



Analyse du Comportement Électrique d'un Circuit Triphasé Déséquilibré

**Richard Katembo Kamera¹, Jacques Kambale Mukirania, Roger Muhindo Saambili,
& Gustave Alimasi Mukakala**
kamerarichard@gmail.com

Résumé

Actuellement, les sociétés sont régies par l'électricité pour gérer leur économie, le transport, la communication, l'alimentation, etc. Cette étude porte sur l'analyse du comportement électrique d'un circuit triphasé déséquilibré, afin de s'assurer un bon du réseau électrique. Le comportement d'un circuit triphasé déséquilibré selon que les charges soient de même nature ou non avec ou sans neutre est présenté. Sanchez (2013) a démontré que dans le cas d'un circuit triphasé déséquilibré, avec les charges de même nature, il se présente une surtension à la phase la moins chargée et une baisse de tension à la phase la plus chargée s'il y a coupure du neutre. Dans cette étude, la méthode analytique associée et la méthode d'échantillonnage aléatoire étaient appliquées pour sélectionner les récepteurs utilisés. Les résultats montrent que dans un circuit triphasé déséquilibré de même facteur de puissance sur les phases se présente toujours une surtension à la phase la moins chargée et une baisse de tension à la phase la plus chargée. Cependant ce n'est pas toujours vrai pour les charges de natures différentes. De même le module du courant dans le neutre a la même valeur dans un circuit déséquilibré si $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3$ pour toute permutation des récepteurs sur les phases ce qui n'est pas le cas pour les natures différentes. Nous avons conclu que dans le cas de charges déséquilibrées de natures différentes sur les phases (résistive, inductive, capacitive), il peut arriver que le courant dans le neutre soit supérieur au courant dans chacune des phases : c'est le cas d'une distribution dont une phase est surcompensée.

Mots-clés : Comportement électrique, Circuit, Circuit triphasé, Triphasé déséquilibré

Abstract

Currently, societies are governed by electricity to manage their economy, transport, communication, food, etc. This study focuses on analyzing the electrical behavior of an unbalanced three-phase circuit to ensure a good electrical network. The behavior of an unbalanced three-phase circuit, depending on whether the loads are of the same nature or not, with or without neutral, is presented. Sanchez (2013) demonstrated that in the case of an unbalanced three-phase circuit with loads of the exact nature, there is an overvoltage at the most minor loaded phase and a drop-in voltage at the most loaded phase if there is a neutral cut. In this study, the associated analytical and random sampling methods were applied to select the receivers used. The results show that in an unbalanced three-phase circuit with the same power factor on the phases, there is always an overvoltage at the least loaded phase and a voltage drop at the most loaded phase. However, this is not always true for loads of different natures. Similarly, the current modulus in the neutral has the same value in an unbalanced circuit if $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3$ for any permutation of the loads on the phases, which is

¹ Assistant 1 à l'ISPT Muhangi, *kamerarichard@gmail.com*

not the case for the different natures. We have concluded that in the case of unbalanced loads of different natures on the phases (resistive, inductive, capacitive), it can happen that the current in the neutral is greater than the current in each of the phases: this is the case of a distribution of which one phase is overcompensated.

Keywords: Electrical behavior, Circuit, Three-phase circuit, Unbalanced three-phase

Introduction

Les systèmes de tensions et courants triphasés forment la réalité des unités de production et de distribution de l'énergie électrique (Mansour, 2014). Avant de savoir de quoi sont formés ces systèmes, il est important de comprendre le pourquoi de l'existence du triphasé : en comparant les volumes de cuivre nécessaire, que pour fournir la même puissance à deux charges équivalentes, le réseau triphasé nécessite paradoxalement deux fois moins de cuivre que le réseau monophasé.

Plusieurs autres raisons s'ajoutent à ces considérations technologiques et économiques et font du réseau triphasé l'incontournable acteur de la distribution électrique. Pour les mêmes dimensions, un moteur triphasé est environ 150% plus puissant qu'un moteur monophasé. Dans un système monophasé, la puissance oscille à la fréquence du réseau ; elle passe par zéro à tous les cycles. Dans un système triphasé, la puissance ne devient jamais nulle ; ceci simplifie le design de moteurs triphasés. La tension obtenue après redressement est beaucoup moins ondulée. Pour fournir une même puissance P à un utilisateur, une ligne triphasée subit une moitié de pertes par effet Joule qu'une ligne monophasée de même section. Économiquement, le triphasé est plus intéressant que le monophasé : le transport de l'énergie électrique et les machines électriques sont plus rentables en triphasé.

Les circuits triphasés forment la base du réseau de distribution de l'électricité. Un réseau électrique c'est un circuit complexe (un ensemble de plusieurs circuits électriques interconnectés). L'étude du réseau électrique revient à la détermination de courant, de la tension (la puissance) à chaque point du circuit. Dans la plupart de cas, la coupure du conducteur neutre en amont d'une distribution triphasée conduit à des surtensions sur une ou deux phases de la distribution pouvant endommager les récepteurs qui y sont branchés (Guillaume, 2018).

Sanchez (2013), qui s'est attelé seulement à des charges résistives, ses résultats ont prouvé qu'il se présente une surtension au récepteur branché à la phase la moins chargée et une baisse de tension au récepteur branché à la phase la plus chargée. De même, si la détermination du courant dans le neutre d'une distribution triphasée se fait graphiquement, cela ne conduit pas toujours à la réponse exacte. Dans ce cas, il y a toujours présence d'erreurs qui peuvent être dues à l'opérateur, aux instruments, conduisant à plusieurs réponses approchées de la véritable. Eu égard à ce qui précède, il y a lieu d'entrevoir que l'on ignore les relations pouvant palier à cet effet. Ainsi, une question se pose : Existe-il les relations pouvant conduire à calculer les tensions aux bornes des récepteurs d'une distribution triphasée lors de la coupure amont du neutre ?

Les calculs du courant dans le neutre ainsi que potentiel V'_N du neutre (sans neutre du générateur) d'une distribution triphasée déséquilibrée nécessitent la connaissance des nombres complexes. Dans ce cas, une série d'exemples numériques nous permettra de comprendre le comportement d'un réseau triphasé équilibré et déséquilibré avec ou sans neutre afin de tirer des meilleures conclusions qui en découlent. L'intention de cette analyse est de présenter les comportements d'un réseau triphasé des charges déséquilibrés en étoile avec ou sans neutre, afin de bien ressortir des conclusions adéquates.

Méthodologie

Afin d'atteindre la finalité de cette recherche, nous avons pris une sélection des récepteurs d'impédances prises au hasard telles que

$Z_1 = 5|36^\circ \Omega$; $Z_2 = 10|36^\circ \Omega$; $Z_3 = 20|36^\circ \Omega$ ayant même facteur de puissance comme les premières analyses ; et

$Z_1 = 5|0^\circ \Omega$; $Z_2 = 10|0^\circ \Omega$; $Z_3 = 20|0^\circ \Omega$ ayant même facteur de puissance pour les deuxièmes analyses puis $Z_1 = 4|53^\circ \Omega$; $Z_2 = 5|20^\circ \Omega$; $Z_3 = 6|0^\circ \Omega$,

les impédances des récepteurs ayant les facteurs de puissance différents pour les troisièmes analyses comme échantillon de notre recherche.

Pour chaque analyse, les permutations de ces récepteurs étaient effectuées reparti sur les phases « 1, 2, 3 » d'un réseau triphasé. Ces études s'étaient déroulées dans la période comprise entre en Février 2022, et ce en ville de Butembo.

Résultats

Conventions de la théorie de recherche

L'ordre de numérotation des phases est à priori quelconque. Dans la plupart de cas, la convention en sens direct pour laquelle la phase 2 est située en arrière de la phase 1, et la phase 3 en arrière de la phase 2 est choisi au lieu du sens inverse pour lequel la phase 2 est avant de la première. Le terme en arrière signifiant en arrière dans le temps (sens trigonométrique). En ce qui concerne les notations des phases, on trouve aussi A, B, C ou R, S, T (*Chapitre 3 Circuits Triphasés équilibrés*, n.d.)

Les tensions s'écrivent donc en Séquence directe :

$$\begin{array}{ll} V1(t) = V_m \sin \omega t & V1(t) = V_m \cos \omega t = V_1|0^\circ \\ V2(t) = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) & \text{soit} \quad V2(t) = V_m \cos(\omega t - 120^\circ) = V_1|-120^\circ \\ V3(t) = V_m \sin(\omega t + 120^\circ) & V3(t) = V_m \cos(\omega t + 120^\circ) = V_1|120^\circ \end{array}$$

Circuits triphasés sans conducteur Neutre

Calcul de I_N

Le courant dans le neutre est tel que :

$$I_N = I_1 + I_2 + I_3, \text{ avec } I_1 = \frac{V_1}{Z_1}, I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \text{ et } I_3 = \frac{V_3}{Z_3}$$

Le calcul de I_N nécessite l'emploi d'outils mathématiques qui permettent d'effectuer des calculs entre grandeurs électriques qui présentent des déphasages différents : ce sont les nombres complexes. Les électriciens utilisent un opérateur qui gère de manière simple les rotations de 120° omniprésentes dans les réseaux triphasés :

L'opérateur a est tel que: $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$ Soit

$$\underline{a} = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{et} \quad \underline{a}^2 = \frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

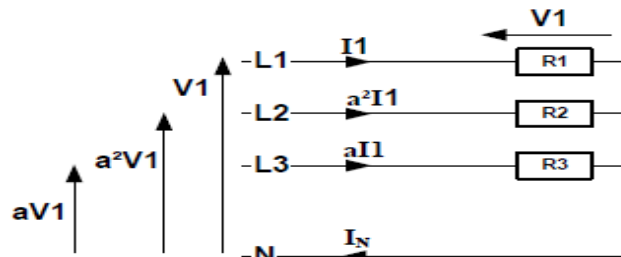
L'intérêt de l'opérateur « a » est de pouvoir exprimer toutes les grandeurs électriques à partir de la tension d'origine V_1 . Ainsi V_2 qui est déphasée de 240° ou $\frac{4\pi}{3}$ par rapport à V_1 est obtenue en effectuant l'opération suivante : $\underline{V}_2 = \underline{a}^2 \underline{V}_1$ avec $\underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$

La tension V_3 déphasée de 120° ou $\frac{2\pi}{3}$ est calculée en utilisant la même méthode : $\underline{V}_3 = \underline{a} \underline{V}_1$

Schéma équivalent

Le schéma équivalent du circuit exprimé en fonction de a et de V_1 est comme ci-dessous :

Figure1. Tensions en fonction de a



Expression du courant I_N en fonction de a et de V_1

L'expression du courant dans le neutre I_N peut désormais s'écrire:

En direct :

$$I_N = \frac{V_1}{Z_1} + \frac{a^2 V_1}{Z_2} + \frac{a V_1}{Z_3}$$

$$I_N = \frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_1}{Z_2} \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \frac{V_1}{Z_3} \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_1}{2Z_2} (-1 - j\sqrt{3}) + \frac{V_1}{2Z_3} (-1 + j\sqrt{3})$$

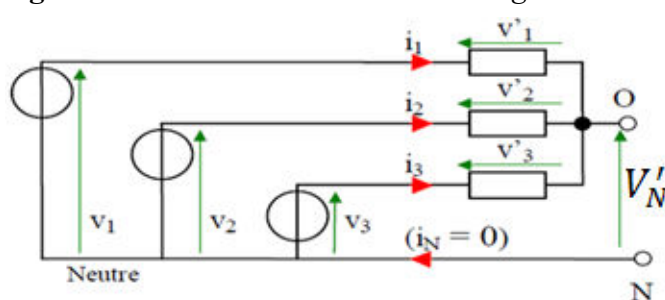
$$I_N = \frac{V_1}{Z_1} - \frac{V_1}{2Z_2} - \frac{V_1}{2Z_3} - j \left(\frac{\sqrt{3}V_1}{2Z_2} - \frac{\sqrt{3}V_1}{2Z_3} \right)$$

On observe que lorsque les impédances sont de valeurs égales, le courant dans le conducteur neutre est nul: $I_N = 0$ et $I_1 = I_2 = I_3$.

Circuits triphasés sans conducteur Neutre

Selon Piou (2014), lorsque le neutre du réseau n'est plus raccordé à la charge, la tension présente aux bornes de chaque élément prend une valeur V' qui varie en fonction du déséquilibre fixé par la valeur des résistances.

Figure 2 Neutre non raccordé à la charge



La figure ci-dessus permet d'écrire les relations suivantes :

$$V_1 - V'_1 = V'_N; V_2 - V'_2 = V'_N \text{ et } V_3 - V'_3 = V'_N.$$

$$I_1 = \frac{v'_1}{Z_1} = \frac{v_1 - V'_N}{Z_1}; I_2 = \frac{v'_2}{Z_2} = \frac{v_2 - V'_N}{Z_2} \text{ et } I_3 = \frac{v'_3}{Z_3} = \frac{v_3 - V'_N}{Z_3}$$

Les relations de mailles ne se referment plus par le neutre et il n'y a plus égalité des tensions simples sur les charges : $V_{Zk} \neq V_k$ avec $V_1 \neq V_2 \neq V_3$.

Par ailleurs, $I_N = I_1 + I_2 + I_3 = 0$ avec $I_1 \neq I_2 \neq I_3$. Il y a donc déséquilibre en courant et en tension.

Applications numériques

Courant dans le neutre

Nous étudions le déséquilibre pour le cas tel que : $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ (en module et/ou en argument).

Exemple 1

$Z_1 = 5|0^\circ \Omega$; $Z_2 = 10|0^\circ \Omega$; $Z_3 = 20|0^\circ \Omega$ Et $V=230V$; avec $Z_1 < Z_2 < Z_3$

$$\underline{I_N} = \frac{230}{5} - \frac{230}{20} - \frac{230}{40} - j \left(\frac{400}{20} - \frac{400}{40} \right) = 30,4|-19^\circ A.$$

En permutant les récepteurs sur les phases tels que :

$Z_1 = 5|0^\circ \Omega$; $Z_2 = 20|0^\circ \Omega$; $Z_3 = 10|0^\circ \Omega$ Et $V=230V$.

$$\underline{I_N} = \frac{230}{5} - \frac{230}{40} - \frac{230}{20} - j \left(\frac{400}{40} - \frac{400}{20} \right) = 30,4|19^\circ A.$$

Exemple 2

$Z_1 = 5|36^\circ \Omega$; $Z_2 = 10|0^\circ \Omega$; $Z_3 = 20|53^\circ \Omega$ Et $V=230V$

$$\underline{I_N} = \frac{230}{5|36^\circ} - \frac{230}{20|0^\circ} - \frac{230}{40|53^\circ} - j \left(\frac{400}{20|0^\circ} - \frac{400}{40|53^\circ} \right)$$

$$\underline{I_N} = 46|-36^\circ - 11,5|0^\circ - 5,75|-53^\circ - j(20|0^\circ - 10|-53^\circ) = 47,3|-50,2^\circ A$$

En permutant les récepteurs sur les phases tels que :

$Z_1 = 5|36^\circ \Omega$; $Z_2 = 20|53^\circ \Omega$; $Z_3 = 10|0^\circ \Omega$ Et $V=230V$

$$\underline{I_N} = \frac{230}{5|36^\circ} - \frac{230}{40|53^\circ} - \frac{230}{20|0^\circ} - j \left(\frac{400}{40|53^\circ} - \frac{400}{20|53^\circ} \right)$$

$$\underline{I_N} = 46|-36^\circ - 11,5|0^\circ - 5,75|-53^\circ - j(10|-53^\circ - 20|0^\circ)$$

$$= 37,2 - 27j - 11,5 - 3,46 + 4,6j - j(6 - 8j - 20) = 16,5|-30,5^\circ A$$

En permutant les récepteurs sur les phases tels que :

$Z_1 = 10|0^\circ \Omega$; $Z_2 = 5|36^\circ \Omega$; $Z_3 = 20|53^\circ \Omega$ Et $V=230V$

$$\underline{I_N} = \frac{230}{10|0^\circ} - \frac{230}{10|36^\circ} - \frac{230}{40|53^\circ} - j \left(\frac{400}{10|36^\circ} - \frac{400}{40|53^\circ} \right) = 16,7|-150,6^\circ A$$

En permutant les récepteurs sur les phases tels que :

$Z_1 = 10|0^\circ \Omega$; $Z_2 = 20|53^\circ \Omega$; $Z_3 = 5|36^\circ \Omega$ Et $V=230V$

$$\underline{I_N} = \frac{230}{10|0^\circ} - \frac{230}{40|53^\circ} - \frac{230}{10|36^\circ} - j \left(\frac{400}{40|53^\circ} - \frac{400}{10|36^\circ} \right)$$

$$\underline{I_N} = 23|0^\circ - 5,75|-53^\circ - 23|-36^\circ - j(10|-53^\circ - 40|-36^\circ) = 47,3|69,6^\circ A$$

Potentiel du neutre et d.d.p des phases

Exemple 1 : récepteurs résistifs

$Z_1 = 5|0^\circ \Omega$; $Z_2 = 10|0^\circ \Omega$; $Z_3 = 20|0^\circ \Omega$ Et $V = 230V$, avec $Z_1 < Z_2 < Z_3$

Nous allons considérer six combinaisons possibles de permutation de ces éléments (impédances) sur les phases et nous dresserons un tableau synthèse.

1. Z_1, Z_2, Z_3 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$\underline{V'_N} = \frac{\frac{230}{5|0^\circ} - \frac{230}{20|0^\circ} - \frac{230}{40|0^\circ} - j \left(\frac{400}{20|0^\circ} - \frac{400}{40|0^\circ} \right)}{\frac{1}{5|0^\circ} + \frac{1}{10|0^\circ} + \frac{1}{20|0^\circ}} = 86,8|-19,1^\circ V = 82 - j28,4 V ; \underline{I_N} =$$

$$30,4|-19^\circ A$$

$$\underline{V'_1} = \underline{V_1} - \underline{V'_N} = 230 - 82 + j28,4 = 150,5|10,8^\circ V \text{ (il y a baisse de tension)}$$

$$\underline{V'_2} = \underline{V_2} - \underline{V'_N} = -115 - 199,1j - 82 + j28,4 = 260,6|-139^\circ V \text{ (augmentation de la tension)}$$

$$\underline{V'_3} = \underline{V_3} - \underline{V'_N} = -115 + 199,1j - 82 + j28,4 = \underline{V'_3} = 301|131^\circ V \text{ (Plus grande tension)}$$

2. **Première permutation telle que** : Z_1, Z_3, Z_2 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$I_N = \frac{230}{5|0^\circ} - \frac{230}{40|0^\circ} - \frac{230}{20|0^\circ} - j \left(\frac{400}{40|0^\circ} - \frac{400}{20|0^\circ} \right) = 30,4|19^\circ A \text{ et } Y_t = 0.35|0^\circ mho$$

$$V'_N = \frac{I_N}{Y_t} = 86,85|19^\circ V = 82,11 + 28,27j$$

$$V'_1 = \underline{V_1} - \underline{V'_N} = 230 - 82,11 - 28,27j = 150,5|-10,8^\circ V \text{ (il y a baisse de tension)}$$

$$V'_2 = \underline{V_2} - \underline{V'_N} = -115 - 199,1j - 82,11 - 28,27j = 301|-131^\circ V \text{ (surtension)}$$

$$V'_3 = \underline{V_3} - \underline{V'_N} = -115 + 199,1j - 82,11 - 28,27j = 260,8|139^\circ V \text{ (Augmentation de la tension)}.$$

3. **Deuxième permutation telle que** : Z_2, Z_1, Z_3 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$I_N = \frac{230}{10|0^\circ} - \frac{230}{10|0^\circ} - \frac{230}{40|0^\circ} - j \left(\frac{400}{10|0^\circ} - \frac{400}{40|0^\circ} \right) = 30,5|-101^\circ A \text{ et } Y_t = 0.35|0^\circ mho$$

$$V'_N = \frac{I_N}{Y_t} = 87,2|-101^\circ V = -16,64 - 85,64j$$

$$V'_1 = \underline{V_1} - \underline{V'_N} = 230 + 16,64 + 85,64j = 261|19,1^\circ V \text{ (Augmentation de la tension)}$$

$$V'_2 = \underline{V_2} - \underline{V'_N} = -115 - 199,1j + 16,64 + 85,64j = 150|-130,3^\circ V \text{ (il y a baisse de tension)}$$

$$V'_3 = \underline{V_3} - \underline{V'_N} = -115 + 199,1j + 16,64 + 85,64j = 301|109^\circ V \text{ (Surtension)}.$$

4. **Troisième permutation telle que** : Z_2, Z_3, Z_1 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$I_N = \frac{230}{10|0^\circ} - \frac{230}{40|0^\circ} - \frac{230}{10|0^\circ} - j \left(\frac{400}{40|0^\circ} - \frac{400}{10|0^\circ} \right) = 30,5|101^\circ A \text{ et } Y_t = 0.35|0^\circ mho$$

$$V'_N = \frac{I_N}{Y_t} = 87,2|101^\circ V = -16,64 + 85,64j$$

$$V'_1 = \underline{V_1} - \underline{V'_N} = 230 + 16,64 - 85,64j = 261|-19,1^\circ V \text{ (Augmentation de la tension)}$$

$$V'_2 = \underline{V_2} - \underline{V'_N} = -115 - 199,1j + 16,64 - 85,64j = 301|-109^\circ V \text{ (Surtension)}$$

$$V'_3 = \underline{V_3} - \underline{V'_N} = -115 + 199,1j + 16,64 - 85,64j = 150|130^\circ V \text{ (il y a baisse de tension)}.$$

5. **Quatrième permutation telle que** : Z_3, Z_1, Z_2 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$I_N = \frac{230}{20|0^\circ} - \frac{230}{10|0^\circ} - \frac{230}{20|0^\circ} - j \left(\frac{400}{10|0^\circ} - \frac{400}{20|0^\circ} \right) = 30,47|-139^\circ A \text{ et } Y_t = 0.35|0^\circ mho$$

$$V'_N = \frac{I_N}{Y_t} = 87|-139^\circ V = -65,6 - 57j$$

$$V'_1 = \underline{V_1} - \underline{V'_N} = 230 + 65,6 + 57j = 301|10,9^\circ V \text{ (Surtension)}$$

$$V'_2 = \underline{V_2} - \underline{V'_N} = -115 - 199,1j + 65,6 + 57j = 150,5|-109^\circ V \text{ (il y a baisse de tension)}$$

$$V'_3 = \underline{V_3} - \underline{V'_N} = -115 + 199,1j + 65,6 + 57j = 260,8|101^\circ V \text{ (Augmentation de la tension)}.$$

6. **Cinquième permutation telle que** : Z_3, Z_2, Z_1 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$I_N = \frac{230}{20|0^\circ} - \frac{230}{20|0^\circ} - \frac{230}{10|0^\circ} - j \left(\frac{400}{20|0^\circ} - \frac{400}{10|0^\circ} \right) = 30,4|139^\circ A \text{ et } Y_t = 0.35|0^\circ mho$$

$$V'_N = \frac{I_N}{Y_t} = 87|139^\circ V = -65,6 + 57j$$

$$V'_1 = \underline{V_1} - \underline{V'_N} = 230 + 65,6 - 57j = 301|-10,9^\circ V \text{ (Surtension)}$$

$$V'_2 = \underline{V_2} - \underline{V'_N} = -115 - 199,1j + 65,6 - 57j = 260,8|-101^\circ V \text{ (Augmentation de la tension)}$$

$$V'_3 = \underline{V}_3 - \underline{V}'_N = -115 + 199,1j + 65,6 - 57j = 150,5[109^\circ \text{ V (Il y a baisse de tension)}).$$

Tableau 1 synthèse pour les récepteurs déséquilibrés de même $\cos\varphi$

N°	1ère phase	2ème phase	3ème phase	I_N	V'_N	V'_1	V'_2	V'_3	Constatation
1	Z_1	Z_2	Z_3	30,4	87	150	261	301	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_1
2	Z_1	Z_3	Z_2	30,4	87	150	301	261	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_1
3	Z_2	Z_1	Z_3	30,5	87	261	150	301	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_1
4	Z_2	Z_3	Z_1	30,5	87	261	301	150	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_1
5	Z_3	Z_1	Z_2	30,4	87	301	150	261	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_1
6	Z_3	Z_2	Z_1	30,4	87	301	261	150	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_1

Avec $Z_1 < Z_2 < Z_3$

Exemple 2 : récepteurs inductifs de même $\cos\varphi = 0,809$

$Z_1 = 5[36^\circ \Omega$; $Z_2 = 10[36^\circ \Omega$; $Z_3 = 20[36^\circ \Omega$ Et $V = 230\text{V}$, $Z_1 < Z_2 < Z_3$

$$V'_N = \frac{\frac{230}{5[36^\circ} - \frac{230}{20[36^\circ} - \frac{230}{40[36^\circ} - j\left(\frac{400}{20[36^\circ} - \frac{400}{40[36^\circ}\right)}{\frac{1}{5[36^\circ} + \frac{1}{10[36^\circ} + \frac{1}{20[36^\circ}} = 87,1[-19,2^\circ \text{ V} = 82,2 - j28,6 \text{ V}$$

Calculons les tensions aux bornes des récepteurs :

$$V'_1 = \underline{V}_1 - \underline{V}'_N = 230 - 82,2 + j28,6 = 147,8 + j28,4 = 150,5[10,9^\circ \text{ V}$$

$$V'_2 = \underline{V}_2 - \underline{V}'_N = -115 - 199,1j - 82,2 + j28,6 = -197,2 - 170,5j = 260,6[-139,1^\circ \text{ V}$$

$$V'_3 = \underline{V}_3 - \underline{V}'_N = -115 + 199,1j - 82,2 + j28,6 = -197,2 + 227,7j = 301,2[130,8^\circ \text{ V}$$

Nous constatons une surtension aux bornes du récepteur de grande impédance c'est-à-dire à la phase la moins chargée et une baisse de tension aux bornes du récepteur de faible impédance c'est-à-dire à la phase la plus chargée comme le montre un cas particulier selon qu'a annoncer Sanchez (2013).

Exemple 3. Charges de natures différentes

$Z_1 = 4[53^\circ \Omega$; $Z_2 = 5[20^\circ \Omega$; $Z_3 = 6[0^\circ \Omega$ Et $V = 230\text{V}$, avec $|Z_1| < |Z_2| < |Z_3|$, nous aurons : Z_1, Z_2, Z_3 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$V'_N = \frac{\frac{230}{4[53^\circ} - \frac{230}{10[20^\circ} - \frac{230}{12[0^\circ} - j\left(\frac{400}{10[20^\circ} - \frac{400}{12[0^\circ}\right)}{\frac{1}{5[20^\circ} + \frac{1}{4[53^\circ} + \frac{1}{6[0^\circ}} = 81,8[-87,1^\circ \text{ V} = 4 - j81,7 \text{ V}$$

$$I_N = 46,73[-115,13^\circ \text{ A}$$

Les tensions trouvées sont

$$V'_1 = 230 - 4 + j81,7 = 240,3[19,8^\circ \text{ V}$$

$$V'_2 = -115 - 199,18j - 4 + j81,7 = 124[-162,5^\circ \text{ V}$$

$$V'_3 = -115 + 199,18j - 4 + j81,7 = 344,2[125,3^\circ \text{ V}$$

Première permutation telle que : Z_1, Z_3, Z_2 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$V'_N = \frac{\frac{230}{4|53^\circ} - \frac{230}{12|0^\circ} - \frac{230}{10|20^\circ} - j\left(\frac{400}{12|0^\circ} - \frac{400}{10|20^\circ}\right)}{\frac{1}{5|20^\circ} + \frac{1}{4|53^\circ} + \frac{1}{6|0^\circ}} = 60,63|-49,5^\circ V = 39,36 - j46,11 V$$

$$I_N = 34,7|-77,46^\circ A$$

Les tensions trouvées sont

$$V'_1 = 230 - 39,36 + j46,11 = 196,13|13,59^\circ V$$

$$V'_2 = -115 - 199,18j - 39,36 + j46,11 = 217,38|-135,2^\circ V$$

$$V'_3 = -115 + 199,18j - 39,36 + j46,11 = 289,8|122,18^\circ V$$

Deuxième permutation telle que : Z_2, Z_1, Z_3 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$V'_N = \frac{\frac{230}{5|20^\circ} - \frac{230}{8|53^\circ} - \frac{230}{12|0^\circ} - j\left(\frac{400}{8|53^\circ} - \frac{400}{12|0^\circ}\right)}{\frac{1}{5|20^\circ} + \frac{1}{4|53^\circ} + \frac{1}{6|0^\circ}} = 60,91|190,38^\circ V = -59,91 - j10,97 V$$

$$I_N = 34,7|162,4^\circ A$$

Les tensions trouvées sont

$$V'_1 = 230 + 59,91 + j10,97 = 289,95 + j10,97 = 290,15|2,16^\circ V$$

$$V'_2 = -115 - 199,18j + 59,91 + j10,97 = -55,09 - j188,21 = 196,1|-106^\circ V$$

$$V'_3 = -115 + 199,18j + 59,91 + j10,97 = -55,09 + j210,15 = 217|104,6^\circ V$$

Troisième permutation telle que : Z_2, Z_3, Z_1 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$V'_N = \frac{\frac{230}{5|20^\circ} - \frac{230}{12|0^\circ} - \frac{230}{8|53^\circ} - j\left(\frac{400}{12|0^\circ} - \frac{400}{8|53^\circ}\right)}{\frac{1}{5|20^\circ} + \frac{1}{6|0^\circ} + \frac{1}{4|53^\circ}} = 82|32,83^\circ V = 68,9 + j44,45 V$$

$$I_N = 46,8|4,88^\circ A$$

Calculons les courants de ligne :

$$V'_1 = 230 - 68,9 - j44,45 = 167,1|-15,4^\circ V$$

$$V'_2 = -115 - 199,1j - 68,9 - j44,45 = 305,2|-127^\circ V$$

$$V'_3 = -115 + 199,1j - 68,9 - j44,45 = 240,3|140^\circ V$$

Quatrième permutation telle que : Z_3, Z_1, Z_2 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$V'_N = \frac{\frac{230}{6|0^\circ} - \frac{230}{8|53^\circ} - \frac{230}{10|20^\circ} - j\left(\frac{400}{8|53^\circ} - \frac{400}{10|20^\circ}\right)}{\frac{1}{5|20^\circ} + \frac{1}{4|53^\circ} + \frac{1}{6|0^\circ}} = 82|152,95^\circ V = -73 + j37,29 V$$

$$I_N = 46,77|125^\circ A$$

Les tensions trouvées sont

$$V'_1 = 230 + 73 - j37,29 = 289,95 + j10,97 = 305,28|-7^\circ V$$

$$V'_2 = -115 - 199,18j + 73 - j37,29 = 240|-100^\circ V$$

$$V'_3 = -115 + 199,18j + 73 - j37,29 = 167,24|104,6^\circ V$$

Cinquième permutation telle que : Z_3, Z_2, Z_1 sur les phases respectivement 1,2,3.

$$V'_N = \frac{\frac{230}{6|0^\circ} - \frac{230}{10|20^\circ} - \frac{230}{8|53^\circ} - j\left(\frac{400}{10|20^\circ} - \frac{400}{8|53^\circ}\right)}{\frac{1}{5|20^\circ} + \frac{1}{4|53^\circ} + \frac{1}{6|0^\circ}} = 60,7|70,21^\circ V = 20,55 + j57,11 V$$

$$I_N = 34,68|42,2^\circ A$$

Les tensions trouvées sont

$$V'_1 = 230 - 20,55 - j57,11 = 289,95 + j10,97 = 305,28 \angle -7^\circ V$$

$$V'_2 = -115 - 199,18j - 20,55 - j57,11 = 240 \angle -100^\circ V$$

$$V'_3 = -115 + 199,18j - 20,55 - j57,11 = 167,24 \angle 104,6^\circ V$$

Tableau 2 Synthèse pour les récepteurs déséquilibrés de valeurs et de $\cos\phi$ différents

N°	1ère phase	2ème phase	3ème phase	I_N	V'_N	V'_1	V'_2	V'_3	Constatation
1	Z_1	Z_2	Z_3	46,7	82	240	167	305	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_2
2	Z_1	Z_3	Z_2	34,6	60,6	196	217,3	290	Surtension à Z_2 et baisse de tension à Z_1
3	Z_2	Z_1	Z_3	34,7	60,9	290	196	217	Surtension à Z_2 et baisse de tension à Z_1
4	Z_2	Z_3	Z_1	46,8	82	167	305	240	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_2
5	Z_3	Z_1	Z_2	46,7	82	305	240	167	Surtension à Z_3 et baisse de tension à Z_2
6	Z_3	Z_2	Z_1	34,6	60,7	217	290	196	Surtension à Z_2 et baisse de tension à Z_1

Avec $|Z_1| < |Z_2| < |Z_3|$

Exemple 4. Charge capacitive, inductive et résistive

$$Z_1 = 6 \angle -53^\circ \Omega ; Z_2 = 4 \angle 45^\circ \Omega ; Z_3 = 5 \angle 0^\circ \Omega \text{ Et } V = 230V$$

$$I_N = \frac{230}{6 \angle -53^\circ} - \frac{230}{8 \angle 45^\circ} - \frac{230}{10 \angle 0^\circ} - j \left(\frac{400}{8 \angle 45^\circ} - \frac{400}{10 \angle 0^\circ} \right) = 78,6 \angle 135^\circ A$$

Dans ce circuit, la phase « 2 » sur laquelle est branché le récepteur de $4 \angle 45^\circ \Omega$ est plus chargée par rapport aux autres dans le fonctionnement normal. Le module du courant dans ce conducteur vaut $\frac{230}{4} = 57,5 A$ et le courant dans le neutre est de $76,6 A$.

Discussion

Du courant dans le neutre

En régime sinusoïdal, le courant dans le conducteur neutre dépend du déséquilibre entre les charges monophasées raccordées entre phases et neutre. Dans le cas de charges déséquilibrées de même nature, le courant dans le neutre est inférieur au courant le plus élevé du circuit. Dans le cas de charges déséquilibrées de natures différentes sur les phases (résistive, inductive, capacitive), il peut arriver que le courant dans le neutre soit supérieur au courant dans chacune des phases. Ce cas n'est toutefois pas très courant dans la pratique c'est le cas d'une phase surcompensée :

- Dans un circuit déséquilibré, le courant dans le neutre est différent de zéro.
- Le module du courant dans le neutre est le même dans un circuit déséquilibré si les récepteurs ont même facteur de puissance même pour toute permutation des récepteurs sur les phases.
- Pour les récepteurs n'ayant pas le même facteur de puissance, le module du courant dans le neutre n'a pas toujours la même valeur. En permutant les récepteurs sur les phases, le module du courant I_N change aussi.

Le changement du module de I_N ne prend que deux valeurs ; mais l'argument peut prendre plus de deux valeurs pour les différentes permutations. Lors de la coupure du neutre, le courant dans une ou deux des phases peut dépasser le courant nominal qui y existait. Dans ce cas il

faudra bien dimensionner le disjoncteur de protection (tripolaire ou tetrapolaire) de façon que s'il y avait coupure du neutre, un grand courant circulerait dans une ou deux phases.

Des tensions des phases

a. Pour un circuit triphasé déséquilibré dont $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3$; il se présente toujours une surtension à la phase la moins chargée et une baisse de tension à la phase la plus chargée, pouvant causer des dommages dans les installations.

b. Pour un circuit triphasé déséquilibré ayant des récepteurs de natures et puissances différentes sur les phases ; il ne se présente pas nécessairement une surtension à la phase la moins chargée et une baisse de tension à la phase la plus chargée. A toute permutation des récepteurs sur les phases, on peut assister un nouveau comportement. C'est le cas le plus fréquent : c'est ce qui n'est pas bien précis dans l'ouvrage de Marc SANCHEZ où il s'est attelé seulement à des charges résistives en ignorant d'autres natures de charges donnant des tensions pouvant conduire à une confusion et une mauvaise conclusion. Le neutre ne doit jamais être coupé seul : il doit être coupé après les phases et rétabli avant les phases (*Un Conducteur Actif et Singulier : Le Neutre*, n.d.).

Pour être coupé, le neutre doit être sûrement identifiable, c'est pourquoi les normes d'installation imposent son repérage par la **couleur bleu clair** et la lettre N sur la borne correspondante : affirme Abdelkrim (2020). Afin de bien protéger des circuits déséquilibrés dont l'alimentation est triphasée avec neutre on réalise une protection tétrapolaire. Dans une installation avec fusibles, si le neutre doit obligatoirement être protégé (schéma IT par exemple), il faudra installer un support de fusible avec dispositif de commande d'ouverture d'un contacteur en série avec ces fusibles.

En ce qui concerne la position du conducteur Neutre sur l'appareillage, elle n'est que rarement précisée dans les normes, hormis par exemple en France dans la norme C 62-411, pour les disjoncteurs de branchement BT. Grâce au code de couleur, il est possible de distinguer le rôle des fils électriques plus simplement et effectuer des installations électriques en respectant la norme NFC 15-100. Le neutre est bleu (<https://labricolec.fr/neutre-en-electricite>). Dans le cas les plus extrêmes, la rupture du neutre peut même conduire à l'incendie du logement (<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons...>).

Lors de la coupure du neutre, les tensions aux bornes des récepteurs ne sont plus décalées de 120° . La figure ci-dessous représente les tensions et courants présents dans un système déséquilibré neutre non relié :

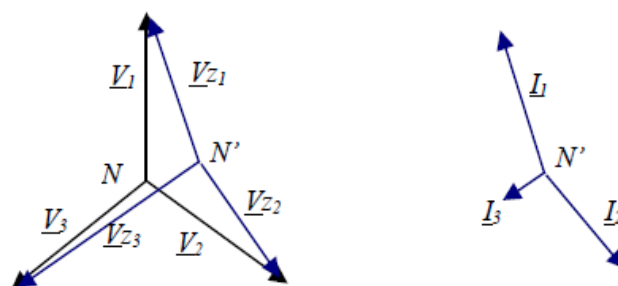


Figure 3 Tensions et courants dans un système déséquilibré neutre non relié

Conclusion

Au terme de notre étude axé sur l'analyse du comportement électrique d'un circuit triphasé déséquilibré, il nous est utile de récapituler les idées maitresses qui ont constitué les grandes lignes de notre travail. L'objectif poursuivi dans ce travail consistait à nous imprégner à la présentation du comportement d'un réseau triphasé des charges déséquilibrés en étoile avec ou sans neutre, afin de bien ressortir une conclusion adéquate.

A l'issue de l'analyse des données, nous sommes arrivés aux résultats selon lesquels que le module du courant dans le neutre ne prend qu'une même valeur dans un circuit déséquilibré que si les récepteurs ont même facteur de puissance pour toute permutation des récepteurs sur les phases, dans le cas contraire. Ce module du courant pourra prendre alternativement une valeur ou une autre selon les différentes permutations des récepteurs sur les phases. Les résultats prouvent aussi que dans le cas de charges déséquilibrées de natures différentes sur les phases (résistive, inductive, capacitive), il peut arriver que le courant dans le neutre soit supérieur au courant dans chacune des phases. Cependant, ce cas n'est toutefois pas très courant en pratique, c'est le cas d'une distribution dont une phase est surcompensée.

En régime sinusoïdal, le courant dans le conducteur neutre dépend du déséquilibre entre les charges monophasées raccordées entre phases et neutre. Il a été démontré aussi que pour un circuit triphasé déséquilibré de même facteur de puissance sur les phases, il se présente toujours une surtension à la phase la moins chargée et une baisse de tension à la phase la plus chargée, ce qui n'est pas toujours vrai pour les charges de natures différentes. Du reste, nous recommandons aux techniciens électriciens de ne jamais couper le neutre seul. Il doit être coupé après les phases et rétabli avant les phases dans le cas où les manettes sont séparées. De même, il faudra alors bien répartir les récepteurs sur les phases pour éviter les forts déséquilibres. Afin de bien protéger des circuits déséquilibrés dont l'alimentation est triphasée avec neutre on réalise une protection tétrapolaire.

Références

- Abdelkrim, B. (2020). Cours de schémas Et Appareillage Électrique, Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh.
- Chapitre 3 Circuits triphasés déséquilibrés. (n.d.). Retrieved from http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Electrotechnique/Chap3.pdf
- Mansour, A. (2014). Cours d'électrotechnique, Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul.
- Piou, M. (2014). Electricité : Analyse des signaux et des circuits électriques, Nantes.
- Sanchez, M. (2013). Circuits triphasés déséquilibrés, <http://ahistace.chez-alice.fr/documents/Chapitre%203-Reseau%20triphase.pdf>
- Un conducteur actif et singulier : le neutre. (n.d.). Sitelec.org. Retrieved October 16, 2022, from https://sitelec.org/download_page.php?filename=datasheet/ct212.pdf