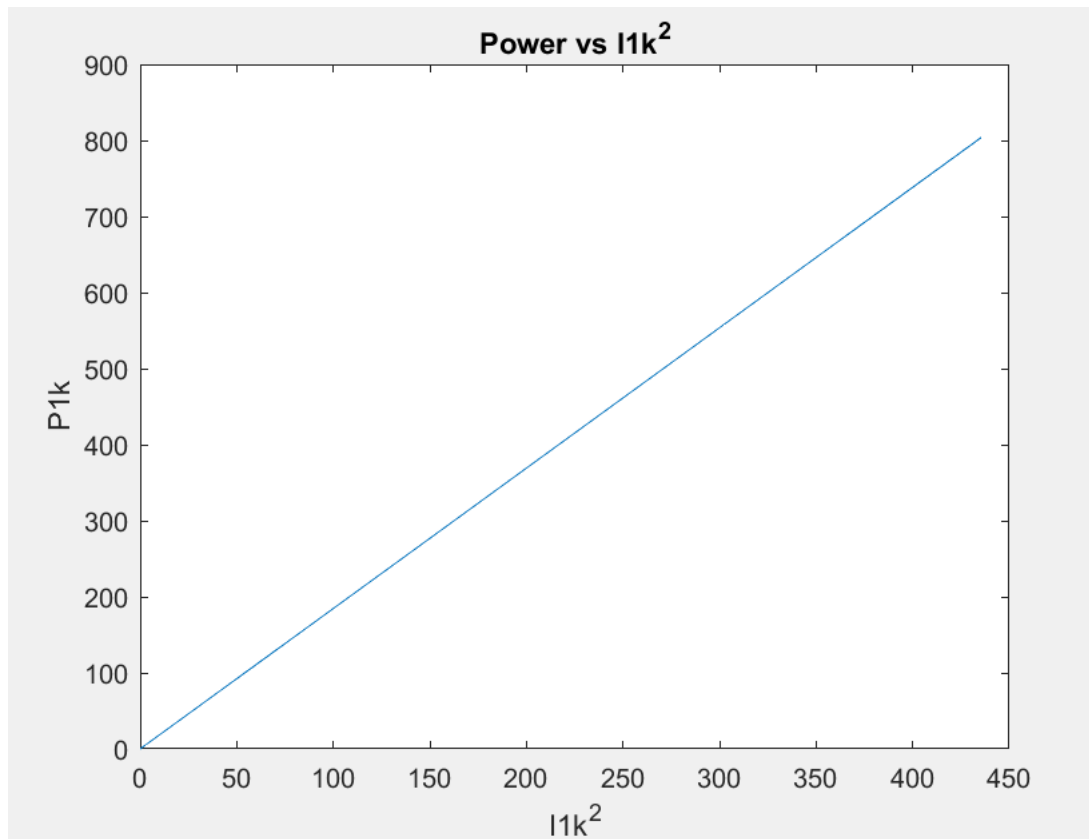
Πραγματοποιούμε την παρακάτω συνδεσμολογία βραχυκυκλώνοντας το δευτερεύον ,υπολογίζουμε όπως και στην μονοφασική περίπτωση την εμπέδηση  $Z_{1k}=0.7697$  και το ονομαστικό ρεύμα  $I_{1N}=1200/2/(230)=17.39A$  και μεταβάλλουμε την τάση της μέχρι η φασική της τιμή να είναι  $17.39*0.7697*1.2=16.0632V$ . Παίρνουμε τελικά τις παρακάτω μετρήσεις.

| V1k     | I1k     | P1k      |
|---------|---------|----------|
| 0       | 0       | 0        |
| 1.3386  | 1.7391  | 5.5829   |
| 2.6772  | 3.4783  | 22.3316  |
| 4.0158  | 5.2175  | 50.2462  |
| 5.3545  | 6.9565  | 89.3265  |
| 6.6930  | 8.6958  | 139.5727 |
| 8.0316  | 10.4348 | 200.9847 |
| 9.3703  | 12.1742 | 273.5625 |
| 10.7087 | 13.9131 | 357.3061 |
| 12.0476 | 15.6524 | 452.2156 |
| 13.3859 | 17.3915 | 558.2909 |
| 14.7248 | 19.1306 | 675.5318 |
| 16.0632 | 20.8699 | 803.9387 |



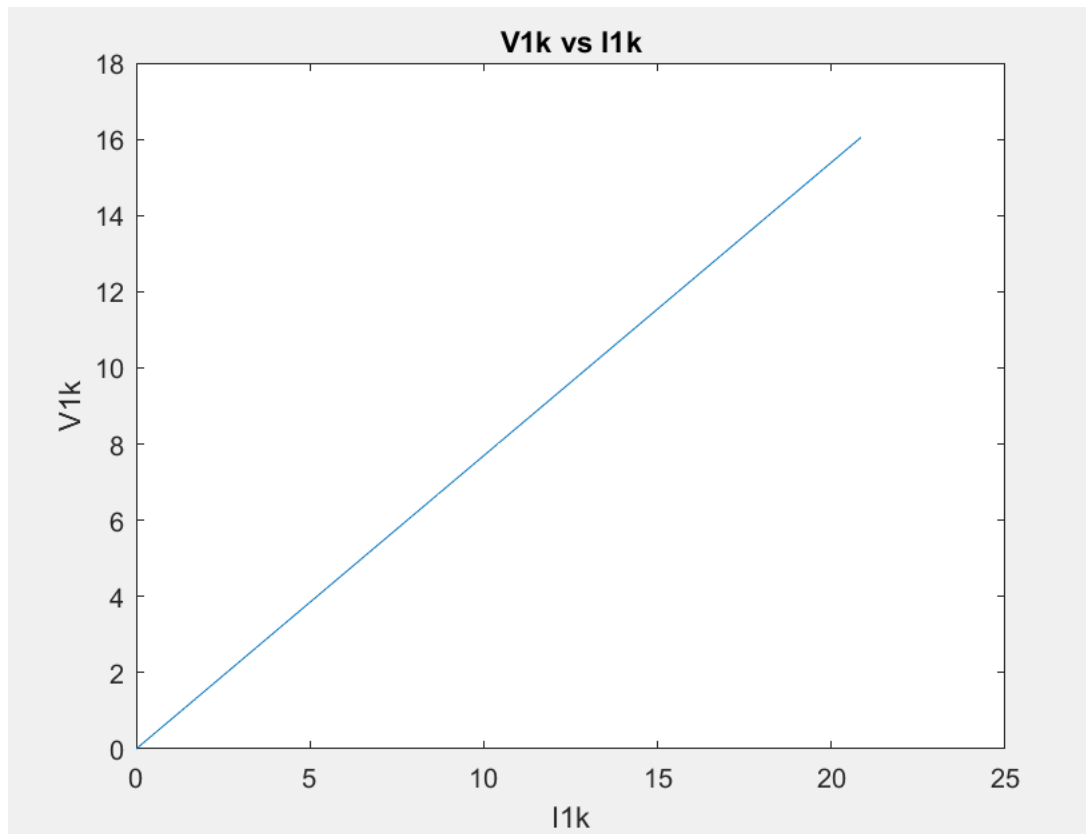
Συνδεσμολογία στο *slx*





Διάγραμμα  $P_{1k}=f(I_{1k}^2)$

Παρατηρούμε γραμμική σχέση όπως και θα αναμέναμε από τον τύπο της ισχύος



Διάγραμμα  $V1K=f(I1k)$

Η αντίσταση  $Z1k$  μένει σταθερή (εφόσον  $I_m < 1\text{ A}$ ) άρα η  $V1$  αυξάνεται γραμμικά με το  $I1$ .

Υπολογισμοί:

$$\text{Ωμική αντίσταση } Rk = \frac{P1k}{3I1k^2} = 0.61527 \Omega$$

$$\text{Επαγωγική αντίδραση : } Xk = \frac{Q1k(1ph)}{I1k^2}, \text{ όπου } Q1k(1ph) = \sqrt{(V1k * I1K)^2 - (P1k/3)^2} = 139.8733, \text{ άρα } Xk = 0.46245 \Omega$$

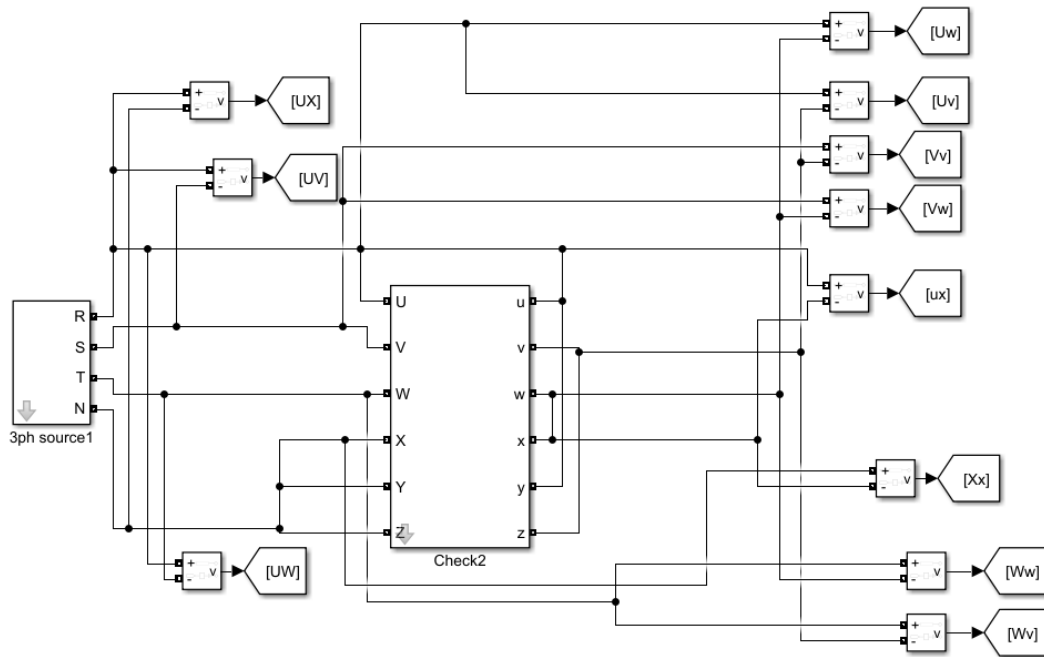
$$\text{Μιγαδική Εμπέδηση: } Z1k = R1k + jX1k, |Z1k| = 0.7697\Omega$$

$$\text{Σχετική ωμική πτώση τάσης: } \frac{URk}{U1N} = \frac{Rk * I1N}{U1N} = 0.04652$$

$$\text{Σχετική επαγωγική πτώση τάσης: } \frac{UXk}{U1N} = \frac{j * Xk * I1N}{U1N} = 0.03497$$

Σχετική τάση βραχυκύκλωσης:  $u_{1k} = \frac{Z_{1k} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = 0.05820$

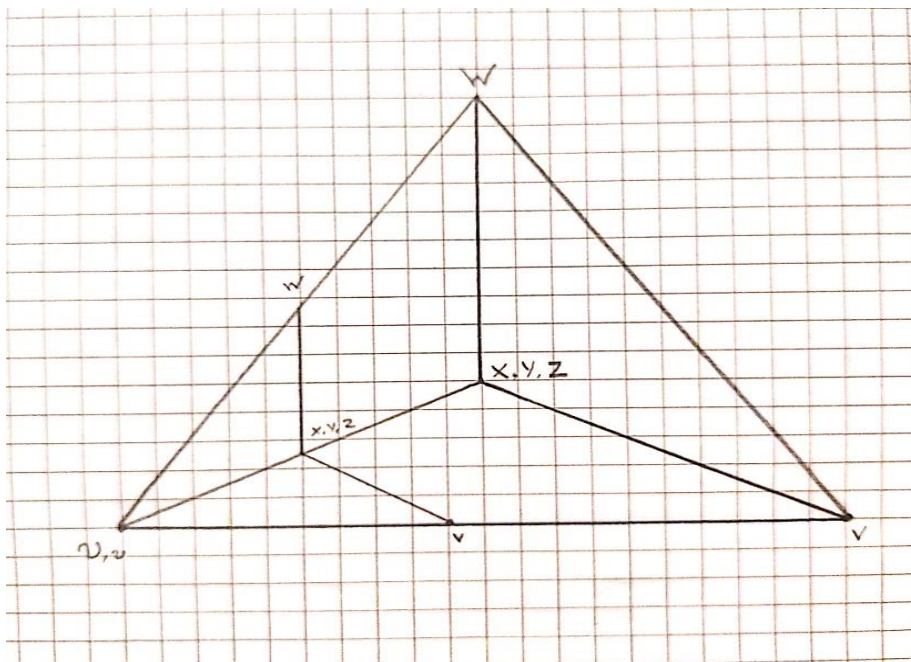
## 5.5 Προσδιορισμός ομάδας συνδεσμολογίας



Το μοντέλο .slx της simulink

|            | $V_{UX}$ | $V_{UV}$ | $V_{UW}$ | $V_{ux}$ | $V_{Vv}$ | $V_{Vw}$ | $V_{Uv}$ | $V_{Uw}$ | $V_{Wv}$ | $V_{Ww}$ | $V_{Xx}$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\gamma_y$ | 230.1    | 398.4    | 398.5    | 230.1    | 108.1    | 310.3    | 309.6    | 308.6    | 309.5    | 108.3    | 0.0      |
| $\gamma_d$ | 229.9    | 398.2    | 398.4    | 122.3    | 298.8    | 297.6    | 122.2    | 122.3    | 416.7    | 300.3    | 107.9    |

Για τον προσδιορισμό της ομάδας συνδεσμολογίας , ακολουθούμε επακριβώς τα βήματα που περιγράφονται αναλυτικά στο θεωρητικό κομμάτι της εργαστηριακής άσκησης των τριφασικών μετασχηματιστών.

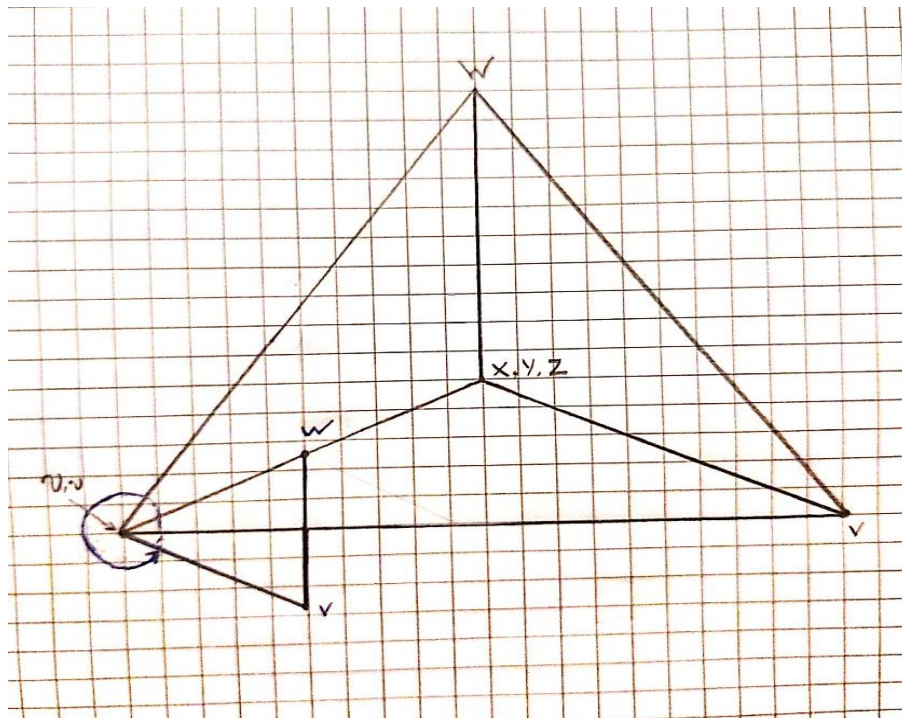


Σχ.Α

Επιλέγοντας τα διανύσματα  $UV, uv$  πως η γωνία μεταξύ τους είναι ίση με :

$\Phi_1 = (UV, uv) = 0^\circ$  . Συνεπάγεται , λοιπόν , πως ο χαρακτηριστικός αριθμός είναι ίσος με 0 ( αφού  $(\Phi_1/30^\circ) = 0$ ).

Επομένως, έχουμε συνδεσμολογία τύπου **Υγ0** .



Σχ.Β

Ομοίως , για το δεύτερο σχήμα παρατηρούμε για τα ίδια διανύσματα πως η γωνία μεταξύ τους είναι :

$\phi_2 = (UV, uv) = 330^\circ$  . Άρα το χαρακτηριστικός αριθμός είναι ίσος με :  $(330/30) = 11$ .

Επομένως , έχουμε συνδεσμολογία : **Yd11**