



## PLACEMENT OPTIMAL DU REGLEUR EN CHARGE AUX BORNES DU TRANSFORMATEUR.

M. GOGOM, J. NGUNDAM

Automation and Control Laboratory (ACL), Ecole Nationale Supérieure Polytechnique,  
BP : 8390, Yaoundé, Cameroun

Correspondance : Mathurin GOGOM, [gomathurin@yahoo.fr](mailto:gomathurin@yahoo.fr)

---

### RESUME

Nous présentons dans cet article une approche optimale et fiable du placement du régleur en charge aux bornes du transformateur. Elle permet de minimiser les pertes cuivre engendrées par le régleur en charge. Les régleurs en charge incorporés aux bornes du transformateur de puissance, pour améliorer le profil de tension du réseau électrique, augmentent les pertes cuivre. La solution traditionnelle qui consiste à placer les régleurs en charge du côté où le courant est moins élevé permet de réduire les effets de l'arc électrique sans pourtant résoudre le problème de pertes qu'ils engendrent. Ces pertes sont d'autant plus élevées que le régleur en charge est placé au primaire ou au secondaire du transformateur. L'objectif visé dans cette approche consiste à placer le régleur en charge au secondaire du transformateur afin de minimiser les pertes cuivre engendrées par le régleur en charge. Le test de validation de cette approche est effectué sur le réseau électrique à cinq nœuds. Les résultats obtenus à l'issue des simulations justifient l'approche.

---

**Mots clés** : Placement optimal ; Transformateur de puissance ; Régleur en charge ; Pertes cuivre.

---

### ABSTRACT

---

In this article, we present an optimal and reliable approach of the placement of a regulator, with or without load across a transformer. The approach consists in placing the regulator at the secondary of the transformer in order to minimize the copper losses it causes. In fact, the regulator incorporated in the power transformer in order to improve the voltage profile of the electric network increases the copper losses. The usual solution, which consists of placing the regulators on the transformer's side where the current is lower, helps to reduce the effects of electric arc without resolving the problem of copper losses that it creates. Copper losses are however higher if the regulator is placed at the primary of the transformer. The main objective of this paper is to show that these losses could be minimized. The approach is tested on a five nodes network, and on the Congolese interconnected electricity grid were simulation results obtained justify our claims.

---

**Key words**: Optimal Placement; Power Transformer; Load or No Load Regulators; Copper Losses.

---

## INTRODUCTION

L'exploitation des transformateurs dans les réseaux électriques est assujettie à beaucoup de problèmes, dont l'effet joule qui constitue un phénomène de dégradation des ouvrages. Cet effet qui a pour origine le passage du courant électrique à travers les enroulements du transformateur, traduit implicitement les pertes joule dans le cuivre et le fer. En dépit de ce défi, depuis quelques décennies, les transformateurs de puissance sont fortement dopés des régleurs en charge. Ces régleurs incorporés aux enroulements du transformateur permettent de réguler la tension pour améliorer son profil et le transit du flux de puissance du réseau. L'incorporation de ces régleurs en charge aux bornes du transformateur de puissance pose de nouveaux défis dont les arcs électriques lors du passage d'une prise à une autre et l'augmentation des pertes cuivre, c'est à dire l'expansion de l'effet joule ; tandis que l'incorporation des régleurs hors charge ne pose que le problème d'augmentation des pertes joule.

En effet, les arcs électriques endommagent les prises et peuvent également provoquer les incendies ; cependant, lors de l'usage du régleur en charge, c'est le nombre de spires qui augmente, ce qui traduit l'augmentation de la résistance au primaire ou au secondaire, aggravant ainsi le phénomène.

Au regard de tous ces problèmes présentés ci-dessus, liés à l'exploitation des transformateurs, certains ont déjà trouvé de solutions, notamment :

L'effet joule dont l'usage des huiles minérales et synthétiques, parfaitement traitées, contenues dans une cuve, dans lesquelles baignent les enroulements montés en couches sur le circuit magnétique [11, 14-16], joue le rôle de refroidissement et d'isolement ;

En ce qui concerne les arcs électriques qui apparaissent, lors du passage d'une prise à une autre, la tendance classique consiste à incorporer le régleur en charge du côté le moins élevé du courant, afin de minimiser les effets [12-15]. Actuellement le régleur en

charge (contacteur électromécanique) est immergé dans les huiles minérales et synthétiques contenues dans un réservoir afin d'étouffer les arcs électriques susceptibles d'endommager les prises et surtout les transformateurs [14-16].

Par ailleurs, l'augmentation des pertes cuivre, engendrées par les régleurs en charge demeure encore un défi majeur. Ces pertes qui contribuent à l'expansion de l'effet joule dégradent d'avantage les transformateurs (vieillessement des huiles par exemple). Elles sont d'autant plus élevées que le régleur en charge est placé au primaire ou au secondaire du transformateur de puissance.

Cette approche vise à minimiser essentiellement les pertes cuivre engendrées par les régleurs en charge, afin d'optimiser l'effet joule et la desserte au mieux des clients souvent victimes de délestage.

Pour minimiser l'expansion de l'effet joule et optimiser la desserte en énergie électrique lors de l'usage des régleurs en charge, il convient de faire les simulations (calcul de répartition des charges) afin d'apprécier les pertes dissipées dans les enroulements lorsqu'ils sont incorporés au primaire d'une part, et au secondaire du transformateur d'autre part. C'est pourquoi, dans cette étude, nous examinons deux placements possibles du régleur en charge. Dans chaque cas, nous évaluons les pertes dans les enroulements du transformateur [6], nous apprécions de quel côté les pertes joule sont moins élevées. Ainsi, pour mener à terme cette étude et obtenir les résultats escomptés, ce travail comprend cinq sections dont le rappel sur le transformateur avec régleur en charge, l'approche proposée, l'essai de simulation, l'application, les résultats de simulations et la conclusion.

## RAPPELS SUR LE TRANSFORMATEUR AVEC REGLER EN CHARGE

### 1. Principe du régleur en charge

Il est souvent nécessaire d'ajuster le nombre de spires des transformateurs en vue

de réguler la tension du réseau. En effet, un transformateur présente plusieurs prises de réglage, représenté à la figure 1.

Dans certains transformateurs, la modification s'opère en changeant manuellement les connexions lorsque l'appareil est hors service. Par ailleurs, dans de nombreux transformateurs, cette modification peut être effectuée en charge, c'est-à-dire sans interruption du courant qui parcourt l'enroulement dont on modifie le nombre de spires. C'est ainsi que ce dispositif est appelé régleur en charge, comportant un contacteur conçu pour atténuer la formation d'arcs électriques susceptibles d'endommager les contacts et un moteur électrique pour entraîner ce contacteur. Le régleur en charge peut être commandé manuellement (télécommandé par l'opérateur depuis le centre de conduite) ou automatiquement (système asservi le commandant localement) [14-16].

Les prises portant généralement les indications 10%, 7,5 %, 5 %, 2,5 %, 1,5 %, -1,5 %, -2,5 %, -5 %, -7,5 % et -10 %, définissent le niveau de réglage de la tension souhaitée aux bornes du transformateur.

## 2. Modèles développés du transformateur avec régleur en charge

Nous avons représenté ces modèles par les différents éléments résistifs, inductifs et un transformateur idéal présenté sur la figure 2 [1, 4, 6].

### 3. Modèle simplifié du transformateur avec régleur en charge

Les paramètres du transformateur sont exprimés ici dans le système per unit (pu) pour

transformer le rapport des tensions initial  $n_p = n_s$  à un rapport de tensions unitaires  $1:1$ . Cela permet d'obtenir un modèle simple contenant l'admittance  $Y_{cc}$  du court circuit en série avec un transformateur idéal, le tout connecté entre les nœuds primaire et secondaire pour décrire complètement la performance du système de transformation aux deux enroulements.

Par ailleurs, le mécanisme de variations de spires constituant les enroulements afin de permettre la régulation du module de la tension sur l'une ou l'autre borne du transformateur n'est pas représenté, car il ne constitue pas un élément impédant pouvant influencer sur les résultats. L'admittance magnétisante est négligée parce que l'étude porte essentiellement sur les pertes cuivre, aussi parce que sa valeur est sensiblement nulle.

Ceci est achevé en injectant une petite tension variable (addition ou soustraction) en phase avec le module de la tension sur l'enroulement de sortie. Le modèle simplifié de ce transformateur est représenté à la figure 3 avec de rapports de prise  $1:1$  ou  $1:1$  respectivement au primaire et au secondaire [6, 10].

Au regard du modèle obtenu, les relations entre les courants du primaire et du secondaire du transformateur idéal peuvent s'établir ainsi qu'il suit :

Modèle a :

On sait que :  $\frac{|V|}{|V_p|} = \frac{T}{1}$  et  $\frac{T}{1} = \frac{|I_s|}{|I_p|}$  et les courants à l'entrée et à la sortie du transformateur sont :

$$\underline{I}_p = Y_{cc}(\underline{V}_p - \underline{V}) = Y_{cc}(\underline{V}_p - \underline{T} \underline{V}_s) = Y_{cc} \underline{V}_p - Y_{cc} \underline{T} \underline{V}_s \quad (1)$$

$$\underline{I}_s = -\underline{T} \underline{I}_p = -Y_{cc} \underline{T} (\underline{V}_p - \underline{T} \underline{V}_s) = -\underline{T} Y_{cc} \underline{V}_p + Y_{cc} \underline{T}^2 \underline{V}_s \quad (2)$$

En combinant les équations (1) et (2), on obtient l'équation matricielle des courants à travers le transformateur ci-après :

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{cc} & -Y_{cc} \underline{T} \\ -Y_{cc} \underline{T} & Y_{cc} \underline{T}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{V}_p \\ \underline{V}_s \end{pmatrix} \quad (3)$$

Modèle b :

On sait que :  $\frac{|V|}{|V_s|} = \frac{1}{T}$  et  $\frac{1}{T} = \frac{|I_s|}{|I_p|}$

Par analogie, les courants à l'entrée et à la sortie du transformateur sont :

$$\underline{I}_p = Y_{cc} \underline{V}_p - \frac{1}{T} Y_{cc} \underline{V}_s \quad (4)$$

$$\underline{I}_s = -\frac{1}{T} Y_{cc} \underline{V}_p + \frac{1}{T^2} Y_{cc} \underline{V}_s \quad (5)$$

En combinant les équations (4) et (5), on obtient l'équation matricielle des courants ci-après :

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{cc} & -\frac{1}{T} Y_{cc} \\ -\frac{1}{T} Y_{cc} & \frac{1}{T^2} Y_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{V}_p \\ \underline{V}_s \end{pmatrix} \quad (6)$$

## APPROCHE PROPOSEE

D'une manière générale, les pertes cuivre peuvent être exprimées de deux façons différentes : par la somme des pertes dans toutes les branches du transformateur ou par la somme des puissances actives d'entrée et de sortie du transformateur.

Ici, nous avons utilisé la méthode de calcul de la somme des puissances actives d'entrée et de sortie du transformateur. Ainsi, les pertes cuivre sont déduites des équations de puissances actives à l'entrée et à la sortie du transformateur. Pour la même position de la prise du régulateur en charge, nous déterminons respectivement les pertes lorsqu'il est placé au primaire et au secondaire du transformateur.

### 1. Régulateur en charge placé du côté primaire

Les équations de puissance à l'entrée du transformateur peuvent s'écrire [6] et [10]:

$$\underline{S}_p = \underline{V}_p \underline{I}_p^*$$

Après le développement et séparation en puissances active et réactive, on obtient :

$$P_p = V_p^2 G_{CC} - TV_p V_s [G_{CC} \cos(\theta_p - \theta_s) + B_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s)] \tag{7}$$

$$Q_p = -V_p^2 B_{CC} - TV_p V_s [G_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s) - B_{CC} \cos(\theta_p - \theta_s)] \tag{8}$$

Celles du coté secondaire peuvent s'écrire :

Après développement et séparation en puissances active et réactive, nous obtenons :

$$S_s = V_s I_s^*$$

$$P_s = T^2 V_s^2 G_{CC} - TV_p V_s [G_{CC} \cos(\theta_s - \theta_p) + B_{CC} \sin(\theta_s - \theta_p)] \tag{9}$$

$$Q_s = -V_s^2 B_{CC} - TV_p V_s [G_{CC} \sin(\theta_s - \theta_p) - B_{CC} \cos(\theta_s - \theta_p)] \tag{10}$$

Les pertes cuivre dans le transformateur sont la somme des puissances actives aux nœuds:

$$\Delta P_p = P_p + P_s = (V_p^2 + T^2 V_s^2) G_{CC} - 2TV_p V_s B_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s) \tag{11}$$

## 2. Règleur en charge placé du côté secondaire

En tenant compte des mêmes hypothèses qu'à la sous section (3-1), les puissances active et réactive du coté primaire du transformateur s'écrivent :

$$P'_p = \frac{1}{T^2} V_p^2 G_{CC} - \frac{1}{T} V_p V_s [G_{CC} \cos(\theta_p - \theta_s) + B_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s)] \tag{12}$$

$$Q'_p = -\frac{1}{T^2} V_p^2 B_{CC} - \frac{1}{T} V_p V_s [G_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s) - B_{CC} \cos(\theta_p - \theta_s)] \tag{13}$$

De même, les expressions de puissances active et réactive du coté secondaire du transformateur sont :

$$P'_s = V_s^2 G_{CC} - \frac{1}{T} V_p V_s [G_{CC} \cos(\theta_p - \theta_s) + B_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s)] \tag{14}$$

$$Q'_s = -V_s^2 B_{CC} - \frac{1}{T} V_p V_s [G_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s) - B_{CC} \cos(\theta_p - \theta_s)] \tag{15}$$

Comme précédemment, les pertes cuivre dans le transformateur s'expriment :

$$\Delta P_p = P_p' + P_s' = \left( \frac{1}{T^2} V_p^2 + V_s^2 \right) G_{CC} - 2 \frac{1}{T} V_p V_s B_{CC} \sin(\theta_p - \theta_s) \quad (16)$$

Les formules 11 et 16 transcrites dans l'environnement Matlab nous permettent de déterminer les pertes cuivre dans un transformateur et d'apprécier de quel coté, elles sont moins élevées

## ESSAI DE SIMULATIONS

Le test de validation de notre approche est fait sur un réseau électrique à cinq (5) nœuds et sept (7) branches [6], dont le sixième

nœud est le nœud de connexion du transformateur considéré comme huitième branche. Le transformateur sera successivement connecté entre les nœuds 3 et 6, puis entre 4 et 6. Ce réseau est présenté à la figure 4, et il est parfaitement modélisé.

Les simulations sont faites sur la base du système d'équations aux nœuds du réseau [03] et [06] donné par :

$$\begin{cases} P_i = Y_{ii} V_i^2 \cos(\alpha_{ii}) + V_i \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \cos(\varphi_i - \varphi_k - \alpha_{ik}) \\ Q_i = Y_{ii} V_i^2 \sin(\alpha_{ii}) + V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \sin(\varphi_i - \varphi_k - \alpha_{ik}) \end{cases} \quad (17)$$

Au regard de la nature non linéaire de ces équations, nous utilisons l'algorithme itératif de Newton Raphson pour le calcul de répartition des charges avec prise en compte du transformateur avec régleur en charge [10]. Cet algorithme est implémenté dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation sont consignés dans les tableaux I et II.

Nous remarquons au regard des résultats obtenus que l'usage du régleur en charge au secondaire du transformateur présente moins de pertes cuivre par rapport à son usage au primaire.

## APPLICATION ET RESULTATS DE SIMULATIONS

L'application de notre approche est faite sur le réseau électrique congolais interconnecté. Ce réseau comporte trente

nœuds réels et trois nœuds fictifs pour les besoins de simulation ; vingt trois lignes de transmission ; cinq transformateurs montés en série avec les lignes de transmission dont trois à trois enroulements et deux à deux enroulements. Ces cinq transformateurs sont modélisés comme des lignes de transmission.

Dans le cadre de cette étude, nous choisissons le transformateur connecté entre les nœuds 22 et 26, aux bornes duquel le régleur en charge est incorporé, car son secondaire est raccordé à une ligne de transmission de 170 km dont il faut contrôler le profil de la tension. L'ensemble du réseau est parfaitement modélisé, non seulement pour cette étude mais aussi pour d'autres applications (calcul des courants de court-circuit et des régimes transitoires). Le réseau électrique congolais interconnecté est représenté à la figure 5 où tous les paramètres sont exprimés en pu.

Les résultats de simulation sont présentés dans les tableaux ci-dessous, et ils confirment bien la thèse. Le tableau III présente les pertes de puissances apparentes dans le transformateur et les rapports de pertes de puissance apparente lorsque le régleur est inséré au primaire et au secondaire par les pertes de puissance sans régleur. Le tableau IV présente uniquement les pertes cuivre. Ces résultats certifient que, lorsque le régleur en charge est placé au secondaire, les pertes cuivre sont moins élevées.

## CONCLUSION

L'approche présentée dans cette étude a porté sur le placement optimal du régleur en charge aux bornes du transformateur de puissance. Cette étude nous a permis d'optimiser les pertes cuivre dans le transformateur et de minimiser l'effet joule. Ua des données rassemblées dans les tableaux III et IV, les puissances apparentes perdues dans le transformateur sont évaluées à :

- $\Delta S_p = 0.0569 + j1.3069$ , lorsque le régleur en charge est inséré au primaire du transformateur de puissance ;
- $\Delta S_s = 0.0184 + j0.4219$ , lorsque le régleur en charge est inséré au secondaire du transformateur de puissance.

Le rapport de la puissance apparente perdue dans le transformateur avec régleur en charge au primaire par celle avec régleur en charge au secondaire donne 3,097, montrant que l'insertion du régleur en charge au primaire du transformateur augmente la puissance apparente perdue de 3,097 fois par rapport au cas où il est inséré au secondaire.

Cependant, le rapport des pertes cuivre dans le transformateur avec régleur en charge au primaire par celle avec régleur en charge au secondaire donne 3,092, montrant que l'insertion du régleur en charge au primaire du transformateur augmente les pertes cuivre de 3,092 fois par rapport au cas où il est inséré au secondaire.

Donc, cette option offre, dans le cadre de l'exploitation des réseaux électriques et surtout de la desserte aux mieux des clients en énergie électrique souvent victime des délestages, des avantages économiques et techniques très remarquables :

- au plan économique, un gain de 3,83 MW est réalisé, permettant de desservir en énergie électrique un quartier ou une petite agglomération urbaine, victime des délestages chroniques. Donc, avec ce placement optimal du régleur en charge, certains clients peuvent d'avantage se connecter et bénéficier d'un approvisionnement souhaité en énergie électrique ;
- au plan technique, le phénomène de dégradation dû à l'effet joule dans le transformateur et les risques d'avaries sont réduits. De même, cette réduction des pertes cuivre garantit le fonctionnement fiable du transformateur.

## REFERENCES

1. Inductances et Transformateurs. beams.ulb.ac.be/beams/.../élec.../CHAP3-ELE-H-300.pdf.
2. Sabonnadiere J.C., Hadjssaïd N., 2007. Lignes et réseaux électriques 1. Collection sciences et technologies de l'énergie électrique. Paris : Editions Hermès Sciences-Lavoisier.
3. Sabonnadiere J.C., Hadjssaïd N., 2008. Lignes et réseaux électriques 2. Collection sciences et technologies de l'énergie électrique. Paris : Editions Hermès Sciences-Lavoisier.
4. Barret J.P., Bornard P., Meyer B., 1997. Simulation des réseaux électriques. Paris : Editions Eyrolles.
5. Seguier G., Notelet F., 1994. Electrotechnique industrielle. Paris : Edition Technique et Documentation.
6. Enrique A., Claudio R.F.-E., Hugo A.-P., Cesar A.-C., 2005. Modelling and Simulation in Power Networks. London: John Wiley & Sons.
7. Transformateurs de puissance. beams.ulb.ac.be/beams/.../élec029.../CHAP6-ELE-H-300.pdf.
8. Ahmad A., 1992. Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.

9. Mathys P., et Serge PROHOROFF S., 2000. Modélisation et simulation de transformateur pour alimentation à découpage. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles.
10. Gerex S., 2003. Metaheuristiques appliquées au placement optimal des dispositifs FACTS dans un réseau électrique. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
11. Darcherif A.-M., Prigent S., Dellule J.-M., Magnier P., Scheurer D., 2004.. Modélisation magnéto-thermo-hydrodynamique dans une cuve du transformateur de puissance. Optimisation d'un système contre l'explosion des transformateurs. 5<sup>ème</sup> conférence Francophone de modélisation et simulation.
12. Fulchiron D., 1998. Protection des transformateurs de puissance MT/BT. Cahier *Ann. Univ. M. NGOUABI, 2010 ; 11 (4)* technique, 192<sup>ème</sup> année. Paris : Editions Schneider
13. Multon B. Modèles électriques du transformateur électromagnétique. Antenne de Bretagne de l'Ecole Supérieure de Cachan.
14. ABB Transformateurs de distribution de forte puissance. [www05.abb.com/.../1LAA101003AAFR\\_Large-Distribution-Transformer](http://www05.abb.com/.../1LAA101003AAFR_Large-Distribution-Transformer).
15. Transformateur avec régleur en charge. <http://www.tsv.transfo.com/index.mc.régleur-en-charge-cpc-cpec-oltc-ltc>.
16. Transformateur avec régleur en charge. [http://www.tsv.transfo.com/index.mc.huile-isolant-transformateur.rub\\_id](http://www.tsv.transfo.com/index.mc.huile-isolant-transformateur.rub_id).

ANNEXE

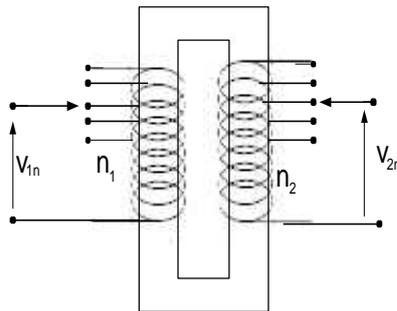


Figure 1 : Schéma de principe du transformateur avec régleur en charge.

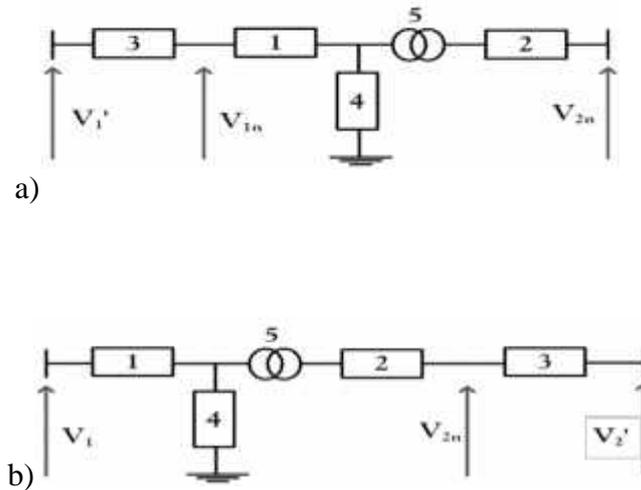


Figure 2 : Modèles du transformateur

- a) Lorsque le régleur en charge est placé au primaire ;
- b) Lorsque le régleur en charge est placé au secondaire.

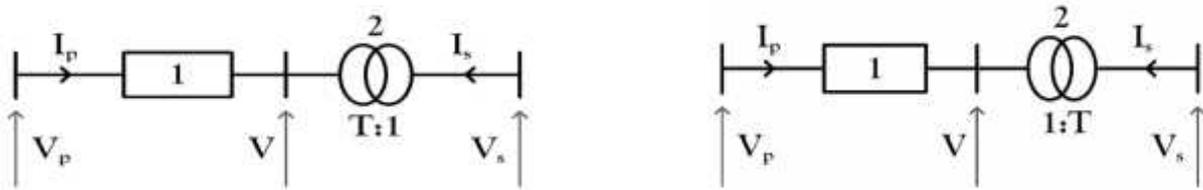
Où

$V_{1n}$  et  $V_{2n}$  sont respectivement les tensions nominales aux primaire et secondaire du transformateur ;

$V_1'$  et  $V_2'$  sont respectivement les tensions aux primaire et secondaire du transformateur en présence du régleur en charge;

1 est l'impédance complexe de l'enroulement primaire  $z_1 = r_1 + jx_1$ ;

- 2 est l'impédance complexe de l'enroulement secondaire  $z_2 = r_2 + ix_2$ ;
- 3 est l'impédance complexe additionnelle de l'enroulement primaire ou secondaire occasionné par la présence du régleur en charge  $z' = r' + ix'$ ;
- 4 est l'impédance complexe magnétisante  $z_\mu = r_\mu + ix_\mu$  ;
- 5 symbolise le transformateur idéal.



a)

b)

Figure 3 : Modèle simplifié du transformateur  
 a) Lorsque le régleur en charge est au primaire ;  
 b) Lorsque le régleur en charge est au secondaire.

Où

- 1 est l'admittance complexe de court circuit du transformateur  $Y_{cc} = \frac{1}{z_{cc}} = G_{cc} - iB_{cc}$  ;
- 2 est le transformateur idéal.

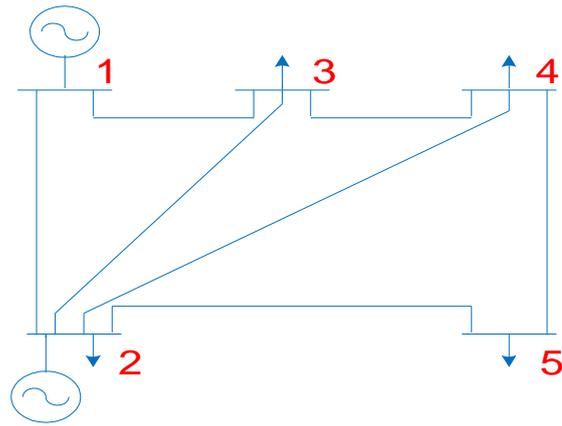


Figure 4 : Réseau test à 5 nœuds.

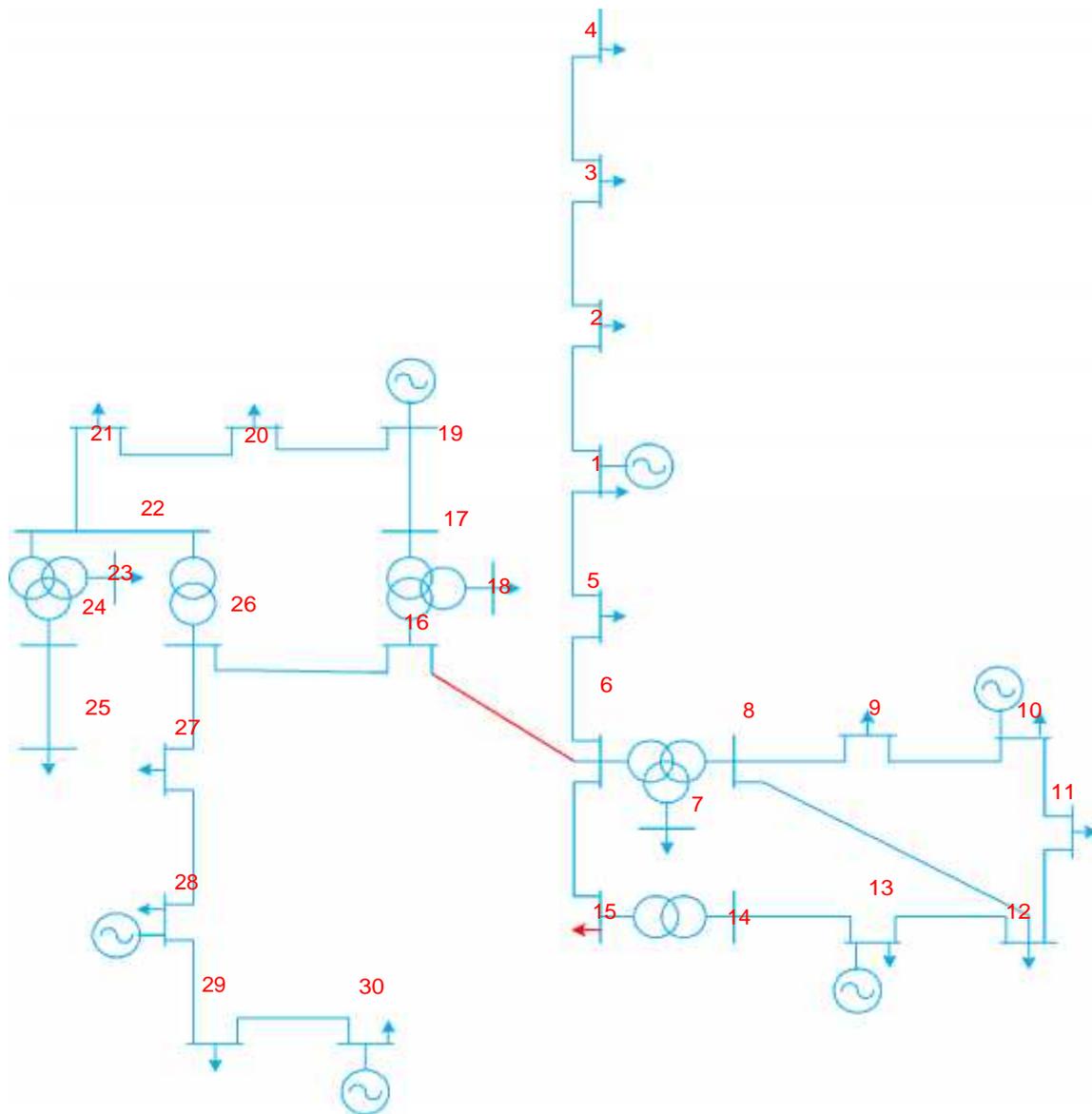


Figure 5 : Réseau électrique congolais interconnecté à 30 nœuds.

Tableau I : Résultats des simulations : comparaison des pertes apparentes.

Nœuds	Pertes avec régleur en charge au primaire en pu		Pertes avec régleur en charge au secondaire en pu		Rapport
	$\Delta P + j\Delta Q$	$\Delta S_p$	$\Delta P + j\Delta Q$	$\Delta S_s$	
	<b>0.0154 + 5.1500i</b>				
	0.0541+18.0188i				

Tableau II : Résultats des simulations : comparaison des pertes cuivre.

Nœuds	Pertes joule avec régleur au primaire en pu	Pertes joule avec régleur au secondaire en pu	Rapport
	$\Delta P_p$	$\Delta P_s$	
	<b>0.0154</b>		
	0.0541		

Tableau III : résultats des simulations. Comparaison des pertes apparentes

Nœuds	Pertes sans régleur en charge en pu		Pertes avec régleur au primaire en pu		Pertes avec régleur au secondaire en pu		Rapport		
	$\Delta P + j\Delta Q$	$\Delta S$	$\Delta P + j\Delta Q$	$\Delta S_p$	$\Delta P + j\Delta Q$	$\Delta S_s$	$\frac{\Delta S_p}{\Delta S}$	$\frac{\Delta S_s}{\Delta S}$	$\frac{\Delta S_p}{\Delta S_s}$
<b>24 - 28</b>	<b>0.0004 + j0.008090</b>	<b>1.3016</b>	<b>0.0569 + j1.3016</b>	<b>1.3016</b>	<b>0.0184 + j0.4242</b>	<b>1.3016</b>	<b>3.145</b>	<b>47</b>	3.097

Tableau IV : Résultats de simulations : comparaison des pertes cuivre

Nœuds	Pertes joule sans régulateur en charge en pu	Pertes joule avec régulateur au primaire en pu	Pertes joule avec régulateur au secondaire en pu	Rapport		
	$\Delta P$	$\Delta P_p$	$\Delta P_s$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P}$	$\frac{\Delta P_s}{\Delta P}$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_s}$
<b>24 – 28</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.0569</b>	<b>0.0184</b>	<b>142</b>	<b>46</b>	3.092