

LELEC1310 - Convertisseurs électromécaniques

Laboratoire : Triphasé

Caytan Antoine, **Delait** Louis, **Delcoigne** Ben, **Dufromont** Célestin

Groupe 30 - Mars 2020

1 Introduction

L'objectif de ce laboratoire est de déterminer les éléments d'un circuit équivalent simplifié d'un transformateur triphasé à l'aide d'essais en charge et à vide, et de vérifier la validité des prévisions obtenues à partir de ce circuit équivalent en effectuant un essai en charge. Pour faciliter la lecture des équations, les grandeurs phasorielles sont exprimées en gras et leur amplitude dans un format neutre.

Dans un premier temps, ce rapport dresse le set-up expérimental. Ensuite, la mesure de la résistance interne du transformateur est couverte. Suivent ensuite les trois essais effectués. D'abord l'essai en court circuit visant à déterminer la résistance liée aux lignes du transformateur. Ensuite l'essai à vide visant à mettre en évidence la résistance et l'inductance liée aux pertes de flux magnétique et à la perméabilité magnétique non constante (pertes fer). Les essais à vide non standard visent à dresser la caractéristique magnétique (H/B) du matériau. Finalement, l'essai en charge nous permet de vérifier la cohérence de toutes les données trouvées.

La Figure 1 montre un équivalent monophasé d'un transformateur. Les variables utilisées tout au long de ce rapport y sont mentionnées.

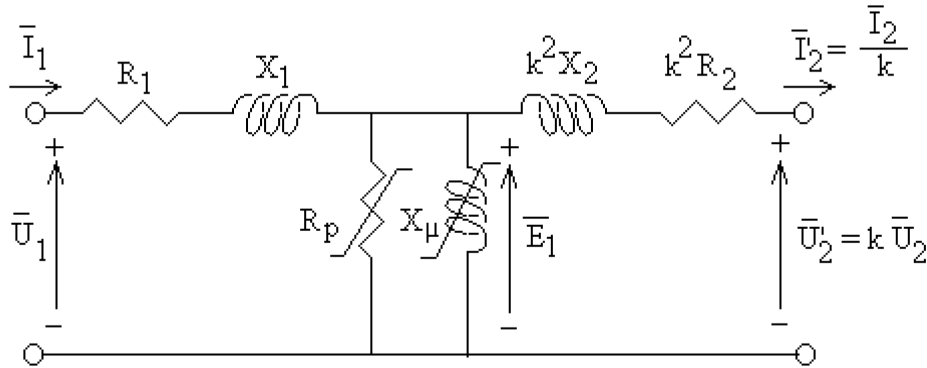


Figure 1: Schéma équivalent monophasé du circuit

Note: Pour simplifier la lecture des équations, les grandeurs phasorielles sont écrites en gras et les grandeurs sans indice lettré font références à des grandeurs de phase.

2 Set-up expérimental

Matériel utilisé:

- Transformateur triphasé à l'essai
- Autotransformateur comme source triphasée à tension variable
- Voltmètres et ampèremètres à courant alternatif
- Wattmètre triphasé
- Transformateurs de courant (abrégés TI)

Le transformateur que nous avons testé était connecté en étoile triangle ($Y - \Delta$). La valeur de tension nominale est de 230 [V] 

Les mesures de courant ont été effectuées par des ampèremètres connectés au circuit par l'intermédiaire de transformateurs de mesure de courant afin de permettre de changer l'ordre de grandeur de celui-ci sans mettre le montage hors tension. Les ampèremètres utilisés ainsi sont utilisés sur un calibre fixé, et le changement de calibre s'effectue au primaire du TI .

Les mesures de tension ont été effectuées à l'aide de voltmètres. Ceux-ci pouvaient être déconnectés et reconnectés au montage sous tension afin de mesurer la tension à différents endroits du circuit.

Un wattmètre double a été utilisé pour mesurer la puissance à la sortie du banc de mesure. Les 2 TI qui alimentaient ce wattmètre étaient toujours sur le même calibre.

Pour que les mesures soient les plus précises possible, nous avons choisi les calibres qui nous permettaient d'atteindre le fond d'échelle des instruments de mesure sans toutefois dépasser la valeur maximale.


Les rapports de transformation ont été pris en compte dans les calculs des résultats (en multipliant par l'échelle utilisée). Le schéma de connexion du banc de mesure se retrouve à la figure 2.

3 Détermination du courant nominal I_n

Nous avons relevé les informations suivantes sur la plaquette signalétique du transformateur: $S_n = 3[kVA]$, $U_n = 230[V]$.

La tension nominale étant exprimée en grandeur de ligne, on peut écrire l'équation exprimant la puissance apparente en fonction de la tension

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$$

On en déduit donc la valeur $I_n = 7.53[A]$ 

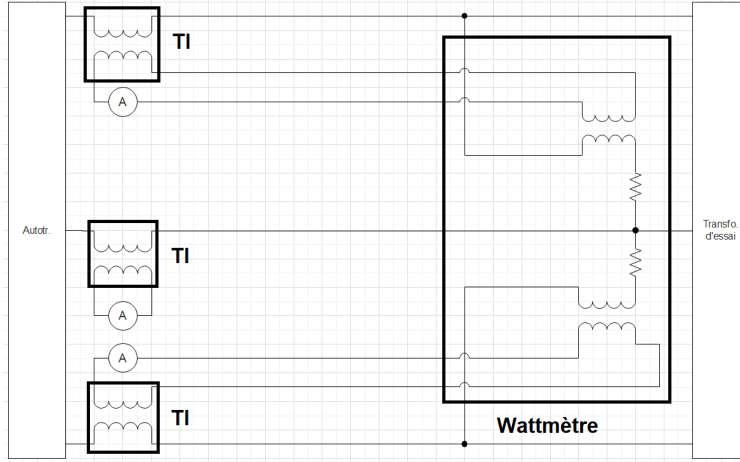


Figure 2: Schéma du banc de mesure du transformateur triphasé

4 Mesure de la résistance DC

Suite à un souci technique, l'appareil permettant de mesurer les résistances DC du transformateur n'était pas fonctionnel. Le surveillant de laboratoire nous a communiqué les valeurs de résistances suivantes: $R_{1DC} = 300[m\Omega]$, $R_{2DC} = 900[m\Omega]$.

Cette résistance mesurée ne correspond pas à la valeur de l'équivalent monophasé. En effet, la résistance DC a été mesurée aux bornes du circuit en étoile, mesurant par conséquent deux résistances mises en série (un raisonnement similaire pour les circuits en triangle conduit au même résultat).

$$R_{mes} = 2 \cdot R_{\lambda} \Rightarrow R_{\lambda} = 150[m\Omega] \quad (1)$$

5 Rapport de transformation

Sur la plaquette signalétique du transformateur, on peut trouver les informations suivantes: le rapport de transformation indiqué est de 1:1, et les modes de connexion sont respectivement en triangle et en étoile, pour le primaire et le secondaire. (Figure 3) Cela implique que le rapport attendu est de $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$. Lors de l'essai à vide en mesurant avec un voltmètre classique la tension de ligne U_{RS} au secondaire du transformateur, en appliquant au primaire une tension de 230[V], on trouve 399[V], le rapport est donc bien de $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

6 Essai en court-circuit

6.1 Utilité de l'essai et mode opératoire

L'essai en court-circuit s'effectue en alimentant un des enroulements sous un courant égal ou inférieur à son courant nominal ($0.25I_n < I < I_n$), après avoir court-circuité l'autre enroulement.

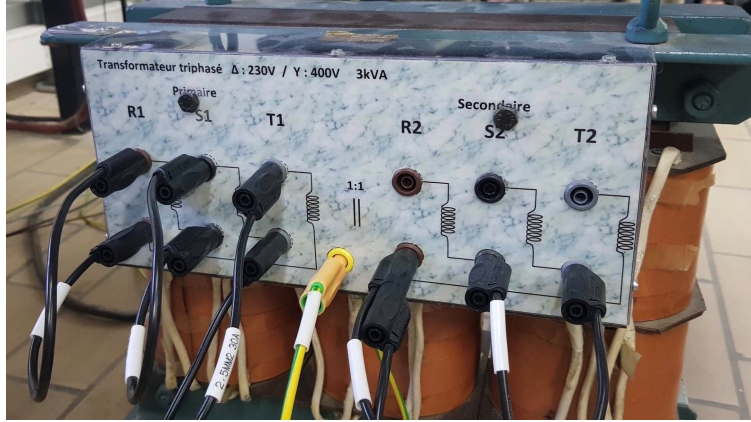


Figure 3: Photographie de la plaque signalétique

Nous considérerons dans cette expérience que le primaire est alimenté et le secondaire court-circuité, nous pratiquons donc un essai en court-circuit par le primaire.

A partir du courant de ligne primaire I_1 , de la tension de ligne primaire U_{1L} et de la puissance absorbée P_1 et des mesures des résistances DC, on détermine l'impédance étoile équivalente au transformateur (Z'_e sur circuit monophasé équivalent) de laquelle on déduit R_1 , R_2 , X_1 et X_2 . Cette impédance est due aux faits qu'une partie du flux généré par les bobinages passe en dehors du circuit magnétique et que les enroulements primaires et secondaires du transformateur présentent une résistance électrique non négligeable.

U _{1L}			I _{1R}			I _{1S}			I _{1T}			I _{1L}			P _{1L}		
Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur				Lecture	Constante	Valeur
5,783333			4,3	1	4,3	3,35	1	3,35	3,7	1	3,7	3,783333333			0,55	25	13,75

Figure 4: Résultats de l'essai en court-circuit

6.2 Hypothèses

- On suppose $Z_\mu \gg Z'_e$, autrement dit aucun courant ne passe dans Z_μ lors de l'essai
- De même, pour la phase de l'impédance Z'_e qu'on supposera la même que si on avait court-circuité l'étage primaire.

6.3 Calculs théoriques

En suivant ces hypothèses, les équations qui nous permettent de déterminer la valeurs de l'impédance sur base des mesures sont les suivantes:

$$\begin{cases} Z'_e = \frac{U_{1L}}{\sqrt{3} \cdot I_1} \\ \cos(\phi_e) = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot I_1 \cdot U_{1L}} \end{cases}$$

6.3.1 R'_e et X'_e

L'impédance Z'_e pouvant s'exprimer comme la somme d'une partie complexe et d'une partie réelle selon $Z'_e = R'_e + jX'_e$

$$\begin{cases} R'_e = Z'_e \cdot \cos(\phi_e) \\ X'_e = Z'_e \cdot \sin(\phi_e) \end{cases}$$

6.3.2 R_1, R_2, X_1 et X_2

Enfin, on peut exprimer Z'_e en séparant les composantes de l'étage primaire et secondaire comme

$$Z'_e = R_1 + k^2 R_2 + j(X_1 + k^2 X_2)$$

N'ayant pas d'information sur X_1 et X_2 , on suppose que $X_1 = X_2$, ce qui nous amène à la relation suivante:

$$\begin{cases} X_1 = \frac{X'_e}{2} \\ X_2 = \frac{X'_e}{2 \cdot k^2} \end{cases}$$

En ce qui concerne les résistances R_1 et R_2 , les mesures DC peuvent nous permettre de déterminer leur valeur: En supposant $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{1DC}}{R_{2DC}}$, on trouve

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R'_e}{R_{1DC} + k^2 R_{2DC}} R_{1DC} \\ R_2 = \frac{R'_e}{R_{1DC} + k^2 R_{2DC}} R_{2DC} \end{cases}$$

6.4 Niveau de courant et résultats

insérer tableau ici

On obtient donc sur base de ces résultats:

$$\begin{cases} Z'_e = \frac{5.75}{3.783 \cdot \sqrt{3}} = 0.877[\Omega] \\ \cos(\phi_e) = \frac{13.75}{\sqrt{3} \cdot 3.783 \cdot 5.75} = 0.365 \end{cases}$$

6.4.1 R'_e et X'_e

$$\begin{cases} R'_e = 0.32[\Omega] \\ X'_e = 0.817[\Omega] \end{cases}$$

6.4.2 R_1, R_2, X_1 et X_2

$$\begin{cases} X_1 = 0.409[\Omega] \\ X_2 = 1.226[\Omega] \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R'_e}{R_{1DC} + k^2 R_{2DC}} R_{1DC} = 0.16[\Omega] \\ R_2 = \frac{R'_e}{R_{1DC} + k^2 R_{2DC}} R_{2DC} = 0.48[\Omega] \end{cases}$$

6.5 Vérification des hypothèses

La valeur obtenue : $Z'_e = 0.877$ est à comparer avec la valeur de Z_μ afin de s'assurer que les hypothèses sont respectées.

Après avoir effectué l'essai à vide, on observe bien que $200 \gg 0.9$. L'hypothèse est donc valide ainsi que les équations sur laquelle elles sont construites.

7 Essai à vide standard

7.1 Utilité de l'essai et mode opératoire

L'essai à vide vise à mettre en évidence la valeur de R_p , les pertes magnétiques et X_{μ} . Il s'effectue en alimentant un des enroulements à la tension nominale, et l'autre à circuit ouvert. Ici, l'essai se fait par le primaire, c'est à dire que le primaire est alimenté en tension nominale (230V), et le secondaire à vide. On ajuste la tension de ligne primaire à la valeur nominale et mesure le courant de ligne et la puissance absorbée. Cela permet de déterminer l'impédance triphasée équivalente au transformateur. Celle-ci vaut:

$$Z_0 = R_1 + jX_1 + \frac{jX_\mu R_p}{R_p + jX_\mu}$$

U_1RS			I_oS			I_oR			I_oT			I_o			P_o		
Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur
110	0.57735	64	1.25	0.1	0.125	1.54	0.1	0.154	1.2	0.1	0.12	0.133			0.2	100	20
160	0.57735	92	1.95	0.1	0.195	2.5	0.1	0.25	1.8	0.1	0.18	0.208333333			0.39	100	39
210	0.57735	121	3.73	0.1	0.373	4.67	0.1	0.467	3.71	0.1	0.371	0.403666667			0.64	100	64
220	0.57735	127	2.53	0.2	0.506	3.2	0.2	0.64	2.52	0.2	0.504	0.55			0.38	200	76
230	0.57735	133	3	0.2	0.6	3.85	0.2	0.77	3.1	0.2	0.62	0.663333333			0.41	200	82

Figure 5: Résultats de l'essai a vide standard

7.2 Hypothèses

- On suppose que la résistance du bobinage primaire et sa réactance de fuites sont très faibles devant l'impédance de magnétisation ($Z_\mu = R_p // jX_\mu$), autrement dit $Z_o \simeq Z_\mu$

7.3 Calculs théoriques

En suivant ces hypothèses, les équations qui nous permettent de déterminer la valeur de l'impédance sur base des mesures sont les suivantes:

$$\begin{cases} Z_\mu = \frac{U_{1L}}{\sqrt{3} \cdot I_1} \\ \cos(\phi_\mu) = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot I_1 \cdot U_{1L}} \end{cases}$$

L'impédance Z_μ présente la mise en parallèle d'une résistance et d'une inductance.

$$\begin{cases} R_p = \frac{Z_\mu}{\cos(\phi_\mu)} \\ X_\mu = \frac{Z_\mu}{\sin(\phi_\mu)} \end{cases}$$

7.4 Niveau de courant et résultats

insérer tableau ici

On obtient donc sur base de ces résultats:

$$\begin{cases} Z_\mu = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 0.6} = 200.18[\Omega] \\ \cos(\phi_\mu) = \frac{82}{\sqrt{3} \cdot 0.6 \cdot 230} = 0.93 \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_p = \frac{200.18}{0.93} = 215[\Omega] \\ X_\mu = \frac{200.18}{0.36} = 548.14[\Omega] \end{cases}$$

7.5 Vérification des hypothèses

On remarque en effet que $R_p \ll R_1$.

8 Essais à vide non-standard

8.1 Utilité de l'essai et mode opératoire

De manière générale, comme dit ci-dessus, l'essai à vide vise à mettre en évidence les valeurs d'impédances en parallèles (R_p et X_μ), en alimentant un des enroulements à la tension nominale, et l'autre à circuit ouvert. Ici, l'essai se fait par le primaire, mais est alimenté de manière non-standard au dessus de sa tension nominale ce qui permet de pouvoir observer le phénomène de saturation magnétique.

U_IRS			I_oS			I_oR			I_oT			I_o	P_o		
Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur	Lecture	Constante	Valeur		Lecture	Constante	Valeur
110	0,57735	64	1,25	0,1	0,125	1,54	0,1	0,154	1,2	0,1	0,12	0,133	0,2	100	20
160	0,57735	92	1,95	0,1	0,195	2,5	0,1	0,25	1,8	0,1	0,18	0,208333333	0,39	100	39
210	0,57735	121	3,73	0,1	0,373	4,67	0,1	0,467	3,71	0,1	0,371	0,403666667	0,64	100	64
220	0,57735	127	2,53	0,2	0,506	3,2	0,2	0,64	2,52	0,2	0,504	0,55	0,38	200	76
230	0,57735	133	3	0,2	0,6	3,85	0,2	0,77	3,1	0,2	0,62	0,663333333	0,41	200	82
240	0,57735	139	2,25	0,4	0,9	2,7	0,4	1,08	2,1	0,4	0,84	0,94	0,25	400	100
250	0,57735	144	2,63	0,4	1,052	3,35	0,4	1,34	2,59	0,4	1,036	1,142666667	0,275	400	110
260	0,57735	150	3,75	0,4	1,5	4,65	0,4	1,86	3,65	0,4	1,46	1,606666667	0,35	400	140

Figure 6: Résultats de l'essai a vide non-standard

8.2 Hypothèses

- On suppose $Z_\mu \gg Z'_e$
- On suppose qu'aucun courant ne passe dans le secondaire. C'est à dire que tout le courant passe par Z_μ .

8.3 Caractéristiques magnétiques

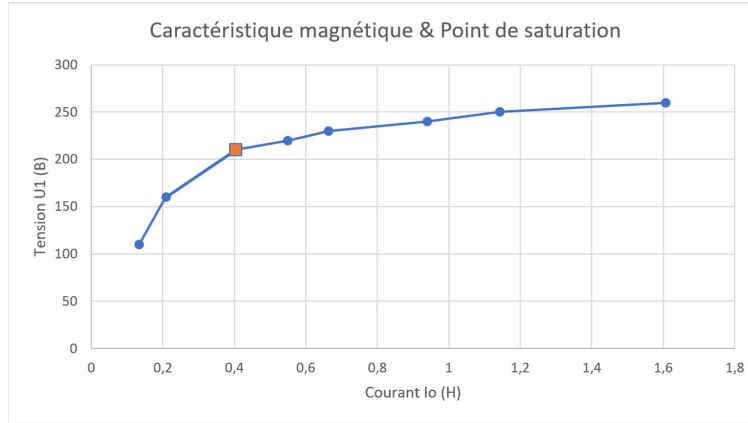


Figure 7: Caractéristique magnétique et point de saturation du transformateur

Le graphe ci-dessus représente la tension primaire en fonction du courant primaire. Cette courbe permet d'illustrer la caractéristique $\mathbf{B} - \mathbf{H}$ du transformateur. En effet, les formules suivantes montrent la relation qui existe entre la tension et le champ \mathbf{B} ainsi que le courant et le champ \mathbf{H} .

$$\begin{aligned}\phi &= \int_{\mathbf{S}} \mathbf{B} \, d\mathbf{S} \\ \psi &= n \cdot \phi \\ u &= \frac{\partial \psi}{\partial t} \\ n \cdot I &= \int_{\Gamma} \mathbf{H} \, d\mathbf{l}\end{aligned}$$

Pour des valeurs de tension sous la valeur nominale, on peut approximer l'évolution de la tension en fonction du courant par une fonction linéaire ou les pertes fer seront faibles. Pour des valeurs de tension supérieure à la valeur nominale, le courant magnétisant augmente rapidement et engendre une surchauffe du noyau magnétique. C'est une zone de forte saturation. La tension nominale marque la séparation entre la zone linéaire et la zone de saturation.¹

9 Essais en charge

9.1 Description de l'essai

Une charge triphasée est connectée aux bornes secondaires du transformateur à l'essai. Un voltmètre est connecté au secondaire pour observer la variation de la tension secondaire en fonction de la charge. On insère aussi un ampèremètre au secondaire pour mesurer le

¹La tension nominale est représentée par le carré en orange sur le graphe.

courant de ligne (on suppose les courants de charge équilibrés). Après avoir vérifié que les calibres des appareils sont corrects, en particulier ceux des circuits de tension (wattmètres et voltmètres), on applique la tension nominale au primaire.

Sans dépasser la valeur nominale du courant secondaire, en maintenant la tension primaire à sa valeur nominale et en vérifiant le courant primaire afin de ne pas surcharger le wattmètre, on mesure la tension et le courant au secondaire ainsi que la puissance au primaire, pour des charges croissantes.

Cet essai a pour but de déterminer les caractéristiques externes, ainsi que le rendement en fonction des courants de charge et primaire.

L'essai en charge a eu lieu avec 4 charges (Z_L) de valeurs distinctes. les charges fournies avait chacune des valeurs réelles différentes et des parties imaginaires nulles ($\cos(\phi_L) = 1$).

9.2 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont les suivants:

P1 [W]	I1 [A]	U2 [V]	I2 [A]
0.5	1.43	387	0.618
0.95	2.45	391	1.24
1.36	3.5	390	1.86
1.8	17.78	391	2.49

9.3 Schéma équivalent

Le schéma équivalent monophasé est celui indiqué à la figure 8 avec les valeurs suivantes:

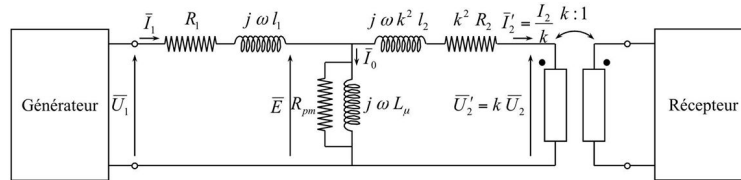


Figure 8: Schéma équivalent

R_1	0.16 [Ω]
X_1	0.41 [Ω]
R_2	0.48 [Ω]
X_2	3.68 [Ω]
R_p	215 [Ω]
X_μ	548.14 [Ω]

9.4 Caractéristique externe

La chute de tension théorique $\Delta U_{2L} = U_{20L} - U_{2L}$ peut être déterminée grâce à un diagramme de Kapp sur base des mesures.

D'après la relation de Kirchoff sur le secondaire:

$$\mathbf{U}_{2\mathbf{L}} + \mathbf{Z}'_e \mathbf{I}_2 = \mathbf{U}_{20\mathbf{L}} \quad \text{[commentaire]}$$

Avec $\mathbf{Z}'_e = \mathbf{Z}_e \cdot k^2$

On peut sur base de ces informations tracer le diagramme de Kapp de la figure 10

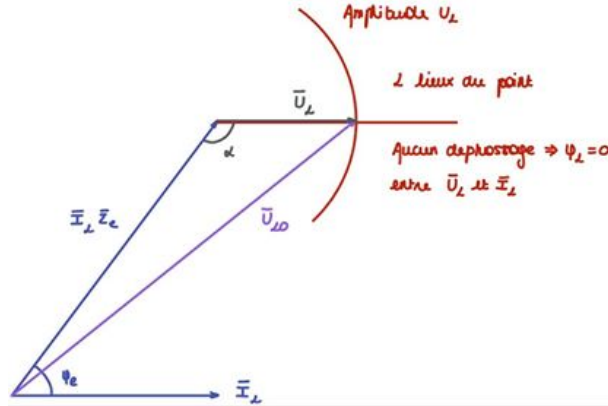


Figure 9: Diagramme de Kapp

De ce dernier, on établit une relation de Pythagore généralisée à partir de laquelle on peut déterminer $\mathbf{U}_{2\mathbf{L}}$ et donc ΔU_{2L} .

$$U_{20}^2 = (Z_e I_2)^2 + U_2^2 - 2U_2 Z_e I_2 \cos(\alpha)$$

Avec $\alpha = \pi - \phi_e$

$$U_{20}^2 = (Z_e I_2)^2 + U_2^2 + 2U_2 Z_e I_2 \cos(\phi_e)$$

$$\Leftrightarrow U_2^2 + U_2 \cdot 2I_2 Z_e \cos \phi_e + (I_2 Z_e)^2 - U_{20}^2 = 0$$

C'est une équation du second degré en U_2 qu'il faut résoudre. Les valeurs utilisées sont les suivantes :

Paramètre	$U_{20} = \frac{U_{20L}}{\sqrt{3}}$	$Z_e = \frac{Z'_e}{k^2}$	I_2	$\cos(\phi_e)$
Unités	[V]	[Ω]	[A]	[/]
Essai 1	230	2.631	0.618	0.365
Essai 2	230	2.631	1.24	0.365
Essai 3	230	2.631	1.86	0.365
Essai 4	230	2.631	2.49	0.365

On trouve pour les 4 cas de charge et selon l'ordre des mesures (après être repassé en

tension de ligne):

$$U_{2L} = \begin{pmatrix} 397.29 \\ 396.30 \\ 395.12 \\ 394.00 \end{pmatrix} [V]$$

et donc

$$\Delta U_{2L} = \begin{pmatrix} 1.08 \\ 2.07 \\ 3.25 \\ 4.37 \end{pmatrix} [V]$$

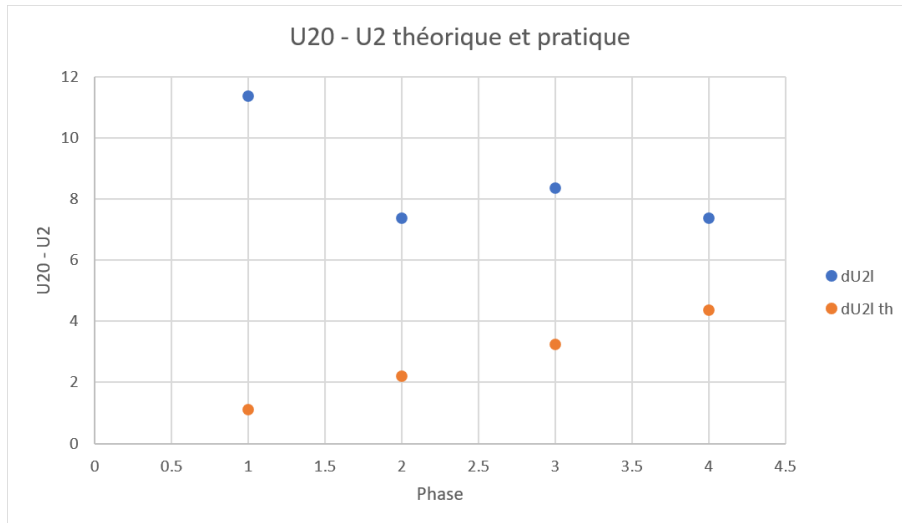


Figure 10: Graphique de ΔU_{20L} théoriques et expérimentaux

9.5 Rendement

Le rendement se définit comme

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{pertes}} = \frac{\sqrt{3}U_{2L}I_2\cos(\phi_L)}{\sqrt{3}U_{2L}I_2\cos(\phi_L) + P_{fer} + P_{Joule}}$$

Avec P_{fer} les pertes dues à la perméabilité non-infinie du matériau ferromagnétique dans le circuit magnétique et P_{joule} celles dues aux résistances parasites.

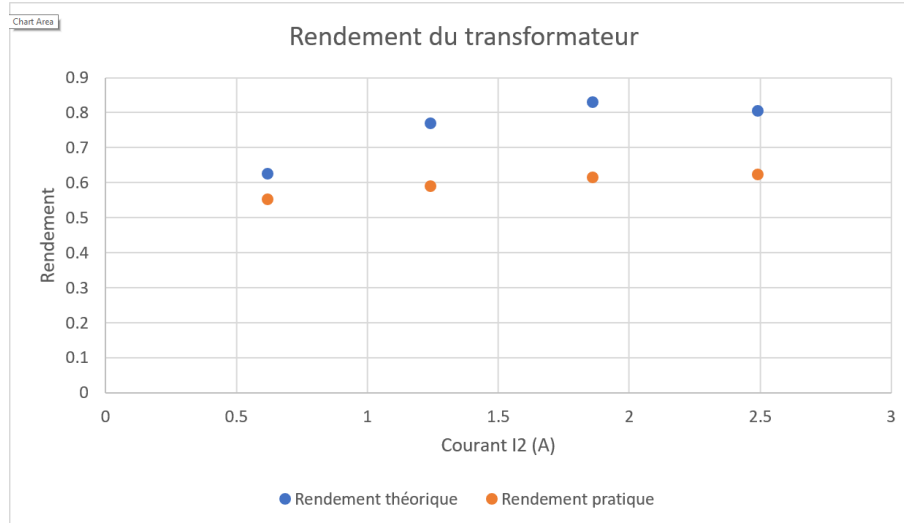


Figure 11: Graphique du rendement théorique et pratique du transformateur

Dans notre cas, la charge étant purement réelle, on peut encore écrire la relation comme

$$\eta = \frac{\sqrt{3}U_{2L}I_2}{\sqrt{3}U_{2L}I_2 + P_{fer} + P_{Joule}} = \frac{\sqrt{3}U_{2L}I_2}{\sqrt{3}U_{2L}I_2 + \underbrace{\frac{U_{1L}^2}{R_p}}_{P_{fer}} + \underbrace{3R_2I_2^2 + 3R_1I_1^2}_{P_{Joule}}}$$

On trouve donc comme rendement pour les 4 essais en charge

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.63 \\ 0.76 \\ 0.83 \\ 0.8 \end{pmatrix}$$

La Figure 11 montre le rendement théorique et pratique du transformateur. Toutefois, il faut regarder le rendement pratique avec un oeil critique, nous ne sommes pas persuadés d'avoir bien pris note du calibre utilisé, dans la hâte. Le calcul théorique aussi, est basé sur des valeurs de composantes mesurées expérimentalement. L'accumulation des erreurs de lecture peut avoir un impact considérable sur le résultat final. Ceci explique la différence entre les deux courbes.

Le calcul théorique est basé sur des valeurs de composantes mesurées expérimentalement. L'accumulation des erreurs de lecture peut avoir un impact considérable sur le résultat final. Ceci explique la différence entre les deux courbes.

9.6 Courant primaire

Le courant primaire théorique peut être déterminé grâce à l'équation

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + \frac{\mathbf{I}_2}{k^2}$$

Pour la suite du raisonnement U_1 sera la référence de phase

L'essai étant réalisé avec une tension nominale au primaire, \mathbf{I}_0 a la même valeur que lors de l'essai à vide :

$$I_0 = \frac{U_{1L}}{\sqrt{3} \cdot Z_\mu} = 0.66 \angle -21.56^\circ$$

La charge étant purement réelle, \mathbf{I}_2 a la même phase que \mathbf{U}_{2L} . On peut également affirmer comme le rapport de transformation est purement réel que \mathbf{U}_{1L} a la même phase que \mathbf{U}_{20L} .

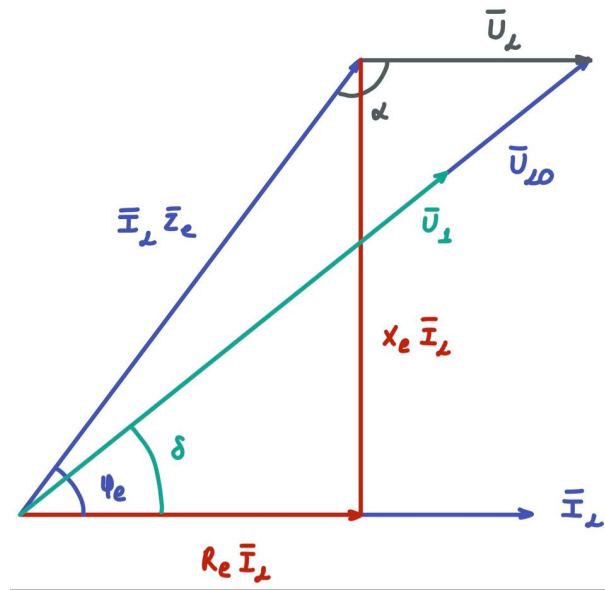


Figure 12: Diagramme de Kapp

Sur base de ces affirmations et du diagramme de Kapp de la figure 12, on peut déterminer la phase de \mathbf{I}_2 qui est égale à $-\delta$

$$\delta = \arctan\left(\frac{X_2 I_2}{R_e I_2 + U_2}\right) = \arctan\left(\frac{X_2 I_2}{R_e I_2 + \frac{U_{2L}}{\sqrt{3}}}\right)$$

et donc

$$\mathbf{I}_2 = I_2 \angle -\delta$$

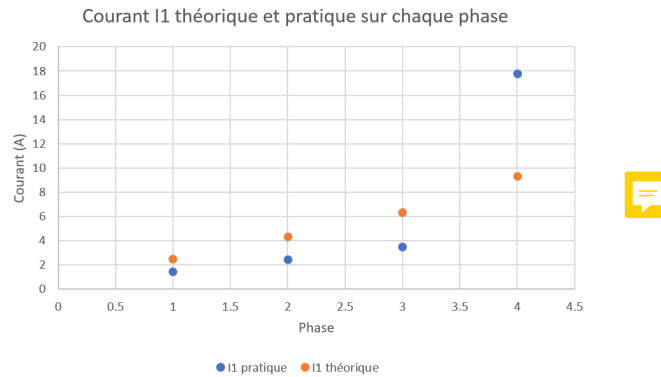


Figure 13: I1 théorique et pratique pour chaque phase

On trouve théoriquement pour les 4 charges:

$$I_1 = \begin{pmatrix} 2.48 \\ 4.34 \\ 6.3 \\ 9.29 \end{pmatrix} [A]$$

La Figure 13 montre la valeur théorique et pratique pour les courants équivalents à chaque phase. Nous expliquons la différence entre les deux par l'accumulation de petites erreurs de mesure lors des essais.

10 Conclusion

Nous pouvons résumer ce laboratoire en quatre étapes.

Premièrement, nous avons pris connaissance des données de base pour les calculs du laboratoire, à savoir :

- Les connexions des enroulements
- Les valeurs nominales
- La mesure des résistances DC

Ces données ont servi de base pour les calculs du laboratoire.

Ensuite, nous avons déterminé les composantes du circuit équivalent monophasé. Les éléments en série ont été trouvés lors de l'essai en court circuit, sous l'hypothèse que l'impact des éléments parallèles pouvait être négligés. Les éléments en parallèle ont été trouvés lors de l'essai à vide standard, sous l'hypothèse que les éléments en série pouvait être négligés. D'ailleurs, ces deux hypothèses seront confirmées au vu des valeurs obtenues en accord avec

le transformateur triphasé.

Ensuite, l'essai à vide non standard a permis d'observer graphiquement la caractéristique $\mathbf{B} - \mathbf{H}$ du transformateur. Une relation plus ou moins linéaire en dessous d'un certain point et un comportement de saturation a pu être observé.

Enfin, l'essai en charge nous a permis de comparer les attentes théoriques, obtenues grâce au modèle du circuit trouvé, et les résultats expérimentaux.