



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie électrique et génie informatique

Éléments de circuit en courant alternatif et Transformateurs de puissance

GEL362,GEL342

Présenté à

Serge Apedovi Kodjo

Présenté par

Alexis Juteau

Shawn Miller-Morneau

Sherbrooke - 20 juin 2022

Table des matières

1	Introduction	1
2	Description du cahier des charges et des contraintes	1
3	Question 1 : observation des phénomènes magnétiques.....	2
3.1	Schéma en bloc de la problématique.....	2
3.2	Les résultats d'amplitude et la forme d'onde du flux magnétique	2
3.3	Les résultats d'amplitude de l'induction magnétique circulant dans le noyau du transformateur	2
3.4	Évaluation perte par hysteresis	3
3.5	Rôle du circuit intégrateur.....	4
3.6	Évaluation des pertes par hystérésis dans le transformateur	5
4	Question 2 : circuit équivalent et puissance dissipée	5
4.1	Circuit équivalent du transformateur.....	5
4.2	Dissipation de chaleur du transformateur(thermique)	7
4.3	Calcul de la charge passive à la sortie du transformateur.....	8
4.4	Valeur théorique de la puissance dissipé pendant la recharge du véhicule.....	9
4.5	Le rendement du transformateur pendant la recharge	9
4.6	La régulation de tension du transformateur pendant la recharge d'un véhicule	9
4.7	L'énergie totale dissipée dans ces transformateurs pendant une année en Joules et en kWh	10
4.8	L'estimation du montant total des pertes dans ces transformateurs à l'échelle du Québec	10
5	Question 3 : correction du facteur de puissance.....	11
5.1	Le schéma électrique illustrant la charge équivalent R-L, le condensateur C et le transformateur	11
5.2	Le calcul théorique de la valeur du facteur de puissance vu par la source 120 V de la borne de recharge.....	11
5.3	Le calcul théorique de la valeur de la capacité du condensateur C pour la correction du facteur de puissance	11

5.4	La valeur expérimentale du courant ainsi que son déphasage par rapport à la tension d'alimentation avec et sans condensateur de correction	12
5.5	Réponse au question	13
5.5.1	Corection de facteur de puissance avec un condensateur, dépassement ?	13
5.5.2	Réduction des pertes avec le condensateur à l'entrée du primaire . .	13
6	Question 4 : transformateur monophasé utilisé en auto-transformateur et borne de recharge à 240V.....	13
6.1	fonctionnement auto-transformateur monophasé	13
7	Question 5 : Connexions du transformateur triphasé du point de livraison	14
7.1	Meilleur type de connection d'alimentation pour les bornes de recharge et les immeubles	14
7.2	modèle équivalent monophasé	15
7.3	La valeur efficace de la tension ligne-ligne du réseau de distribution.....	15
8	Conclusion	16

Table des figures

1	Schéma en bloc	2
2	Courbe d'hysteresis prise en laboratoire	4
3	Courbe d'hysteresis avec Matlab	4
4	Circuit équivalent du transformateur	5
5	Circuit équivalent simplifié vue du primaire	5
6	Circuit équivalent en circuit ouvert	6
7	Circuit équivalent en court-circuit	6
8	Gauche : Court-circuit Droite : à vide	7
9	Schéma électrique avec charge et condensateur	11
10	Modèle auto-transformateur	14
11	Modèle équivalent transformateur monophasé en pu du transformateur tri- phasé	15

1 Introduction

D'une part, la problématique traite des phénomènes liés aux circuits en courant alternatif, ainsi que des transformateurs de puissance. Les pratiques scientifiques dans ce domaine d'étude sont l'électromagnétisme, l'analyse de circuit à courant alternatif, l'application des concepts de puissance et les phénomènes d'échange de chaleur(thermique). Concrètement, il est demandé d'étudier la mise en place de 1 250 000 bornes de recharges au Québec. Plus précisément, il est demandé d'observer les phénomènes magnétiques en partant du réseau et en transformant les signaux (avec transformateur triphasé et monophasé) pour alimenter un chargeur de 780W et 0.9 de facteur de puissance.

2 Description du cahier des charges et des contraintes

Laboratoire 1 : Au laboratoire 1, le but était de mesurer les pertes par hystérésis, de prendre les mesures de puissance du transformateur à vide et en cours circuit. Ces mesures permettent de calculer et de simuler avec Matlab les pertes par hystérésis (en changeant les voies 1 et 2 avec H et B), et de calculer les pertes par phénomènes d'échange de chaleur. En outre, ce laboratoire permet de se familiariser avec un transformateur triphasé Dy11.

Laboratoire 2 : Au laboratoire 2, le but était de valider RL et C pour respecter le facteur de puissance de 0.9 et puissance de charge de 780W. En outre, ce laboratoire permet de se familiariser avec un transformateur triphasé Dy1.

3 Question 1 : observation des phénomènes magnétiques

3.1 Schéma en bloc de la problématique

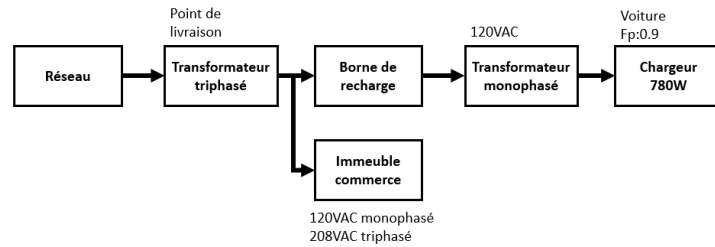


FIGURE 1 – Schéma en bloc

3.2 Les résultats d'amplitude et la forme d'onde du flux magnétique

À l'aide de la bobine exploratrice, il est possible de mesurer la tension efficace à 1 tour du transformateur. Cette valeur permet de calculer la valeur de la densité du flux maximal qui est générée dans le noyau.

$$V_{eff} = 4.44fNB_{max}A \quad (1)$$

$$1.58V = 4.44 * 60Hz * 1tour * B_{max} * (48.39cm^2)$$

$$B_{max} = 1.22Tesla$$

3.3 Les résultats d'amplitude de l'induction magnétique circulant dans le noyau du transformateur

Avec B_{max} , il est maintenant possible de trouver le flux magnétique du transformateur.

$$B_{max} = \mu_0 H_{max} \quad (2)$$

$$H_{max} = \frac{1.22T}{4\pi * 10^{-7}}$$

$$H_{max} = 970k \frac{A}{m}$$

3.4 Évaluation perte par hysteresis

$$FMM = NI = Hl \quad (3)$$

$$NI = \frac{\phi_c}{\mu_0 \mu_R AC} * (L_C + L_D)$$

$$FMM = H(l_C + L_D)$$

$$NI = H(l_C + L_D)$$

$$H = \frac{NI}{l_C + L_D} \quad (4)$$

$$H = \frac{75 * I}{38.1cm}$$

$$V = \frac{1}{RC} \int V dt \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{NA} \int e dt \quad (6)$$

$$B = \frac{V * RC}{NA}$$

$$B = \frac{V * 3.3M\Omega * 0.1\mu F}{75 * 48.39cm^2}$$

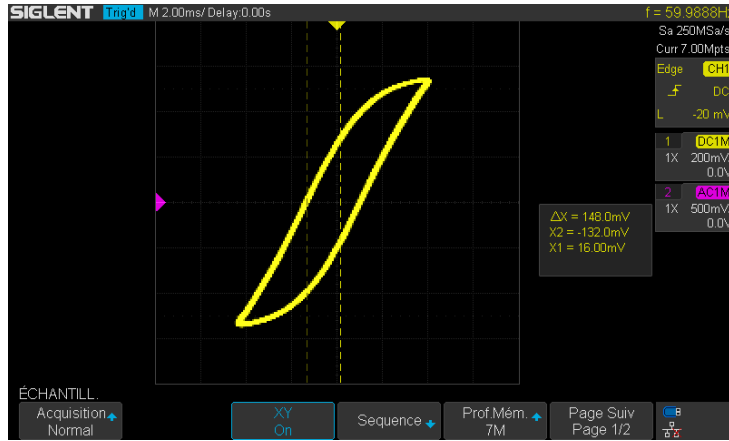


FIGURE 2 – Courbe d’hysteresis prise en laboratoire

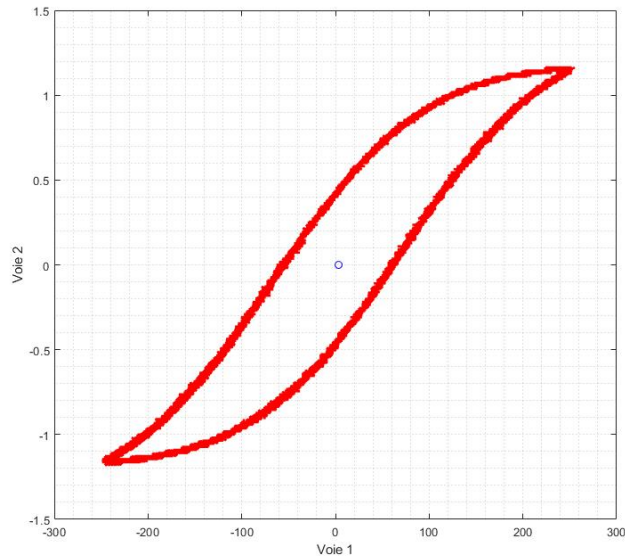


FIGURE 3 – Courbe d’hysteresis avec Matlab

3.5 Rôle du circuit intégrateur

À la sortie de la bobine monophasée secondaire, un circuit RC permet de faire l’intégration du potentiel électrique par nombre de tours de bobine. Le circuit intégrateur permet donc d’obtenir le flux magnétique, sois représenté par la formule suivante :

$$\Phi = \frac{1}{N} \int e * dt \quad (7)$$

3.6 Évaluation des pertes par hystérésis dans le transformateur

$$S_{BH} = \text{Surface sous la courbe } B(H)$$

$$\text{Volumeduferr} = V_f$$

$$\text{PertesHyst.} = fV_f S_{BH} \quad (8)$$

4 Question 2 : circuit équivalent et puissance dissipée

4.1 Circuit équivalent du transformateur

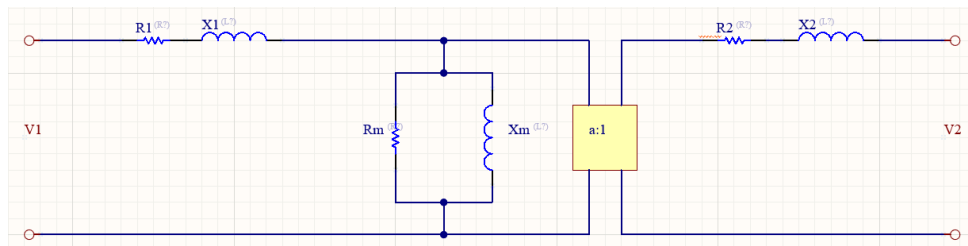


FIGURE 4 – Circuit équivalent du transformateur

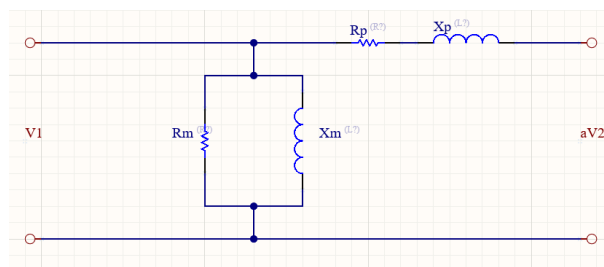


FIGURE 5 – Circuit équivalent simplifié vue du primaire

Pour trouver les valeurs des composants de la branche magnétique, les calculs se feront avec les valeurs mesurées en laboratoire en configuration circuit ouvert à la borne secondaire du transformateur.

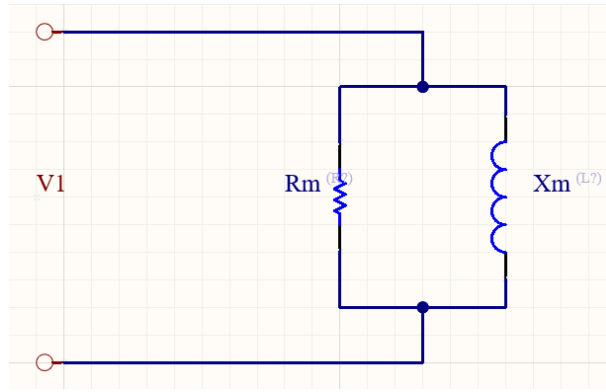


FIGURE 6 – Circuit équivalent en circuit ouvert

$$V_1 = 119.8V$$

$$I_1 = 1.04A$$

$$P = 52W$$

$$R_m = \frac{V^2}{P} = \frac{119.8^2}{52} = 276\Omega \quad (9)$$

$$X_m = \frac{V^2}{Q}j = \frac{V^2}{\sqrt{S^2 - P^2}}j = \frac{119.8^2}{\sqrt{(119.8 * 1.04)^2 - 52^2}}j = j106\Omega \quad (10)$$

Maintenant que les valeurs de la branche magnétique à été trouvées, il est possible de calculer les valeurs de Rp et Xp avec la configuration en cours circuit.

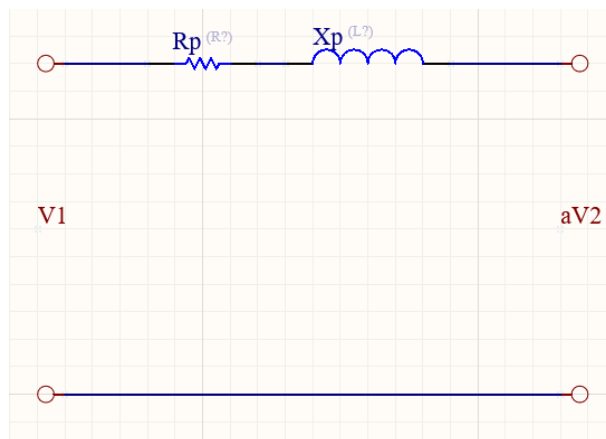


FIGURE 7 – Circuit équivalent en cours circuit

$$V_1 = 10.1V$$

$$I_1 = 8.29A$$

$$P = 80.8W$$

$$R_p = \frac{V^2}{P} = \frac{10.1^2}{80.8} = 1.2625\Omega$$

$$X_p = \frac{V^2}{Q}j = \frac{V^2}{\sqrt{S^2 + P^2}}j = \frac{10.1^2}{\sqrt{(10.1 * 8.29)^2 + 80.8^2}}j = j0.876\Omega$$

4.2 Dissipation de chaleur du transformateur(thermique)

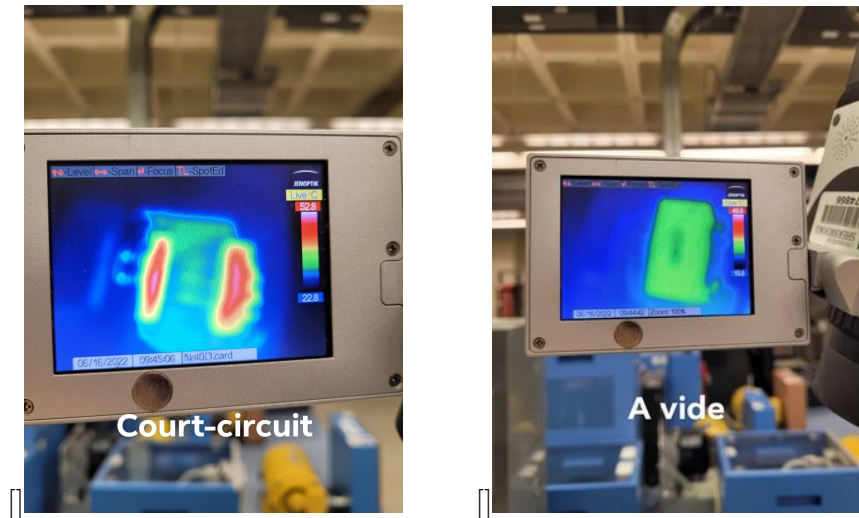


FIGURE 8 – Gauche : Court-circuit Droite : à vide

Lorsqu'on ne met pas de charge à la sortie(flottante), on obtient une faible dissipation de chaleur due l'excitation du transformateur. Lorsqu'on met un court-circuit à la sortie, une plus grande dissipation de chaleur est générée, puisqu'étant donné une charge nulle(court-circuit), le courant maximal traverse les bobines du transformateur, donc une puissance très élevée est dissipée. En ce qui concerne les causes physiques, on voit qu'à vide, c'est le noyau ferromagnétique qui chauffe seulement et qu'en court-circuit les bobines chauffent plus que le noyau(dû à plus de courant traversant les bobines).

4.3 Calcul de la charge passive à la sortie du transformateur

Pour trouver la valeur de la charge, il faut commencer par appliquer la loi des boucles.

$$V_1 = Z * I_1 \quad (11)$$

$$V_1 = ((R_p + a^2 R_{ch}) + j(X_p + a^2 X_{ch})) * I_1$$
$$\left(\frac{V_1}{I_1}\right)^2 = (1.2625 + a^2 R_{ch})^2 + j(0.876 + a^2 X_{ch})^2$$

$$P_{ch} = I^2 a^2 R_{ch} \quad (12)$$

$$I^2 = \frac{780W}{a^2 R_{ch}}$$

$$FP = 0.9$$

$$\theta = \cos^{-1}0.9 = 25.84$$

$$\tan\theta = \frac{X_{ch}}{R_{ch}}$$

$$X_{ch} = 0.484 R_{ch}$$

$$\left(\frac{V_1}{\frac{780}{a^2 R_{ch}}}\right)^2 = (1.2625 + a^2 R_{ch})^2 + j(0.876 + a^2 0.484 R_{ch})^2$$

$$0 = 962.72 R_{ch}^2 - 11769.08 R_{ch} + 1841.8$$

Avec l'équation de quadratique,

$$R_{ch} = 12\Omega$$

$$X_{ch} = 0.484 R_{ch}$$

$$X_{ch} = 0.484 * 12\Omega$$

$$X_{ch} = 5.8\Omega$$

Calcul de L :

$$X_L = 2\pi f L$$

$$5.8j\Omega = 2\pi 60Hz L$$

$$L = \frac{5.8j\Omega}{2\pi 60Hz}$$

$$L = 15.38mH$$

4.4 Valeur théorique de la puissance dissipé pendant la recharge du véhicule

$$P_{pertes} = P_m + P_p$$

$$P_{pertes} = \frac{V^2}{R_m} + R_p I^2$$

$$P_{pertes} = \frac{120^2}{276} + 1.2625 * 8.08^2$$

$$P_{pertes} = 134.6W$$

4.5 Le rendement du transformateur pendant la recharge

$$Rendement = \frac{P_{ch}}{P_{in}} = \frac{P_{ch}}{P_{charge} + P_{pertes}} \quad (13)$$

$$Rendement = \frac{P_{ch}}{P_{ch} + P_{pertes}}$$

$$Rendement = \frac{780}{780 + 134.6}$$

$$Rendement = 85.04\%$$

4.6 La régulation de tension du transformateur pendant la recharge d'un véhicule

$$Régulation = \frac{V_{avide} - V_{ch}}{V_{avide}} * 100 \quad (14)$$

$$Régulation = \frac{120 - 107.69}{120} * 100$$

$$Régulation = 10.258\%$$

4.7 L'énergie totale dissipée dans ces transformateurs pendant une année en Joules et en kWh

$$P_{dissipéetotal} = P_{borne} * nbrBornes * nbrHeures * 1an$$

$$P_{dissipéetotal} = 134.6W * 1250000 * 12h * 365jours$$

$$P_{dissipéetotal} = 738.935e^{+6}kWh$$

$$P_{dissipéetotal} = 2,660166e^{+15}Joules$$

4.8 L'estimation du montant total des pertes dans ces transformateurs à l'échelle du Québec

$$Montant_{dissipéePertes} = P_{dissipéetotal} * 0.08\$$$

$$Montant_{dissipéePertes} = 738.935e^{+6}kWh * 0.08\$$$

$$Montant_{dissipéePertes} = 58.954e^{+9}\$$$

5 Question 3 : correction du facteur de puissance

5.1 Le schéma électrique illustrant la charge équivalent R-L, le condensateur C et le transformateur

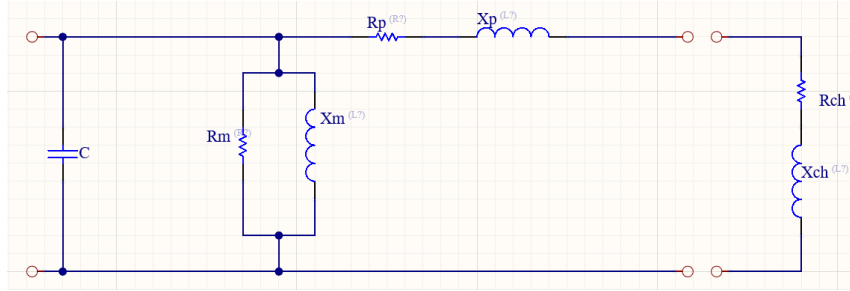


FIGURE 9 – Schéma électrique avec charge et condensateur

5.2 Le calcul théorique de la valeur du facteur de puissance vu par la source 120 V de la borne de recharge

$$FP = \frac{P_{source}}{S_{source}} \quad (15)$$

$$FP = \frac{P_{perte} + P_{ch}}{V_1 I_1 + \frac{v_1^2}{X_m}}$$

$$FP = \frac{134.6 + 780}{120 * 8.08 + \frac{120^2}{106}}$$

$$FP = 94.2\%$$

5.3 Le calcul théorique de la valeur de la capacité du condensateur C pour la correction du facteur de puissance

$$Q = \frac{V_1^2}{X_m} + (X_p * I_2^2) + (X_{ch} * I_2^2) \quad (16)$$

$$Q = \frac{120V^2}{106\Omega} + (0.876\Omega * 8.08A) + (5.8\Omega * 8.08A)$$

$$Q = 542.18W$$

$$X_c = \frac{V_1^2}{X_c} \quad (17)$$

$$X_c = \frac{120V^2}{542.18W}$$

$$X_c = 26,56j\Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} \quad (18)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

$$C = 99\mu F$$

5.4 La valeur expérimentale du courant ainsi que son déphasage par rapport à la tension d'alimentation avec et sans condensateur de correction

Sans le condensateur

$$P = VI \cos(\phi) \quad (19)$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{P}{VI}$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{955.1}{119.7 * 9.02}$$

$$\phi = 27.8^\circ$$

Avec le condensateur

$$\phi = \cos^{-1} \frac{969.1}{120.3 * 8.07}$$

$$\phi = 3.41^\circ$$

5.5 Réponse au question

5.5.1 Corection de facteur de puissance avec un condensateur, dépassement ?

Non, la capacité ne sera pas dépassée, car F_p sera corrigé. C'est-à-dire que la puissance apparente deviendra nulle, donc la consommation de puissance sera moins élevée.

5.5.2 Réduction des pertes avec le condensateur à l'entrée du primaire

Sans le condensateur, le courant à l'entrée du primaire est de 8.33A, donc pour une résistance de 0.034Ω la perte de puissance sera de 2.359W. Avec l'ajout du condensateur, le courant va être de 8.07A, donc la puissance perdue sera de 2.21W. Le condensateur va permettre une réduction de la puissance dissipée de 144mW.

6 Question 4 : transformateur monophasé utilisé en auto-transformateur et borne de recharge à 240V

6.1 fonctionnement auto-transformateur monophasé

Pour passer d'une alimentation 120V à une alimentation 240V efficace à volonté, il suffit de brancher les bobines primaire et secondaire en série pour obtenir une sortie variable en connectant une sortie entre le neutre et le vivant.

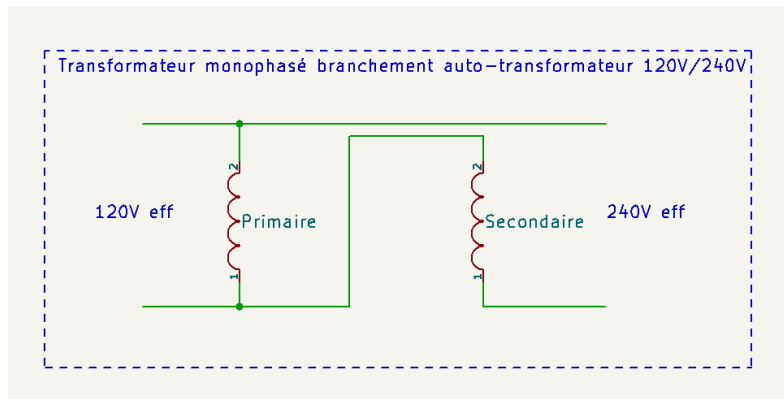


FIGURE 10 – Modèle auto-transformateur

En ce qui concerne l'isolation galvanique de ce type de système, il est valide de dire qu'il y a un chemin physique entre la sortie et l'entrée, soit dû à la connexion du primaire et du secondaire en série. En d'autres mots, il n'y a pas d'isolation.

7 Question 5 : Connexions du transformateur triphasé du point de livraison

7.1 Meilleur type de connection d'alimentation pour les bornes de recharge et les immeubles

Pour la problématique la connexion préférable pour alimenter les bornes de recharges et l'immeuble est le transformateur triphasé triangle étoile (Dy1), car on désire obtenir un neutre et une certaine entre les phases. C'est-à-dire une stabilité de charge avec les phases du dernier transformateur. De plus, en ce qui concerne le neutre, il est possible de mettre le neutre à la masse (la référence).

7.2 modèle équivalent monophasé

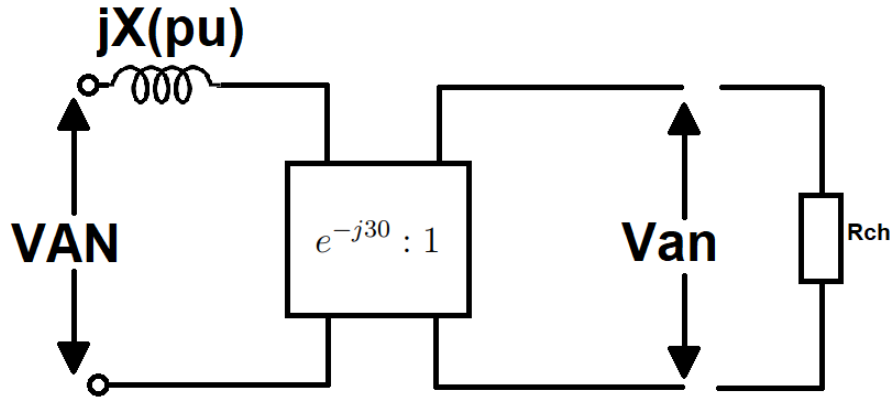


FIGURE 11 – Modèle équivalent transformateur monophasé en pu du transformateur triphasé

7.3 La valeur efficace de la tension ligne-ligne du réseau de distribution

$$V_{LNsec}(pu) = \frac{V_{LNsec}}{V_{nominalsec}} = \frac{120V}{120V} = 1pu$$

$$V_{ln} = V_{LNsec} * e^{j30} = 1\angle 30^\circ V$$

$$S_{bornes} = 20V_{ch}I = 20 * 107.69V * 8.08A = 17.402kVA$$

$$S_{1\phi} = \frac{P_{bornes} + P_{immeuble}}{3} = \frac{17.248kVA + 1MVA}{3} = 339.134kVA$$

$$S_{1\phi}(pu) = \frac{S_{1\phi}}{S_{nominalsec}} = \frac{339.134kVA}{500kVA} = 0.678pu$$

$$I_{primaire}(pu) = \frac{S_{1\phi}(pu)}{V_{an}} = \frac{0.678pu}{1\angle 30^\circ V} = 0.678\angle 30^\circ V$$

$$V_X = I_{primaire}(pu)X_{fuite}(pu) = 0.678\angle 30^\circ V * 0.22\angle 90^\circ V = 0.149\angle 120^\circ V$$

$$V_{AN}(pu) = V_X + V_{an} = 0.149\angle 120^\circ V + 1\angle 30^\circ V = 1.011\angle 38.48^\circ V$$

$$V_{AN} = V_{AN}(pu) * V_{nominalprim} = 1.011V * 14.4kV = 14.559kV$$

$$V_{LL} = V_{AN}(pu) * \sqrt{3} = 14.559kV * \sqrt{3} = 25.217kV$$

$$V_{LL}(pu) = V_{AN}(pu) * \sqrt{3} = 1.011 * \sqrt{3} = 1.751V$$

Puisque la configuration est DY11, la phase sera en retard de 30°

$$V_{LL}(pu) \frac{1.751 \angle 38.48^\circ V}{1 \angle 30^\circ V} = 1.751 \angle 8.48^\circ V$$

8 Conclusion

En conclusion, la problématique traitait des concepts des circuits de puissance à courant alternatif et des transformateurs (leur fonctionnement). Qui plus est, la présence de prise de mesure en laboratoire a permis l'obtention de résultat à partir de preuve physique pour une démarche purement expérimental. La problématique a permis de comprendre le développement et la conception d'un tel système de bornes de recharge. Cette démarche a ainsi permis la connaissance d'un système ayant du réseau jusqu'à un chargeur 780W conçu pour la recharge d'une voiture électrique.

Résultats à fournir pour l'annexe II (à mettre en annexe du rapport d'APP)

Essais sur transformateur triphasé

Notes : Les résultats et calculs effectués à l'annexe II doivent être fournis comme annexe à votre rapport d'APP. Les schémas, les diagrammes et les grandes lignes des démarches de calculs dans cette annexe peuvent se faire à la main puis scannés ou photographiés pour être joint au rapport d'APP. Pour tous les modèles équivalents demandés dans cette annexe on négligera les pertes et la branche de magnétisation. On ne demande pas de fournir la valeur de la réactance du modèle.

II-A. Connexion étoile-étoile

II-A1. Essai à vide - Connexion étoile-étoile

Tableau 1 : Résultats expérimentaux 1

Primaire	V_{AB} (RMS)	207,7V	Rapport de transformation a	1,61
Secondaire	V_{ab} (RMS)	128,4V	Rapport de transformation a'	1,57
			Déphasage entre V_{AB} et V_{ab}	0°
			V_{AB} en avance ou en retard sur V_{ab}	en phase

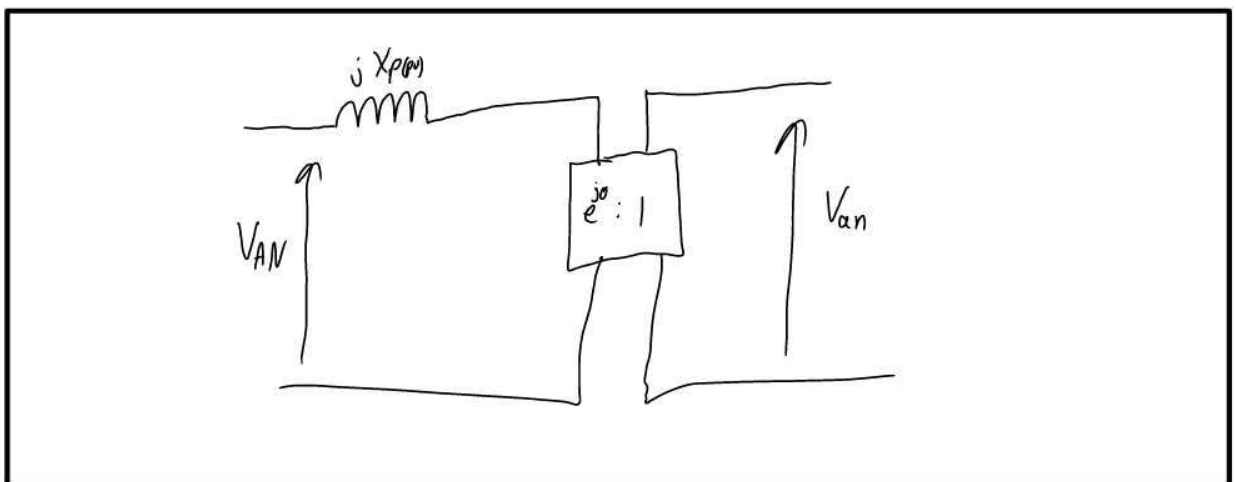


Figure 1 : Connexion étoile-étoile : Modèle équivalent monophasé en pu

Connexion étoile-étoile : Démonstration théorique

À partir des phaseurs, démontrer théoriquement la relation entre les 2 phaseurs V_{AB} et V_{ab}
(On rappelle que V_{AB} et V_{ab} sont des nombres complexes)

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{NB} \rightarrow \text{déphasage de } 120^\circ$$

puisque V_A est déphasé de 120° avec V_B on peut aussi dire cette équation

$$V_{AB} = V_{AN} - (V_{AN} \cdot e^{j120^\circ}) = V_{AN} (1 - e^{j120^\circ}) = V_{AN} \sqrt{3} e^{j30^\circ}$$

$$a = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} \quad V_{AB} = a V_{ab}$$

$$V_{ab} = V_{an} \sqrt{3} e^{j30^\circ} \longrightarrow V_{AB} = a V_{an} \sqrt{3} e^{j30^\circ}$$

À partir du résultat de la démonstration théorique, remplissez le tableau 2

Tableau 2: Résultats théoriques connexion étoile-étoile

Relation entre le rapport de transformation a' et le rapport de transformation a	$a \approx a'$
Déphasage entre V_{AB} et V_{ab}	0
V_{AB} en avance ou en retard sur V_{ab}	en phase

II-B. Connexion triangle-étoile

II-B1. Essai à vide - Connexion triangle-étoile (Dy11)

Tableau 3 : Résultats expérimentaux 2

Primaire	V_{AB} (RMS)	207,3	Rapport de transformation a	1,62
			Rapport de transformation a'	0,89
Secondaire	V_{ab} (RMS)	226,9	Déphasage entre V_{AB} et V_{ab}	30°
			V_{AB} en avance ou en retard sur V_{ab}	retard

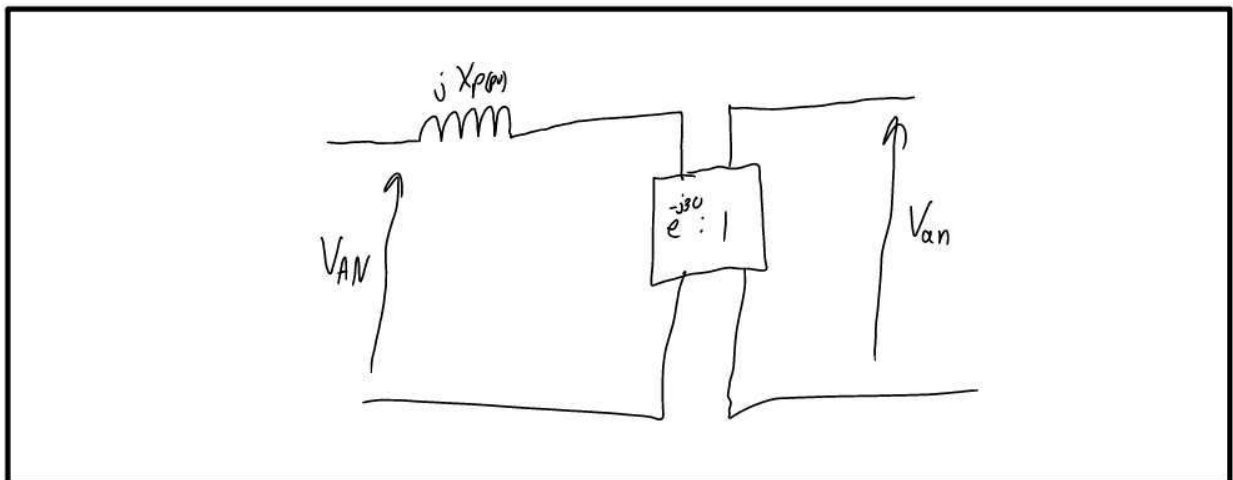


Figure 2 : Connexion triangle-étoile (Dy11) : Modèle équivalent monophasé en pu

Connexion triangle-étoile (Dy11) : Démonstration théorique

À partir des phaseurs, démontrer théoriquement la relation entre les 2 phaseurs V_{AB} et V_{ab} (On rappelle que V_{AB} et V_{ab} sont des nombres complexes).

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= \sqrt{3} V_{an} e^{j30} \\
 a &= \frac{V_{AN}}{V_{an}} \\
 V_{an} &= \frac{V_{AN}}{a}
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} V_{AB} = V_{AN}$$

Donc:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{AB} \frac{1}{a} e^{j30}$$

À partir du résultat de la démonstration théorique remplissez le tableau 4

Tableau 4: Résultats théoriques connexion triangle-étoile (Dy11)

Relation entre le rapport de transformation a' et le rapport de transformation a	$a' = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Déphasage entre V_{AB} et V_{ab}	30°
V_{AB} en avance ou en retard sur V_{ab}	retard

II-B2. Essai à vide - Connexion triangle-étoile (Dy1)

En s'appuyant sur des observations faites au II-B1 et sur la théorie, proposez une connexion triangle-étoile de type Dy1 et complétez le schéma ci-dessous pour avoir la connexion Dy1. Les points de polarité sur les enroulements sont identifiés par les points noirs ●.

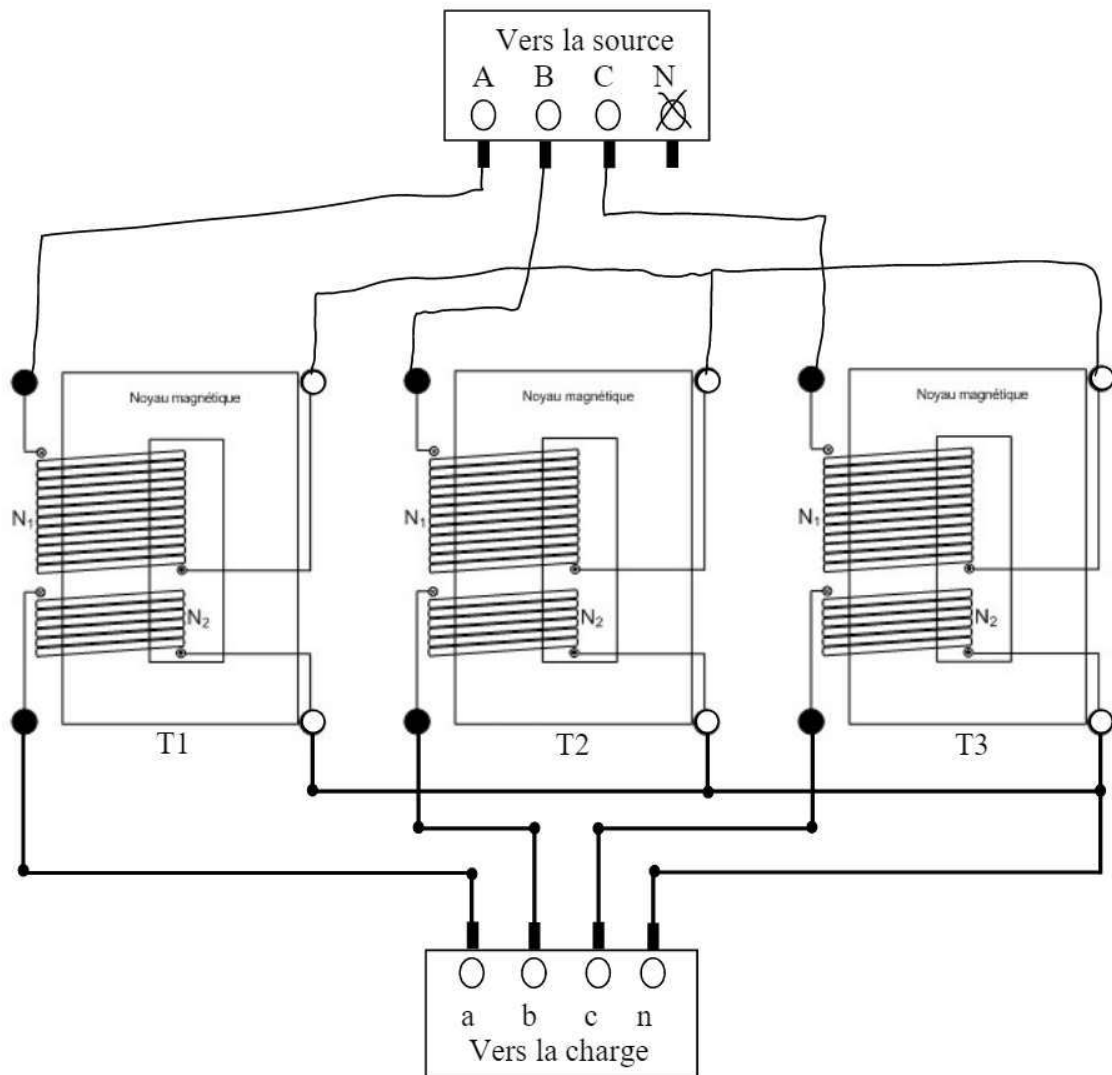


Figure 3 : Connexion triangle-étoile (Dy1) : Schéma de la connexion

Tableau 5 : Résultats expérimentaux 3

Primaire	V_{AB} (RMS)	209,5
Secondaire	V_{ab} (RMS)	296,6
Transfo triphasé alimenté en séquence inverse ou directe ?		directe

Rapport de transformation a	1,61
Rapport de transformation a'	0,92
Déphasage entre V_{AB} et V_{ab}	30°
V_{AB} en avance ou en retard sur V_{ab}	avance

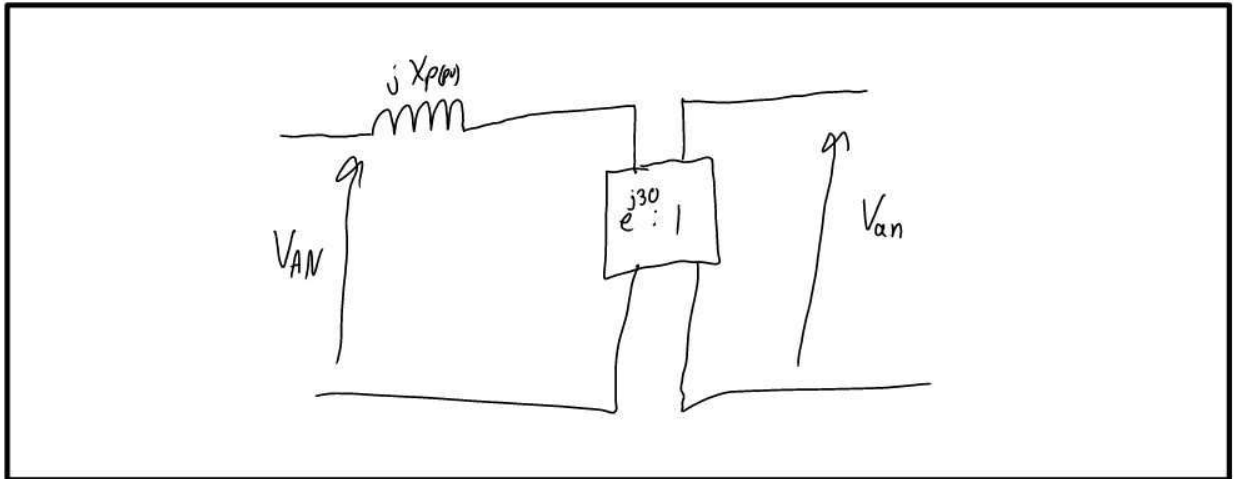


Figure 4 : Connexion triangle-étoile (Dy1) : Modèle équivalent monophasé en pu

Références

- [1] Serge A. Kodjo et Maxime Dubois, *GUIDE DE L'ÉTUDIANT*, 7^e version, Université de Sherbrooke, 2022