

# Cours de Machines Electriques

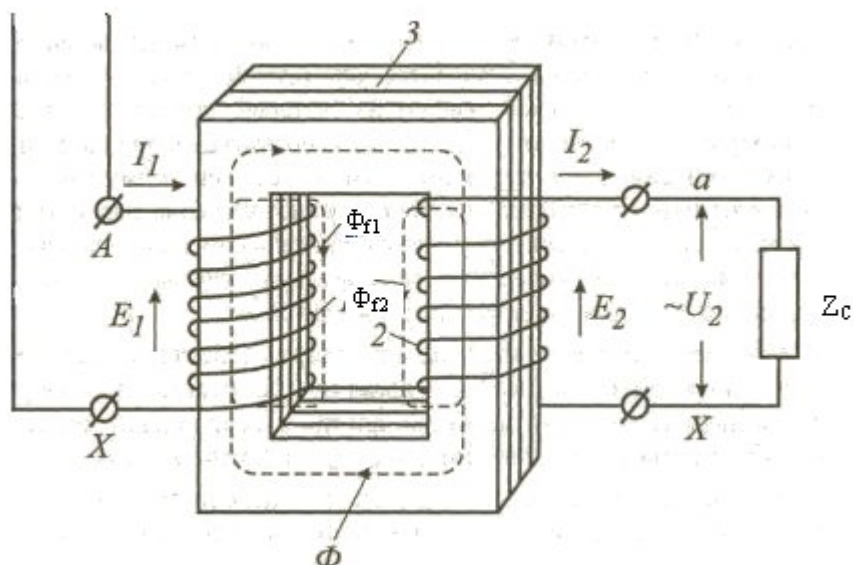
## Chapitre 1 : Transformateurs

### 1. Transformateurs monophasés

#### 1.1. Principe de fonctionnement des transformateurs monophasés

Il existe plusieurs sortes de transformateurs (voir cours de transformateurs), mais l'essence physique de leur principe de fonctionnement reste la même. La figure 1.1 représente le schéma électromagnétique du transformateur généralisé, qui constitue la base de l'analyse de n'importe quel transformateur.

Deux enroulements (primaire de nombre de spires  $w_1$  et secondaire -  $w_2$ ) sont disposés sur le noyau magnétique. Le primaire est branché sur une source de



*Fig. 1.1 : Le schéma électromagnétique du transformateur généralisé*

tension  $u_1$ , sur le secondaire – la charge. Les courants qui circulent dans les enroulements créent :

Le flux magnétique principal  $\Phi$ , qui joue le rôle de transmetteur d'énergie du primaire au secondaire ;

Le flux de fuite du primaire  $\Phi_{f1}$ , qui s'embrasse seulement avec l'enroulement primaire et se ferme en général dans l'air ;

Le flux de fuite du secondaire  $\Phi_{f2}$ , qui s'embrasse seulement avec le secondaire et se ferme aussi dans l'air.

## 1.2. Fonctionnement à vide des transformateurs monophasés

Pour éclaircir l'essence physique des phénomènes qui se passent au sein du transformateur, analysons d'abord son fonctionnement à vide, quand le courant dans le secondaire est égal à zéro (la charge non connectée). L'alimentation du secondaire du transformateur par une tension sinusoïdale y provoque la circulation d'un courant. Sous l'action du flux magnétique, une f.e.m. d'auto-induction s'induit dans les deux enroulements. Sous la tension sinusoïdale  $u_1 = U_{m1} \sin 2\pi ft$  la forme de la courbe du flux magnétique dans le noyau magnétique peut être aussi considérée comme sinusoïdale. La forme de la courbe du courant prend un aspect rétréci et étroit à cause de la saturation du circuit magnétique et montre la présence de la troisième harmonie, l'amplitude de laquelle peut atteindre 15 à 30% de l'amplitude de la première harmonie. Pour appliquer la méthode symbolique dans les calculs des transformateurs, il est nécessaire de remplacer la forme réelle du courant par la forme sinusoïdale équivalente. La valeur efficace de la sinusoïde équivalente est égale celle du courant, et le déphasage de cette sinusoïde équivalente relativement à la tension appliquée dépend des pertes dans le circuit magnétique.

Il est important de souligner, que le régime à vide permet de déterminer les paramètres importants pour la pratique tels que : le coefficient de transformation, les pertes dans le circuit magnétique, la résistance inductive du contour d'alimentation.

Le flux de fuite (fig. 1.1) est en phase avec le courant du transformateur et le flux magnétique principal est un peu en retard de phase sur le courant à cause des pertes dans le circuit magnétique. C'est pour cela, en appliquant la deuxième loi de Kirchhoff, on peut écrire pour le régime à vide :

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_{10} + jx_{f1} \dot{I}_{10} \quad (1.1)$$

Où  $\dot{U}_1, \dot{E}_1, \dot{I}_{10}$  - les complexes de la tension d'alimentation, de f.e.m. et du courant équivalent de l'enroulement primaire ;

$R_1, x_{f1}$  - les résistances active et inductive de fuite. En régime à vide la chute de tension sur les résistances active et inductive est faible comparativement à la f.e.m. c'est pour cela l'équation (1.1) peut s'écrire sous la forme

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 \quad (1.2)$$

Le diagramme vectoriel tracé sur la base de l'équation (1.2) est représenté sur la figure 1.2

En divisant le vecteur courant  $\dot{I}_{10}$  en deux composantes :  $\dot{I}_\mu$  - le vecteur courant d'aimantation du transformateur crée la circulation du flux magnétique  $\dot{\Phi}_m$  dans le circuit magnétique et le vecteur courant  $\dot{I}_a$  - prend en compte les pertes actives en hystérésis et en courant de Foucault dans le circuit magnétique. Dans ce cas le schéma équivalent est représenté sur la fig.1.3 a. Sur ce schéma, le transformateur est représenté seulement comme un convertisseur idéal de f.e.m. Le coefficient de transformation se calcule de la manière suivante :

En considérant la liaison entre la f.e.m. d'auto-induction  $e(t)$  et le flux magnétique  $\Phi(t)$ , on trouve facilement l'équation des f.e.m. de transformation sur le primaire et le secondaire. La valeur effective de ces f.e.m. est égale à

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= 4.44 w_1 f \Phi_m = 4.44 w_1 f B_m S, \\ \dot{E}_2 &= 4.44 w_2 f \Phi_m = 4.44 w_2 f B_m S, \end{aligned} \quad (1.3)$$

Où  $w_1, w_2$  le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire,  $S$  – la section transversale du noyau magnétique du transformateur et  $f$  – la fréquence du réseau d'alimentation.

Le rapport de la f.e.m. HT sur la f.e.m. BT est appelé coefficient de transformation

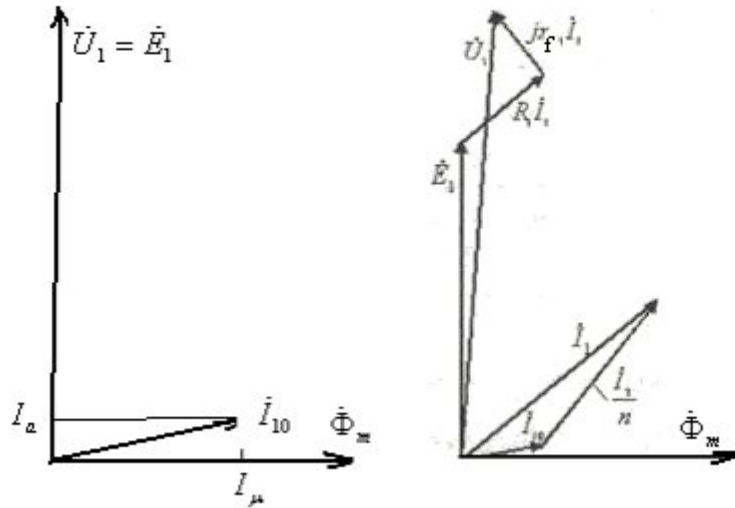


Fig. 1.2. Diagrammes vectoriels du transformateur

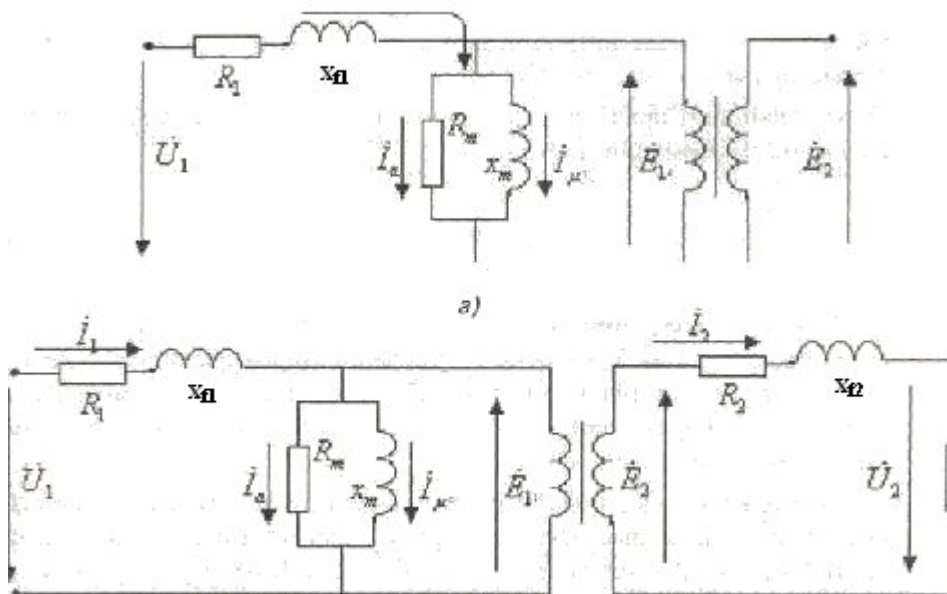
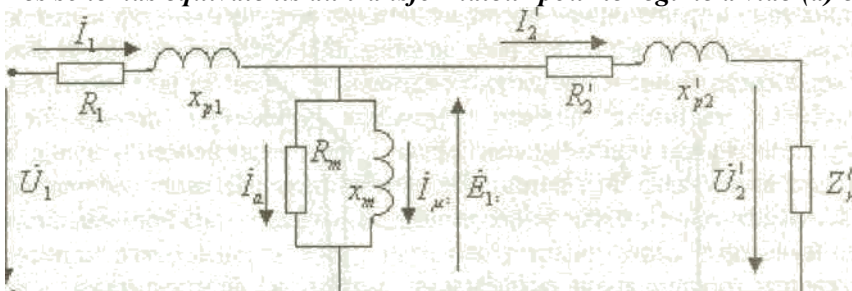


Fig. 1.3. Les schémas équivalents du transformateur pour le régime à vide (a) et en charge (b)



**Fig. 1.3. (Fin) Schéma équivalent réduit du transformateur (c)**

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (1.4)$$

En régime à vide le courant dans le primaire peut atteindre 3 – 10% (pour les transformateurs de moyenne et de grande puissance) du courant nominal. C'est pour cela la puissance mesurée sur le circuit primaire, correspond pratiquement aux pertes dans le noyau magnétique du transformateur.

Dans les transformateurs de petite puissance le courant à vide peut atteindre 10 - 60% du courant nominal. Dans ce cas la puissance à vide reflète non seulement les pertes dans le noyau magnétique, mais aussi et les pertes dans la résistance active du primaire du transformateur.

Sous une tension d'alimentation sinusoïdale les pertes dans le circuit magnétique peuvent être considérées approximativement proportionnelles à la fréquence à la puissance 1.25 et à l'induction à la puissance 2. Les paramètres du régime à vide : la tension nominale, le courant et la puissance ( $U_1, I_{10}, P_{10}$ ) figurent dans le recueil de caractéristiques du transformateur. En se servant de ces données, on peut calculer les paramètres du schéma équivalent (fig. 1.3 a) nécessaires pour l'analyse du transformateur.

$$R_0 = \frac{U_1}{I_{10} \cos \varphi_0}, x_0 = \frac{U_1}{I_{10} \sin \varphi_0}, \varphi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 I_{10}} \quad (1.5)$$

### 1.3. Fonctionnement en charge des transformateurs monophasés

Si on branche la charge  $Z_c$  à l'enroulement secondaire du transformateur, la f.e.m.  $E_2$  crée un courant  $I_2$  dans le circuit du secondaire. Comme le transformateur commence à fournir à la charge une certaine puissance, alors la puissance consommée du réseau augmente, c'est à dire qu'au courant  $I_{10}$  s'ajoute un certain courant complémentaire  $I_k$ , appelé courant de compensation. Dans ce cas le courant du primaire sera égal à

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_k \quad (1.6)$$

La valeur du courant de compensation peut être obtenue à partir des hypothèses suivantes : la puissance électromagnétique du transformateur idéal se transmet complètement du primaire au secondaire, c'est ainsi que

$$E_1 I_k = E_2 I_2 = \frac{E_1}{n} I_2 \quad (1.7)$$

De l'équation (1.7) on obtient le courant de compensation

$$\dot{I}_k = \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{\dot{I}_2}{n} \quad (1.8)$$

Le schéma équivalent du transformateur pour le régime en charge (fig. T1.3 b) sera différent de celui du régime à vide, seulement par des paramètres du secondaire et la résistance de la charge du transformateur. Ainsi, pour décrire mathématiquement le transformateur, il est nécessaire d'ajouter aux équations (1.1 – 1.6) l'équation obtenue par la deuxième loi de Kirchhoff pour le circuit secondaire. Ainsi le système complet des équations se présente sous la forme

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jx_{f1} \dot{I}_1, \\ \dot{E}_2 &= R_2 \dot{I}_2 + jx_{f2} \dot{I}_2 + \dot{U}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \frac{\dot{I}_2}{n}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

L'étude du transformateur (analytique ou expérimentale) se simplifie considérablement, si le transformateur réel avec ses enroulements liés magnétiquement est remplacé par un transformateur équivalent dont les nombres de spires du primaire et du secondaire sont égaux. Dans ce cas les rapports énergétiques dans le transformateur restent invariants.

Il n'est pas difficile de transformer les deux dernières équations du système (9) tout en tenant compte de (4)

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jx_{f1} \dot{I}_1, \\ \dot{E}_1 &= R'_2 \dot{I}'_2 + jx_{f2} \dot{I}'_2 + \dot{U}'_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + I'_2. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Les paramètres du transformateur équivalent et du transformateur réel sont liés par les expressions :

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + I'_2; I'_2 = \frac{I_2}{n}; R'_2 = n^2 R_2; x'_{f2} = n^2 x_{f2}; Z'_N = n^2 Z_N \quad (1.11)$$

Le schéma équivalent réduit du transformateur est représenté sur la fig. 1.3 c et le diagramme vectoriel sur la fig. 1.2 b. Le nombre de spires de ses deux enroulements est le même, ce qui permet de les unifier. A travers cet enroulement circule le courant d'aimantation qui est à la cause de la formation du flux magnétique qui circule dans le noyau magnétique du transformateur.

La puissance active qui apparaît dans le contour d'aimantation se détermine par les pertes dans le noyau magnétique du transformateur.

Les paramètres du circuit équivalent réduit sont déterminés d'une façon relativement simple à partir des régimes à vide et de court-circuit. A l'aide du schéma réduit, on peut déterminer les principales caractéristiques du transformateur.

Le régime à vide du transformateur ne permet pas de déterminer tous les paramètres de son schéma équivalent. C'est pour cela, une fois la fabrication terminée l'usine fabricante effectue des essais de court-circuit « normal » sur les transformateurs.

#### 1.4. Régime de court-circuit « normal » des transformateurs monophasés

Dans ce cas l'enroulement secondaire est court-circuité, et on alimente le primaire sous tension  $U_k$ . La valeur de cette tension est fixée de telle sorte que le courant du primaire soit nominal. La grandeur de la tension  $U_k$  ne dépasse pas 10 – 20% même pour les transformateurs de faible puissance. En prenant compte de la dépendance du flux magnétique de la tension, appliquée à l'enroulement primaire et la dépendance des pertes dans le noyau magnétique du transformateur du carré du flux magnétique, on peut conclure qu'en régime de court-circuit normal on peut négliger les pertes dans le noyau et considérer les indications du wattmètre branché à l'entrée du transformateur comme la puissance des pertes dans les résistances actives de celui-ci. Cela nous permet de déterminer les paramètres du schéma équivalent réduit du transformateur par les expressions :

$$R_k = \frac{U_k \cos \varphi_k}{I_N}, x_k = \frac{U_k \sin \varphi_k}{I_N}, \varphi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k I_N} \quad (1.12)$$

En ajoutant aux paramètres ci-dessus les grandeurs  $x_0$  et  $R_0$  qui sont déterminés en régime à vide, nous obtiendrons tous les paramètres du schéma équivalent réduit du transformateur.

#### 1.5. Caractéristique en charge des transformateurs monophasés

Du schéma équivalent réduit du transformateur (fig. 1.3, c) on peut déduire que

$$\dot{U} = \dot{U}'_n + \Delta \dot{U}_{TP} \quad (1.13)$$

D'où nous obtenons l'expression pour le vecteur chute de tension sur le transformateur

$$\Delta \dot{U}_{TP} = \dot{U}_1 - \dot{U}'_n = \dot{U}_1 - Z'_n I'_2 \quad (1.14)$$

Le module du vecteur de la chute de tension sur le transformateur peut être obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$\Delta U\% = \beta (U_{ka} \cos \varphi + U_{kr} \sin \varphi) + \frac{\beta^2 (U_{kr} \cos \varphi - U_{ka} \sin \varphi)^2}{200} \quad (1.15)$$

$$\text{Ici } U_{ka} = \frac{I_{1nom} R_k}{U_{1nom}}; U_{kr} = \frac{I_{1nom} x_k}{U_{1nom}};$$

$I_{1nom}, U_{1nom}$  - courant et tension nominaux de l'enroulement primaire

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1nom}}; \quad (1.16)$$

$\beta$  - le coefficient de charge.

La forme de la courbe de caractéristique en charge du transformateur ne dépend pas seulement de sa valeur, mais aussi de son caractère. Si l'on augmente le courant de la charge qui a un caractère actif ou actif - inductif, la tension de sortie du transformateur diminue et elle augmente si la charge est de caractère capacitif ou actif - capacitif.

## 1.6. Rendement des transformateurs monophasés

La détermination du rendement du transformateur  $\eta$  comme le rapport de la puissance fournie à la charge ( $P_N$ ) sur la puissance totale ( $P_1$ ) consommée du réseau peut conduire aux erreurs considérables, car la différence ( $P_N - P_1$ ) constitue seulement 2% de  $P_N$  pour un rendement de 98%, ce qui est comparable à l'erreur des instruments de mesure. C'est pour cela, il est préférable de déterminer la valeur du rendement en utilisant la méthode indirecte :

$$\eta = \frac{P_N}{P_N + P_V + P_C}$$

Où,  $P_V, P_C$  - pertes à vide et de court-circuit.

## 1.7. Caractéristiques de fonctionnement des transformateurs monophasés

Les caractéristiques de fonctionnement du transformateur sont des courbes de dépendance du rendement, du facteur de puissance, du courant de l'enroulement primaire et de la tension sur la charge en fonction du courant de charge. Toutes ces dépendances sont obtenues à partir du schéma équivalent réduit (fig. 1.3, c). Les courbes de caractéristiques de fonctionnement du transformateur sont représentées sur la fig. 1.4.

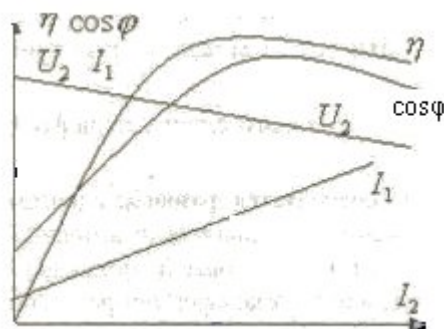


Fig. 1.4 : Les caractéristiques de fonctionnement du transformateur

## 2. Transformateurs triphasés

Les rapports énergétiques obtenus pour les transformateurs monophasés sont valables et pour les transformateurs triphasés, mais à condition que leur fonctionnement s'effectue en régime de charges symétriques. Dans ces conditions, on peut utiliser en qualité de transformateur triphasé le système de trois transformateurs identiques. Les caractéristiques de la seconde variante de transformateur triphasé seront inférieures à celles de la première. Mais la seconde variante possède une fidélité d'exploitation plus élevée que celle de la première, car en cas de panne c'est seulement un des enroulements qui tombe en panne et la réparation de celle-ci est moins coûteuse. C'est pour cela les normes permettent d'installer trois transformateurs identiques si la puissance dépasse 1600 kVA.

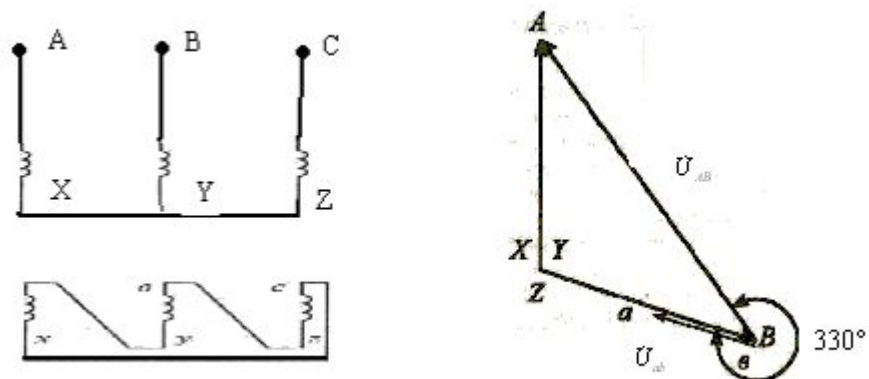
A la différence du régime à vide, le régime de court-circuit ne possède pas de particularités importantes, cela s'explique par l'absence de saturation du noyau magnétique au cours de ce régime ainsi, les courants et les puissances se répartissent uniformément entre les phases et en plus les formes des courbes représentatives des f.e.m. sont sinusoïdales. C'est pour cela que toutes les expressions, obtenues pour le transformateur monophasé, restent valables pour le triphasé, et cela en tenant compte que celles ci correspondent à une phase.

Les spécificités des transformateurs triphasés se trouvent dans la méthode de connection de leurs enroulements primaire et secondaire. Ceux-ci peuvent être connectés en étoile (Y) ou en triangle ( $\Delta$ ) avec un branchement direct ou croisé. Le nombre complet des variantes de connections des enroulements HT et BT est égal à 12 (douze).

Le branchement en étoile demande souvent un fil conducteur neutre. La méthode de connections des enroulements influe tant sur le rapport des tensions des phases que sur le déphasage entre les tensions à l'entrée et à la sortie du transformateur.

En fonction du déphasage entre les tensions à l'entrée et à la sortie, les transformateurs se divisent en groupes.

Le numéro du groupe est déterminé par le déphasage entre les tensions linéaires de même nom des cotés primaire et secondaire divisé par  $30^\circ$ . En qualité d'exemple sur la fig. 1.5 sont représentés la connection et le diagramme vectoriel du transformateur triphasé branché en schéma de groupe 11 (onze).



*Fig. 1.5. a) Connection et b) le diagramme vectoriel du transformateur triphasé par schéma du onzième groupe*

### 3. Modélisation des transformateurs monophasés

Les modèles virtuels des différents transformateurs se trouvent dans la bibliothèque *Powerlib2/Elements* du paquet d'extension *Power system* (fig. 1.6)

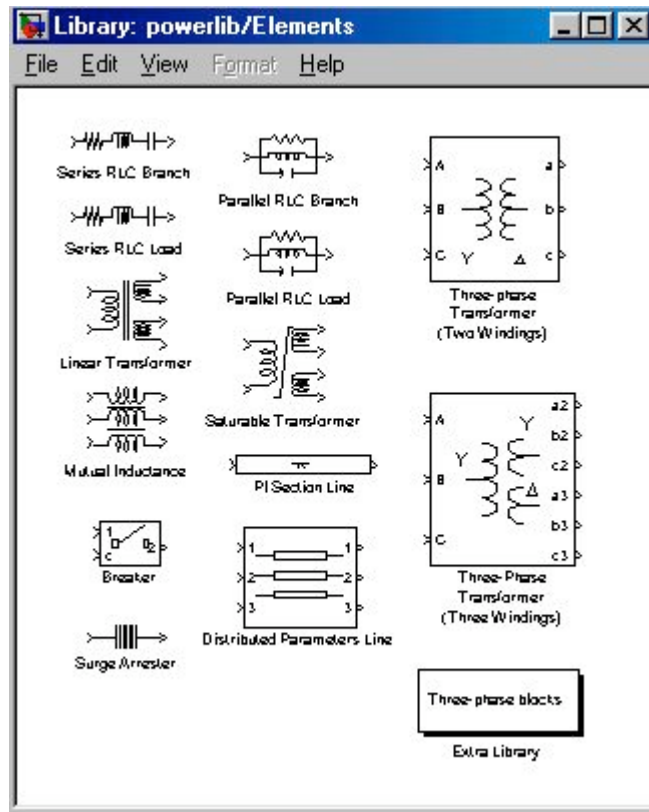


Fig. 1.6. La bibliothèque Powerlib/Elements du paquet d'extension Power system

Ici il y a deux transformateurs monophasés – linéaire (*linear transformer*) et un autre transformateur, dans lequel on peut considérer la non linéarité de la caractéristique d'aimantation du circuit magnétique (*Saturable Transformer*). Il existe aussi deux transformateurs triphasés (Three Phase Transformer).

La fenêtre de réglage (de mise au point) du transformateur linéaire monophasé est montrée sur la fig. 1.7.

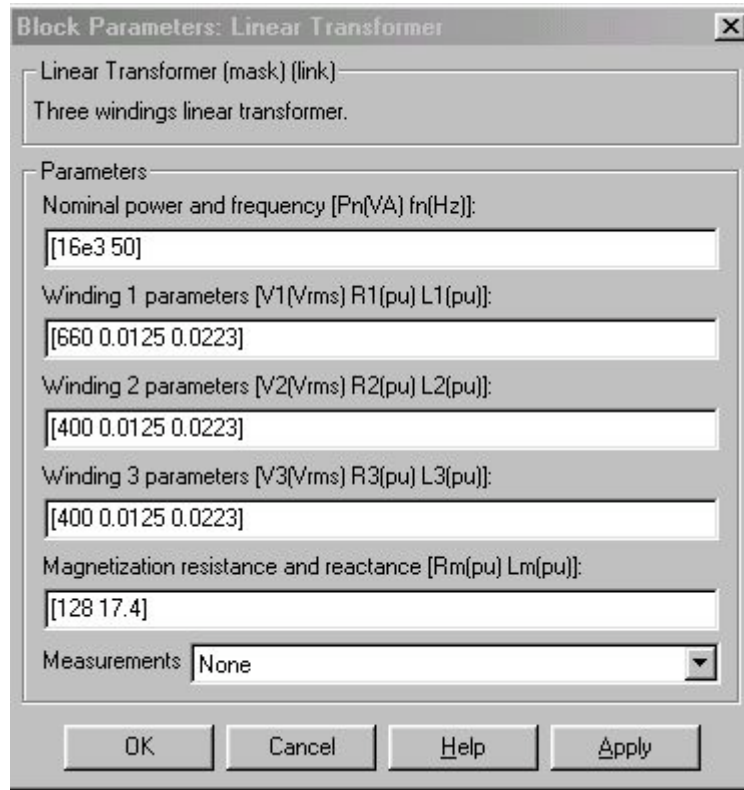
Dans les domaines de la fenêtre de mise au point (réglage) on peut écrire successivement :

- la puissance apparente du transformateur en voltampères et la fréquence en hertz (la puissance totale est désignée par la lettre S, cependant dans la fenêtre, elle est désignée par la lettre P, il est important de ne pas la confondre avec la puissance active) ;
- la tension effective sur le primaire en volt et les valeurs relatives de la résistance active et de l'induction de fuite du primaire ;
- la tension effective et les paramètres relatifs des enroulements secondaires ;
- les paramètres relatifs de la branche d'aimantation ;

Dans le menu contextuel de la zone *measurements* on donne les variables d'état du transformateur, qui sont mesurées à l'aide du bloc *multimeter*.

Les paramètres du schéma équivalent du transformateur sont présentés en unités relatives.

Les valeurs de base des paramètres du transformateur sont : la puissance entière calculée  $S$ , désignée comme  $P(VA)$ , la fréquence nominale  $H_z$ , la tension nominale effective ( $V$ ) correspondante à l'enroulement. Pour chaque enroulement les résistances et inductances relatives sont déterminées par les expressions :



**Fig. 1.7. La fenêtre de réglage du transformateur linéaire monophasé**

$$R_n(pu) = \frac{R_n}{Z_{bn}}; L_n(pu) = \frac{x_n}{Z_{bn}}, \quad (1.18)$$

Où  $Z_{bn} = \frac{U_n^2}{S}$ .

La présentation des paramètres du transformateur en grandeurs relatives est justifiée par l'égalité des résistances et inductances des enroulements primaire et secondaire (fig. 1.7).

Le calcul des paramètres relatifs du transformateur s'effectue sur la base des données du recueil de caractéristiques de l'usine fabricante et les équations (2.5), (1.12), (1.18) par les expressions :

$$R_m = \frac{R_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 I_{10} \cos \varphi_0}, L_m = \frac{x_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 I_{10} \sin \varphi_0}, \varphi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 I_{10}} \quad (1.19)$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2Z_b} = \frac{SU_k \cos \varphi_k}{2U_1^2 I_N}, L_{p1} = L'_{p2} = \frac{x_k}{2Z_b} = \frac{SU_k \sin \varphi_k}{2U_1^2 I_N}, \quad (1.20)$$

$$\varphi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k I_N}$$

En qualité d'exemple dans le tableau 1.1 sont mentionnées les données de caractéristiques du transformateur TC-16-066. Soulignons, que la tension de court circuit et le courant à vide sont donnés en pourcentage des nominaux. Dans ce cas le courant nominal du transformateur doit être déterminé par l'expression

$$I_N = \frac{S}{U_1}. \quad (1.21)$$

Tableau 1.1

| type      | $S(kVA)$ | $U_1(V)$ | $U_k(\%)$ | $I_{10}(\%)$ | $P_k(W)$ | $P_{10}(W)$ |
|-----------|----------|----------|-----------|--------------|----------|-------------|
| TC-16-066 | 16       | 660      | 4.5       | 5.8          | 400      | 125         |

Listing 1.1

```
% les données du recueil SN=16e3 ; UN=660 ; Pkz=400 ; P0=125 ; Curr=5.8 ; Uolt=4.5 ;
% marche à vide IH=SN/UN ; I0=Curr*IN/100 ; S0=UN*I0 ; cosF0=P0/S0 ; Z0=UN/I0 ;
R0=Z0/cosF0 ; X0=Z0/sqrt(1-cosF0^2) ; Zb=(UN)^2/SN ; Rm=R0/Zb ; Lm=X0/Zb ;
% Court circuit Ukz=(Uolt/100)*UN ; Zkz=Ukz/IN ; cosFkz=Pkz/(Ukz*IN) ;
Rkz=Zkz*cosFkz ;
Xkz=Zkz*sqrt(1-cosF0^2) ; R1=0.5*Rkz/Zb ; L1=0.5*Xkz/Zb ;
% Sortie de résultats [I0 Rm Lm ; Ukz R1 L1]
```

Le listing du programme de calcul des paramètres du transformateur dans Matlab est mentionné dans le tableau 1.1.

Les données du recueil de caractéristiques et les résultats du calcul des paramètres relatifs du transformateur TC-16-066 sont mentionnés dans les zones correspondantes de la fenêtre des paramètres du transformateur (fig. 1.7).

Le model pour l'étude du transformateur est représenté sur la fig. 1.8.

Le model virtuel comprend :

E1 – la source de la f.e.m variable (la bibliothèque *Power System Blocset / Electrical Sources*) ;

V1, V2 – les blocs de mesure de tensions dans les circuits primaire et secondaire du transformateur (la bibliothèque *Power System Blockset/Measurement*) ;

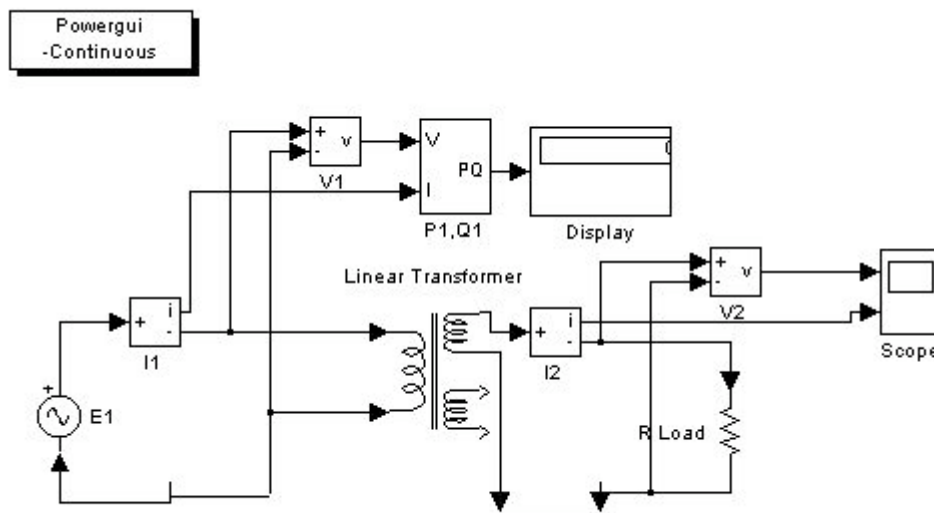


Fig. 1.8. Le modèle pour l'étude du transformateur

I1, I2 – les blocs de mesure du courant dans les enroulements primaire et secondaire du transformateur (la bibliothèque *Power System Blockset/Measurement*) ;

P1, Q1 ; P2, Q2 – les blocs de mesure des puissances active et réactive dans les circuits primaire et secondaire du transformateur monophasé (la bibliothèque *Power System Blockset/extras/Measurement*) ;

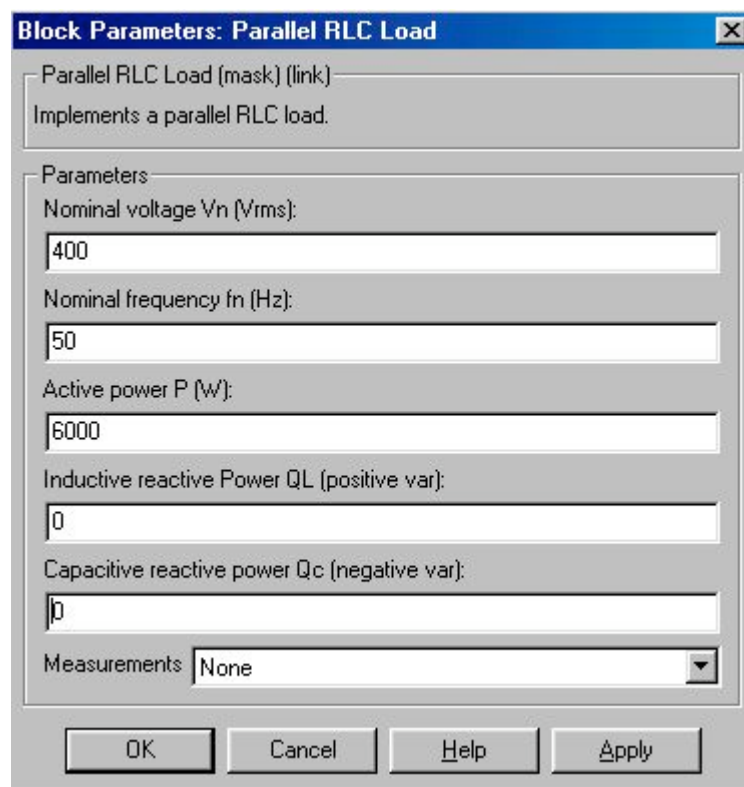
*Powergui* – le bloc de l'utilisateur, dans lequel, on peut écrire les résultats de mesure des blocs V1, V2, I1, I2 ;

*Display* – le bloc de représentation quantitative des puissances mesurées (la bibliothèque *Simulink/Sinks*) ;

*Scope* – le bloc d'observation des courbes de courant et de tension (la bibliothèque *Simulink/Sinks*) ;

*Load* – le bloc, qui modélise la charge (la bibliothèque *Powerlib2/Elements*).

Pour déterminer les caractéristiques de travail (de fonctionnement) du transformateur, on varie seulement les paramètres de la charge. La fenêtre de présentation des paramètres de la charge est montrée sur la fig. 1.9.



*fig. 1.9. Fenêtre des paramètres de la charge*

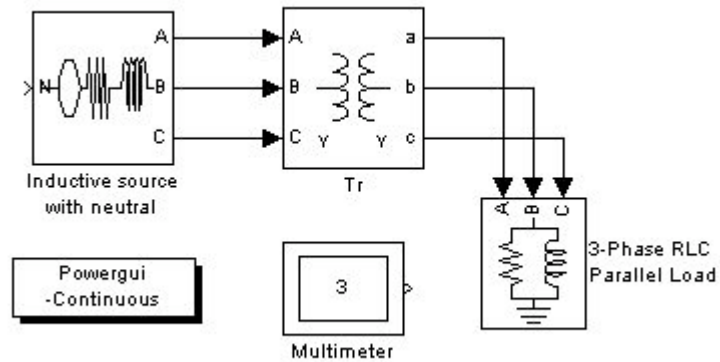
Dans les domaines de la fenêtre on donne :

- la tension effective nominale ;
- la fréquence nominale ;
- la puissance active ;
- a puissance réactive (capacitive).

- Les caractéristiques de fonctionnement du transformateur sont relevées sur le model (fig. 1.8) en variant la charge de zéro à la valeur nominale. La fig. 1.4 représente les caractéristiques de travail. Pour notre cas, les caractéristiques seront construites sur des graphiques séparés pour une charge purement active ( $\cos\varphi=1$ ).

#### **4. La modélisation des transformateurs triphasés**

Le modèle pour l'étude du transformateur triphasé est représenté sur la fig. 1.10.



**Fig.1.10. Le modèle du transformateur triphasé**

Le bloc *multimeter* mesure les tensions sur les phases du transformateur. Les valeurs de ces tensions et les tensions à l'entrée et à la sortie du transformateur. La différence de phases entre la tension d'entrée et de sortie du transformateur se détermine par les indications du bloc *display*. Le schéma de connection des enroulements primaires et secondaires est donné dans le menu des zones *Winding 1 (ABC) connection*, *Winding 2 (abc) connection* de la fenêtre de réglage des paramètres du transformateur (fig. 1.13).

La mesure s'effectue pour 4 (quatre) variantes de connection des enroulements. Dans le tableau 1.2 sont mentionnés les résultats des mesures.

Tableau 1.2

| Schéma de connection                                    | Y/Y | Y/ $\Delta$ 11<br>(onzième<br>groupe) | Y/ $\Delta$ 1<br>(premier<br>groupe) | $\Delta$ 1/ $\Delta$ 1 |
|---|-----|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| La tension sur la phase de l'enroulement primaire (V)   | 380 | 380                                   | 380                                  | 660                    |
| La tension sur la phase de l'enroulement secondaire (V) | 220 | 380                                   | 380                                  | 380                    |
| La tension à l'entrée V1(V)                             | 660 | 660                                   | 660                                  | 660                    |
| La tension à la sortie V2(V)                            | 380 | 380                                   | 380                                  | 380                    |
| Le déphasage entre V1 et V2 (grad)                      | 0   | 330                                   | 30                                   | 0                      |

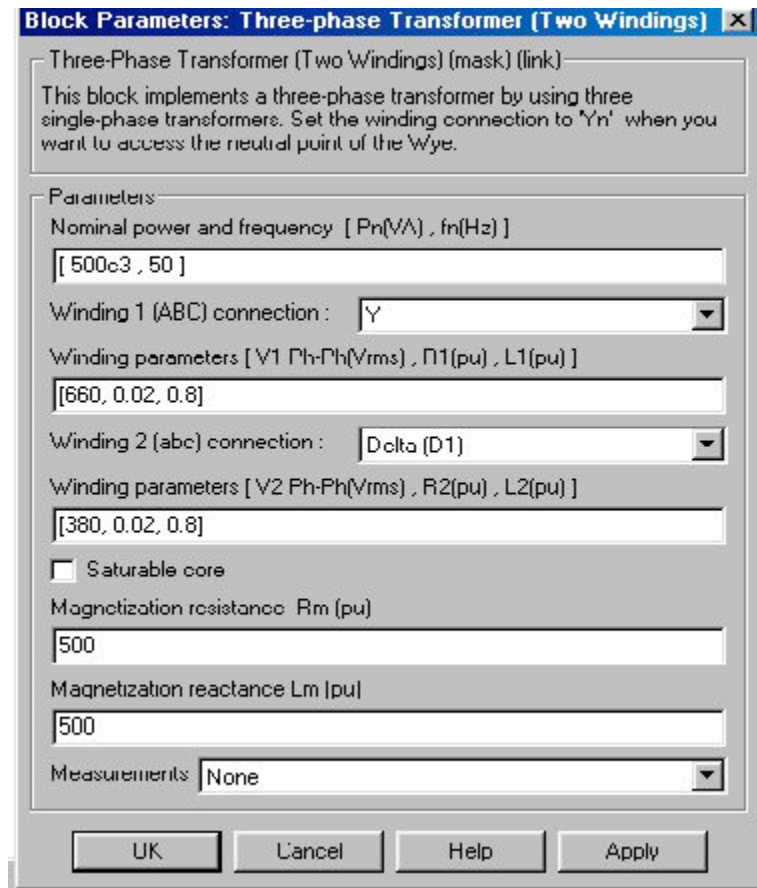


Fig.1.12. Fenêtre de réglage du transformateur triphasé

L'exécution des laboratoires virtuels demande au professeur chargé de ces travaux d'attribuer à l'avance à chaque étudiant ou groupe d'étudiants le type de transformateur à étudier. L'étudiant doit à son tour à la maison calculer les paramètres du transformateur et se préparer pour l'exécution du travail. La préparation pour l'exécution du travail inclue :

1. L'étude de la partie théorique correspondante.
2. Prendre connaissance du contenu du laboratoire.
3. Le calcul des paramètres du transformateur à étudier.
4. Le traçage et le remplissage des différents tableaux.

## Laboratoire N°1

### Etude des transformateurs monophasés

#### 1. But du travail

L'étude du transformateur monophasé dont le secondaire est branché sur une charge de résistance active.

#### 2. Indications pour l'exécution du travail

L'exécution de ce travail demande au préalable à l'étudiant d'étudier les chapitres 1.2 à 1.7. En qualité de littérature complémentaire, il peut se servir de n'importe quel document sur les transformateurs.

#### 3. Contenu du travail

3.1. La détermination des paramètres du schéma à l'aide des essais à vide et de court-circuit.

3.2. Le relevé des caractéristiques de charge et de fonctionnement du transformateur.

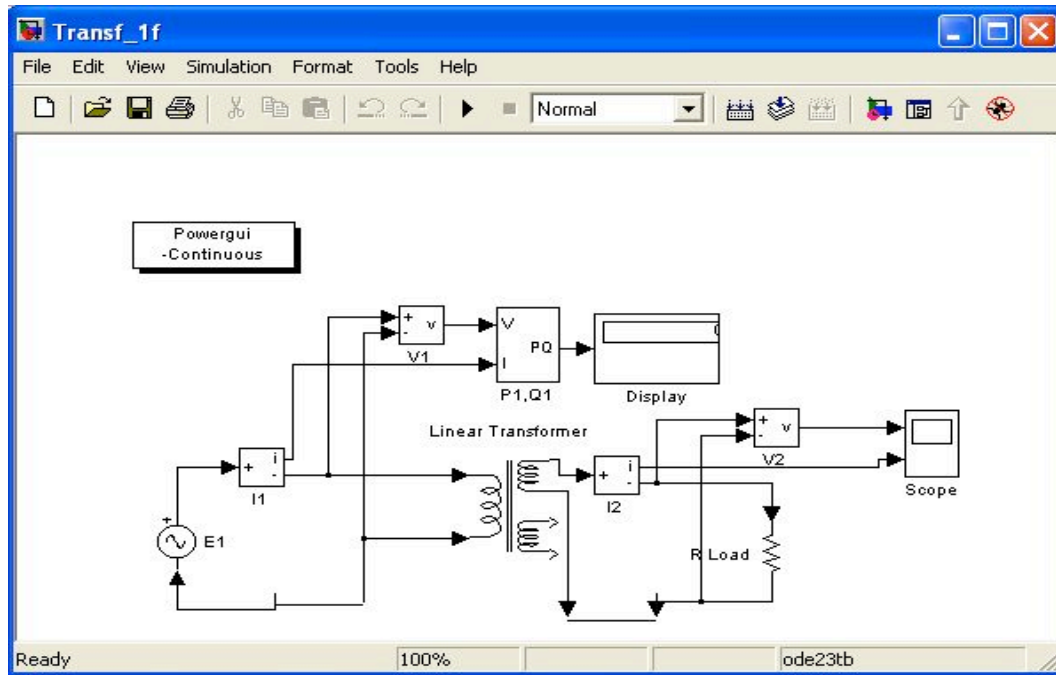
#### 4. Description de l'installation du laboratoire virtuel.

L'installation du laboratoire virtuel est représentée sur la fig.1.

Le modèle comprend :

- une source de tension variable E1 (bibliothèque *Power System Blockset/Electrical Sources*) ;
- Les blocs de mesure de tension V1, V2 et les blocs de mesure de courant I1, I2 dans les circuits primaire et secondaire (bibliothèque *Power System Blockset/Measuremen)t* ;
- Le transformateur à étudier (Linear Transformer) et la charge (R Load) (bibliothèque *Power System Blockset/Elements*) ;
- Les blocs de mesure des puissances actives et réactive dans les circuits primaire et secondaire du transformateur (P1, Q1 ; P2 Q2) (bibliothèque *Power System Blockset/Extras/ Measuremen)t* ;





**Fig.1.1. Modèle pour l'étude des transformateurs monophasés**

- le bloc de l'utilisateur (*Powergui*), qui mesure les valeurs  $V1$ ,  $V2$ ,  $I1$ ,  $I2$  ;
- les blocs *Display1*, *Display2* pour la représentation quantitative des puissances mesurées et le bloc *Scope* pour l'observation de la forme des courbes de courant et tension dans le circuit secondaire (bibliothèque *Simulink/Sinks*).

Les paramètres des transformateurs pour l'exécution du laboratoire sont mentionnés dans le tableau 1.

Tableau 1.1

| Type de transformateur | SN[kBA] | Uk[%] | Pk[Bt] | P10[Bt] | I10[%] |
|------------------------|---------|-------|--------|---------|--------|
| TC-10/066              | 10      | 4.5   | 280    | 90      | 7      |
| TC-16/066              | 16      | 4.5   | 400    | 125     | 5.8    |
| TC-25/066              | 25      | 4.5   | 560    | 180     | 4.8    |
| TC-40/066              | 40      | 4.5   | 800    | 250     | 4.0    |
| TC-63/066              | 63      | 4.5   | 1090   | 355     | 3.3    |
| TC-100/066             | 100     | 4.5   | 1500   | 500     | 2.7    |
| TC-160/066             | 160     | 4.5   | 2060   | 710     | 2.3    |

Prenons comme exemple l'étude du transformateur de type TC-100/066. Le calcul du schéma équivalent du transformateur s'effectue en utilisant les expressions (1.18 – 1.21) ou en utilisant le programme, représenté sur le listing 1.

La fenêtre de réglage des paramètres du transformateur est représentée sur la fig.2.

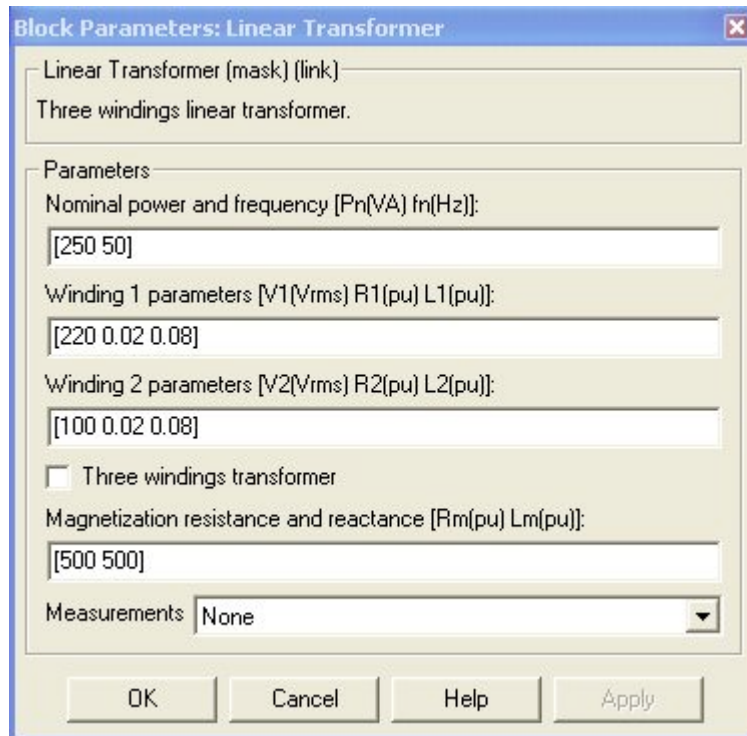


Fig.1.2. La fenêtre de réglage des paramètres du transformateur

Dans les domaines de la fenêtre on donne successivement :

- la puissance du transformateur et la fréquence ;
- la tension effective et les paramètres relatifs du schéma équivalent de l'enroulement primaire ;
- la tension effective et les paramètres relatifs du schéma équivalent des enroulements secondaires ;
- les paramètres relatifs de la branche d'aimantation ;
- les états variables du transformateur, qui sont mesurés à l'aide du bloc *multimeter*.

Comme le bloc *multimeter* n'est pas utilisé dans ce cas, c'est pour cela dans la zone *Measurement* du menu contextuel l'option none est choisie

La fenêtre de réglage des paramètres de la source d'alimentation est sur la fig.1.3.

Dans les domaines de la fenêtre on donne :

- l'amplitude de la tension d'alimentation (V).
- La phase initiale en degrés ;
- La fréquence (Hertz) ;
- Le mode de temps (c) ;
- Les variables mesurées par le bloc *Multimeter*.

La tension et la fréquence de la source doivent correspondre aux paramètres du transformateur.

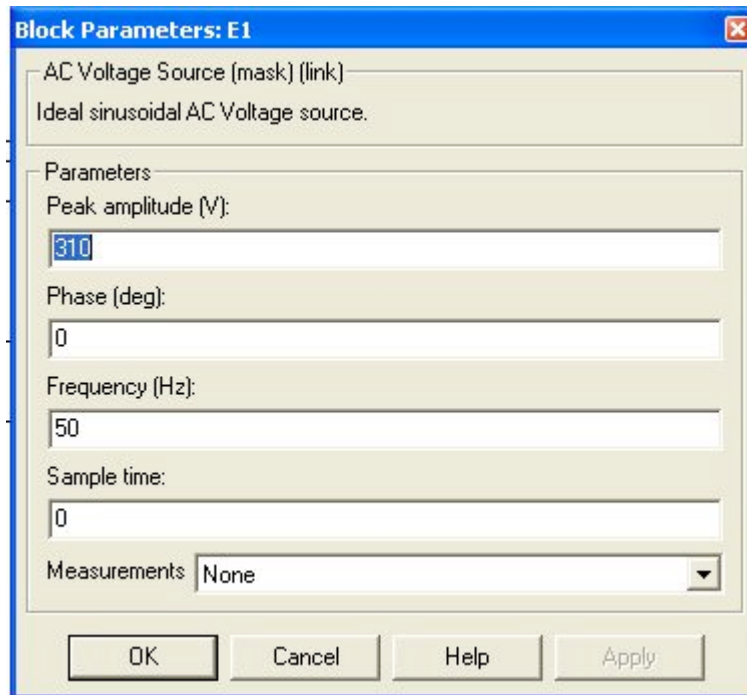


Fig.1.3. La fenêtre de réglage des paramètres de la source d'alimentation

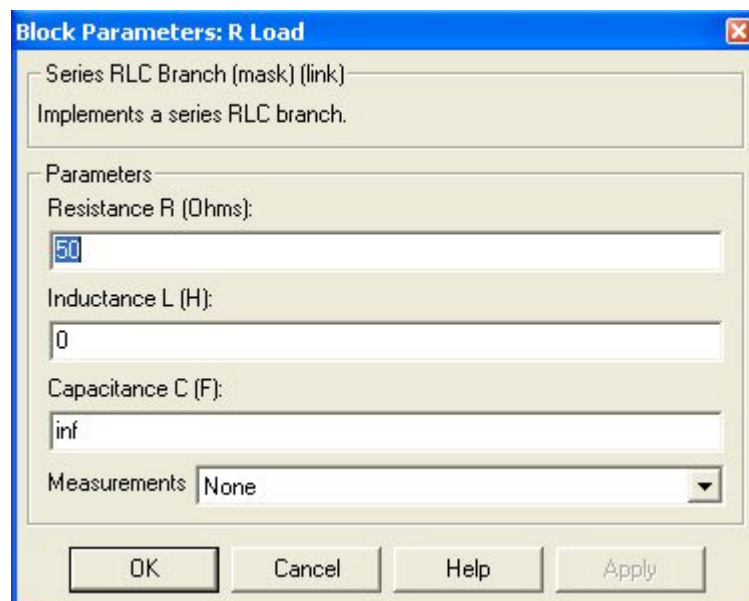


Fig.1.4. La fenêtre de réglage des paramètres de la charge

La fenêtre de réglage des paramètres de la charge est représentée sur la fig. 1.4. Dans les domaines de cette fenêtre on donne R, L, C de la charge. Pour supprimer les éléments réactifs, l'induction doit être égale à zéro, et la capacité – infini. Dans dans la fenêtre de mise au point des paramètres du bloc de mesure de la puissance (fig. 1.5) on indique la fréquence, à laquelle sont mesurées les puissances active et réactive. La fenêtre de réglage du display est représentée sur la figure 1.6. Dans les domaines de cette fenêtre on indique le format de présentation des résultats numériques, dans la zone *décimation* (division) on donne le nombre de pas de l'expérimentation, à travers lequel les valeurs sortent sur le display.

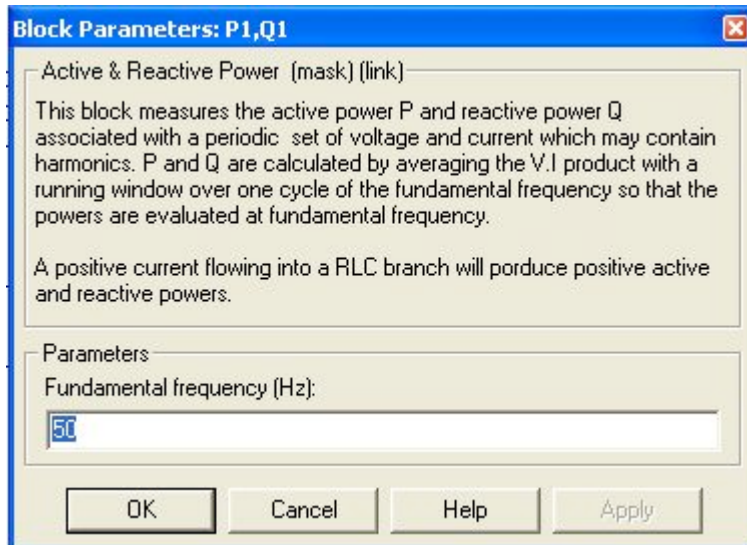


Fig.1.5. La fenêtre de réglage du bloc de mesure des puissances active et réactive.

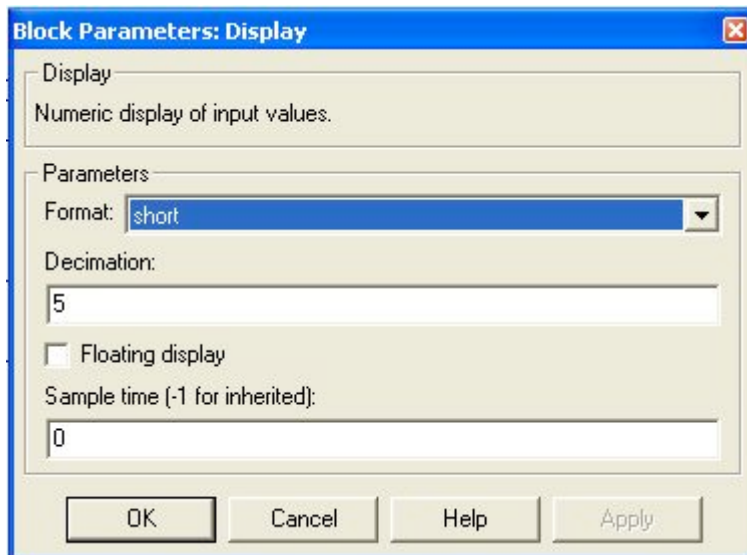


Fig.1.6. La fenêtre de réglage du bloc Display

## 5. L'ordre d'exécution du laboratoire

Le type de transformateur pour l'exécution est donné par le professeur. En cas de travail individuel ces données peuvent être prises de la figure 1.2. La fenêtre de réglage des paramètres de modélisation est représentée sur la fig.1.7.

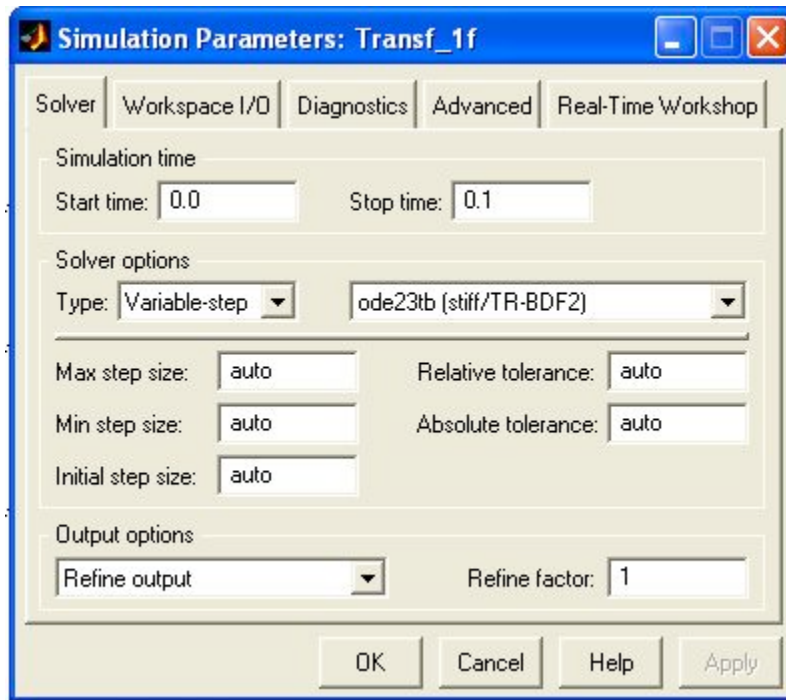


Fig. 1.7. La fenêtre de réglage des paramètres de la modélisation

La détermination des paramètres du schéma équivalent indiquée au point 3.1 et leur comparaison avec les paramètres donnés dans la fenêtre de réglage (fig.2) s'effectue à l'aide des essais à vide et de court-circuit. A vide la charge est débranchée, le transformateur est alimenté sous tension nominale. Les valeurs effectives des tensions et des courants du transformateur à vide sont déterminés dans la fenêtre du bloc *powergui* (fig.1.8).

Rappelons, que la puissance active à vide est égale aux pertes dans le noyau magnétique du transformateur.

Les paramètres relatifs de la branche d'aimantation sont calculés à partir de (1.18-1.21) (programme, listing 1.1).

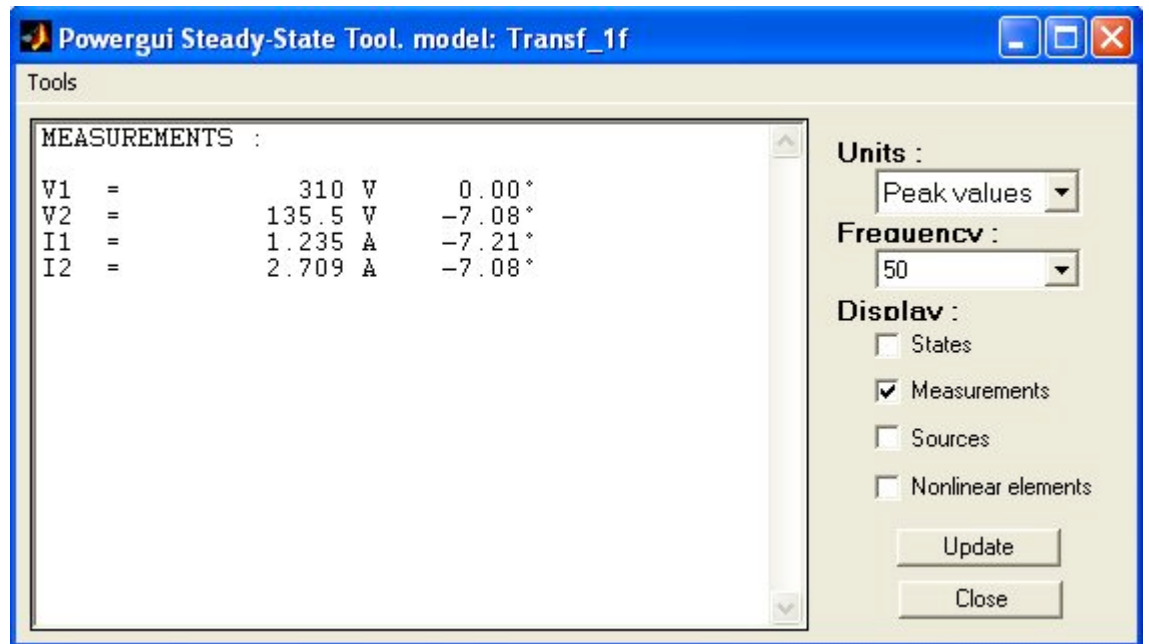


Fig.1.8. La fenêtre du bloc *powergui* avec les résultats des mesures

L'essai de court circuit s'effectue en court-circuitant le circuit secondaire. Dans ce cas la tension de la source d'alimentation doit être égale à la tension de court circuit du transformateur, ( $U_k=29.7$  V).

Rappelons, que la puissance active en régime de court circuit avec un courant primaire de court circuit égal au nominal, détermine les pertes dans les enroulements du transformateur. Après l'exécution des essais et le calcul des paramètres il sera important de les comparer avec ceux qui ont été introduits dans la fenêtre des paramètres (fig.1.2).

Le relevé des caractéristiques en charge et de fonctionnement du transformateur s'effectue sur le modèle fig.1.1 en faisant varier la résistance de la charge ( $0.2 \div 1.2$ )  $R_{nom}$ . Ainsi la modélisation s'effectuera pour chaque valeur de la résistance de la charge. La résistance nominale de la charge se calcule à partir de la formule suivante :

$$R_{nom} \approx \frac{U_1^2}{S}. \quad (1)$$

Les désignations correspondent à celles du tableau 2. Ce dernier doit être rempli au cours de l'expérience.

Tableau 1.2

| charge         | Grandeurs mesurées |                |              |              |           |                |           |           |
|----------------|--------------------|----------------|--------------|--------------|-----------|----------------|-----------|-----------|
| $R_C$<br>(ohm) | $P_1$<br>(W)       | $Q_1$<br>(VAR) | $U_1$<br>(V) | $I_1$<br>(A) | $P_2$ (W) | $Q_2$<br>(VAR) | $U_2$ (V) | $I_2$ (A) |

Tableau 2 (suite et fin)

| Grandeurs calculées |                 |        |
|---------------------|-----------------|--------|
| $\varphi_1$ (grad)  | $\cos\varphi_1$ | $\eta$ |

Ici 
$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \varphi_1 = \arctg \frac{Q_1}{P_1}. \quad (2)$$

A partir des données du tableau 2 on trace la caractéristique en charge du transformateur et sur une figure à part – les caractéristiques de fonctionnement. Les formes de la tension et du courant de l'enroulement secondaire du transformateur, obtenues à l'aide du bloc *Scope* sont représentées sur la figure 9.

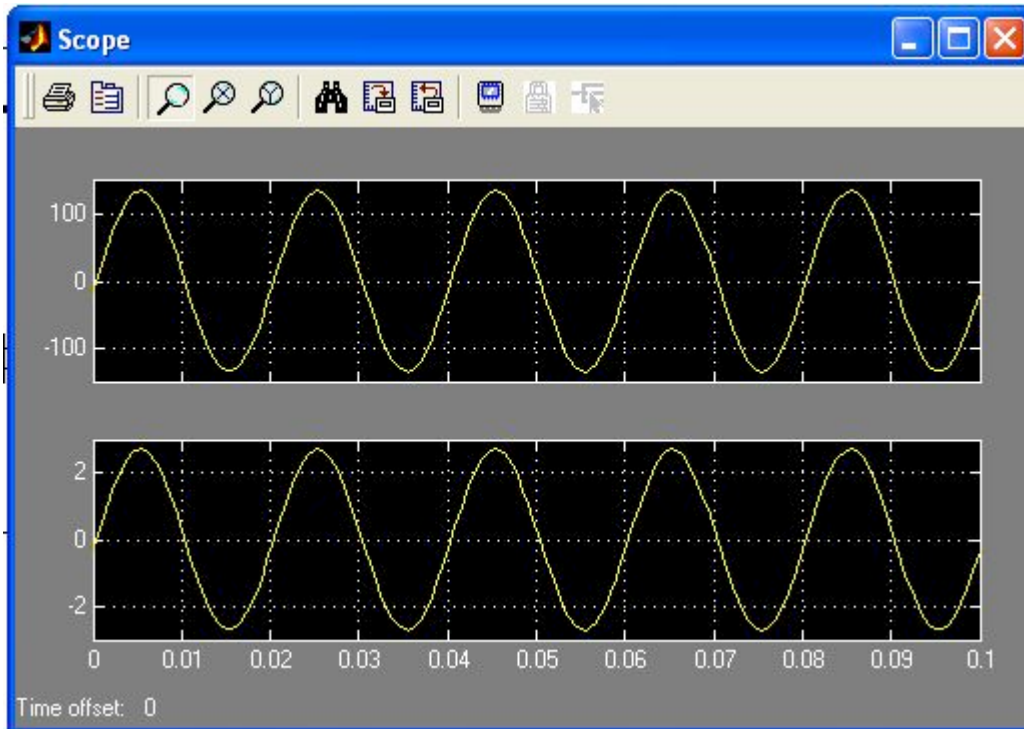


Fig.1.9. les formes de la tension et du courant sur l'enroulement secondaire du transformateur

## 6. le contenu du rapport

- 6.1. Le schéma du model et la description des différents blocs.
- 6.2. Le tableau comparatif des paramètres donnés et ceux obtenus à partir des essais à vide et de court circuit du transformateur.
- 6.3. La caractéristique en charge du transformateur  $U_2 = f(I_2)$
- 6.4. Les caractéristiques de fonctionnement du transformateur.