

УДК 621.31

М.М.ФЕДОРОВ¹(д-р техн. наук, проф.), И.П.КУТКОВОЙ²¹ Государственное высшее учебное заведение

«Донецкий национальный технический университет»

² Государственное высшее учебное заведение

«Донбасская государственная машиностроительная академия»

Ket@dgma.donetsk.ua

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ

Разработаны методы определения параметров эквивалентной схемы замещения несимметричных трехфазных систем. Предложен алгоритм определения комплексов ЭДС эквивалентной схемы замещения и способ определения внутренних сопротивлений каждой из фаз с учетом активной и реактивной составляющей.

Ключевые слова: трехфазные системы, схема замещения, метод симметричных составляющих, комплексное входное сопротивление, холостой ход, короткое замыкание.

Постановка проблемы. Эксплуатация трехфазных систем сопровождается различными несимметричными режимами. Подобные несимметрии могут быть вызваны неисправностями отдельных источников трехфазной ЭДС или резко несимметричными нагрузками, включающие различные аварийные режимы отдельных потребителей. Подобная несимметрия оказывает влияние на режимы работы различных потребителей. Для оценки электромеханических характеристик и режима работы отдельных потребителей весьма удобно иметь эквивалентную схему замещения трехфазной системы, в которой несимметричными могут быть как ЭДС отдельных фаз, так и их внутренние сопротивления.

Анализ публикаций. В работе [1], была рассмотрена схема замещения активного трехполюсника в виде эквивалентной звезды с двумя источниками питания и тремя внутренними сопротивлениями. Определение параметров эквивалентной схемы замещения трехфазных систем, вызывает определенные затруднения, так как необходимо определять не только величину фазных ЭДС, но и их сдвиг по фазе. Кроме того, в схемах замещения необходимо также определять внутренние сопротивления каждой из фаз с учетом активной и реактивной составляющей, которые в общем случае различны.

Цель работы. Разработка алгоритма определения параметров эквивалентной схемы замещения несимметричных трехфазных систем ($\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C, \underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$).

Результаты исследований. Известно, что эквивалентная схема замещения трехфазной системы (рис. 1), может быть представлена трёхлучевой звездой и имеет вид, приведенный на рис. 2.

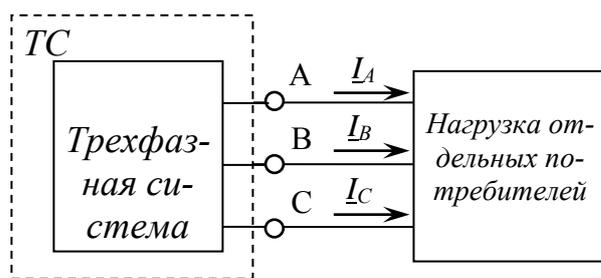


Рисунок 1 – Произвольная трехфазная система

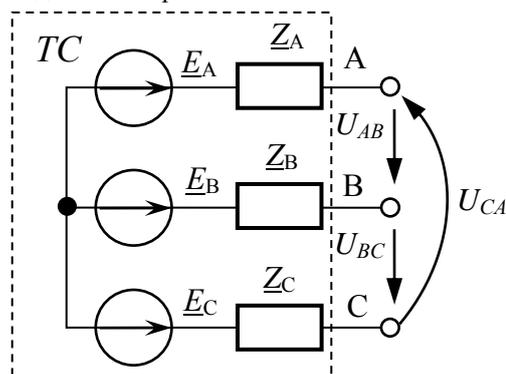


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения

Приведенная эквивалентная схема содержит шесть элементов: три несимметричных источника синусоидальных ЭДС ($\underline{E}_A, \underline{E}_B$ и \underline{E}_C) и три комплексных сопротивления ($\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$), параметры которых необходимо определить.

При определении комплексов сопротивлений отдельных фаз $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B$ и \underline{Z}_C , используются комплексы входных сопротивлений $\underline{Z}_{вхAB}, \underline{Z}_{вхBC}, \underline{Z}_{вхCA}$. Алгоритм определения комплексного входного сопротивления, например $\underline{Z}_{вхAB} = r_{вхAB} \pm jx_{вхAB}$, предполагает следующее:

1) Проведение опыта холостого хода относительно зажимов $A-B$ с измерением напряжения U_{AB} .

2) Опыт короткого замыкания $A-B$ с измерением тока $I_{кAB}$.

По данным опыта холостого хода и короткого замыкания определяют модуль входного сопротивления:

$$Z_{\text{вх}AB} = \frac{U_{AB}}{I_{кAB}} = \sqrt{r_{\text{вх}AB}^2 + x_{\text{вх}AB}^2}.$$

3) Опыт с подключением известного ёмкостного сопротивления x_c к зажимам $A-B$ с последующим измерением тока I'_{AB} . В этом случае входное сопротивление равно

$$Z'_{\text{вх}AB} = \frac{U_{AB}}{I'_{AB}} = \sqrt{r_{\text{вх}AB}^2 + (x_{\text{вх}AB} - x_c)^2}.$$

В результате получаем систему двух уравнений с неизвестными $r_{\text{вх}AB}$ и $x_{\text{вх}AB}$:

$$\begin{cases} Z_{\text{вх}AB} = \sqrt{r_{\text{вх}AB}^2 + x_{\text{вх}AB}^2} \\ Z'_{\text{вх}AB} = \sqrt{r_{\text{вх}AB}^2 + (x_{\text{вх}AB} - x_c)^2}. \end{cases}$$

Решая систему, определяем неизвестные сопротивления $r_{\text{вх}AB}$ и $x_{\text{вх}AB}$:

$$x_{\text{вх}AB} = \frac{(Z_{\text{вх}AB})^2 - (Z'_{\text{вх}AB})^2 - x_c^2}{2x_c}; \quad r_{\text{вх}AB} = \sqrt{Z_{\text{вх}AB}^2 - x_{\text{вх}AB}^2}.$$

Если знак сопротивления $x_{\text{вх}AB}$ будет положительным, то это означает индуктивный характер сопротивления; соответственно, в случае отрицательного знака получаем ёмкостное сопротивление $x_{\text{вх}AB}$.

Если опыт короткого замыкания невозможен из-за слишком большого тока, производится опыт нагрузки на известное резистивное сопротивление R с последующим измерением тока нагрузки $I_{нAB}$ и вычислением модуля входного сопротивления $Z_{\text{вх}AB} = \frac{U_{AB}}{I_{нAB}}$.

Реактивное сопротивление $x_{\text{вх}AB}$ вычисляется по приведенной выше формуле, а искомое резистивное

$$r_{\text{вх}AB} = \sqrt{Z_{\text{вх}AB}^2 - x_{\text{вх}AB}^2} - R.$$

Аналогично определяются входные сопротивления $Z_{\text{вх}BC}$ и $Z_{\text{вх}CA}$.

Далее находят эквивалентные сопротивления Z_A , Z_B и Z_C [1]:

$$Z_A = \frac{1}{2}(Z_{\text{вх}AB} + Z_{\text{вх}CA} - Z_{\text{вх}BC}); \quad Z_B = \frac{1}{2}(Z_{\text{вх}AB} + Z_{\text{вх}BC} - Z_{\text{вх}CA});$$

$$Z_C = \frac{1}{2}(Z_{\text{вх}CA} + Z_{\text{вх}BC} - Z_{\text{вх}AB}).$$

Комплексы фазных ЭДС (\underline{E}_A , \underline{E}_B и \underline{E}_C) эквивалентной схемы замещения (рис. 2) в общем случае представляют собой несимметричную трехфазную систему, параметры которой определяются с помощью метода симметричных составляющих. Для трехпроводной системы составляющие нулевой последовательности отсутствуют, поэтому будем иметь три источника с прямой (\underline{E}_{A1} , \underline{E}_{B1} и \underline{E}_{C1}) и обратной (\underline{E}_{A2} , \underline{E}_{B2} и \underline{E}_{C2}) последовательностью (рис. 3).

В результате комплексы ЭДС источников питания (рис. 2) соответственно равны

$$\underline{E}_A = \underline{E}_{A1} + \underline{E}_{A2}, \quad \underline{E}_B = \underline{E}_{B1} + \underline{E}_{B2}, \quad \underline{E}_C = \underline{E}_{C1} + \underline{E}_{C2}.$$

Комплексы ЭДС (\underline{E}_A , \underline{E}_B и \underline{E}_C) определяют с помощью комплексных линейных напряжений \underline{U}_{AB} , $\underline{U}_{ВС}$ и \underline{U}_{CA} . Эти комплексы линейных напряжений формируются по результатам опытов холостого хода (рис. 2) и их векторных диаграмм. Согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме для режима холостого хода имеем:

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0.$$

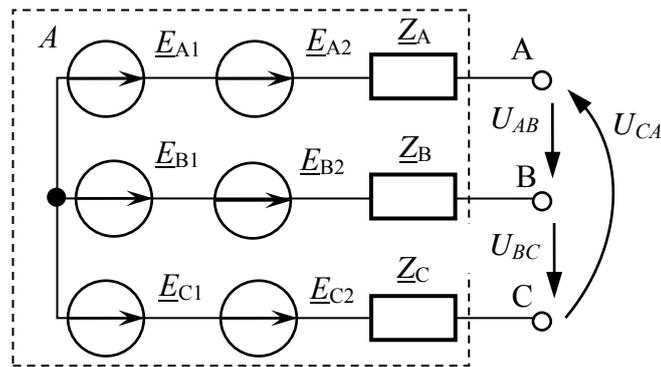
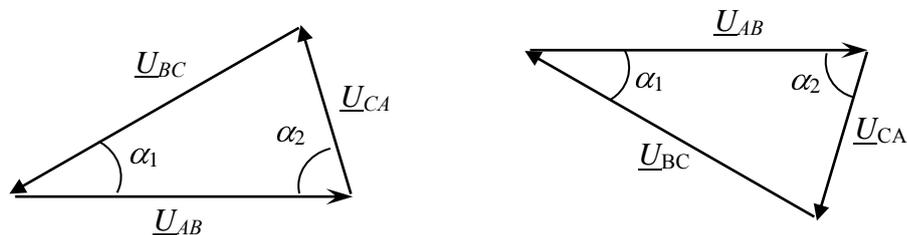


Рисунок 3 – Эквивалентная схема с использованием метода симметричных составляющих

Следовательно, векторная диаграмма имеет вид, представленный на рис. 4, которую можно построить по измеренным величинам линейных напряжений. На рис. 4 а приведена векторная диаграмма, которая соответствует прямому порядку следования фаз, а на рис. 4 б – обратному порядку следования фаз, порядок следования фаз которых определяется известными методами [2].



а) – прямой порядок чередования фаз

б) – обратный порядок чередования фаз

Рисунок 4 – Векторная диаграмма напряжений холостого хода

Алгоритм формирования комплексных линейных напряжений следующий. Комплексный вектор одного из напряжений, например, \underline{U}_{AB} , направляем по действительной оси. Тогда, определив углы α_1 и α_2 (рис. 4), формируем комплексы линейных напряжений:

при прямом порядке следования фаз (рис. 4 а) – $\underline{U}_{AB} = U_{AB}$,

$$\underline{U}_{BC} = U_{BC} e^{j(\alpha_1 - 180^\circ)} = U_{BC} e^{j\psi_{BC}}, \quad \underline{U}_{CA} = U_{CA} e^{j(180^\circ - \alpha_2)} = U_{CA} e^{j\psi_{CA}};$$

при обратном порядке следования фаз (рис. 4 б) – $\underline{U}_{AB} = U_{AB}$,

$$\underline{U}_{BC} = U_{BC} e^{j(180^\circ - \alpha_1)} = U_{BC} e^{j\psi_{BC}}, \quad \underline{U}_{CA} = U_{CA} e^{j(\alpha_2 - 180^\circ)} = U_{CA} e^{j\psi_{CA}}.$$

Используя комплексы линейных напряжений, определяем составляющие их прямой (\underline{U}_{AB1} , \underline{U}_{BC1} , \underline{U}_{CA1}) и обратной (\underline{U}_{AB2} , \underline{U}_{BC2} , \underline{U}_{CA2}) последовательностей. Они соответственно равны

$$\underline{U}_{AB1} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{AB} + a\underline{U}_{BC} + a^2\underline{U}_{CA}) = U_{AB1} e^{j\psi_1}; \quad \underline{U}_{BC1} = a^2\underline{U}_{AB1} = U_{BC1} e^{j(\psi_1 - 120^\circ)};$$

$$\underline{U}_{CA1} = a\underline{U}_{AB1} = U_{CA1} e^{j(\psi_1 + 120^\circ)};$$

$$\underline{U}_{AB2} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{AB} + a^2\underline{U}_{BC} + a\underline{U}_{CA}) = U_{AB2} e^{j\psi_2}; \quad \underline{U}_{BC2} = a\underline{U}_{AB2} = U_{BC2} e^{j(\psi_2 - 120^\circ)};$$

$$\underline{U}_{CA2} = a^2\underline{U}_{AB2} = U_{CA2} e^{j(\psi_2 + 120^\circ)}.$$

где $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор поворота.

Комплексы ЭДС прямой (\underline{E}_{A1} , \underline{E}_{B1} и \underline{E}_{C1}) и обратной последовательностей (\underline{E}_{A2} , \underline{E}_{B2} и \underline{E}_{C2}) (рис. 3) соответственно равны

$$\underline{E}_{A1} = \frac{U_{AB1}}{\sqrt{3}} e^{j(\psi_1 - 30^\circ)}; \quad \underline{E}_{B1} = \frac{U_{BC1}}{\sqrt{3}} e^{j(\psi_1 - 150^\circ)}; \quad \underline{E}_{C1} = \frac{U_{CA1}}{\sqrt{3}} e^{j(\psi_1 + 90^\circ)};$$

$$\underline{E}_{A2} = \frac{U_{AB2}}{\sqrt{3}} e^{j(\psi_2+30^\circ)}; \underline{E}_{B2} = \frac{U_{BC2}}{\sqrt{3}} e^{j(\psi_2+150^\circ)}; \underline{E}_{C2} = \frac{U_{CA2}}{\sqrt{3}} e^{j(\psi_2-90^\circ)}.$$

Таким образом, получена эквивалентная схема замещения трехфазной системы, позволяющая рассчитывать и анализировать режимы работы отдельных потребителей. Необходимо отметить, что для отдельных потребителей трехфазной системы, в зависимости от их мест включения и разброса вдоль ЛЭП, параметры эквивалентной схемы замещения могут быть различны.

Вывод. Приведенный алгоритм позволяет определить параметры схемы замещения трехфазной несимметричной системы и дает возможность с достаточной точностью оценить характеристики отдельных потребителей в различных режимах работы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фёдоров М.М. Эквивалентные схемы замещения активных трёх полюсников с синусоидальными источниками питания / М.М. Фёдоров, А.В. Корощенко, И.П. Кутковой // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - 2012. - № 1 (12) – 2 (13). - С. 245-249.
2. Рибалко М.П. Теоретичні основи електротехніки: лінійні електричні кола / М.П. Рибалко, В.О. Есауленко, В.І. Костенко. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513 с.

REFERENCES

1. Fedorov M.M., Koroshchenko A.V., Kutkovoy I.P. *Ekvivalentnyye skhemy zameshcheniya aktivnykh trekhpolusnikov s sinusoidalnymi istochnikami pitaniya* [Equivalent circuits of active trehpolusnikov with sinusoidal replacement power supplies] // *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu* [Scientific papers of Donetsk National Technical University]. Seriya: Yelektrotekhnika i yenergetika.- Donetsk.2012; № 1 (12) – 2 (13): 245-249.
2. M.P.Ribalko, V.O.Esaulyenko, V.I.Kostenko. *Teoretichni osnovi yelektrotekhniki: liniyni yelektrichni kola*. [Theoretical bases of electrical engineering: linear electrical circuit], Donetsk: The new world, 2003. 513 p.

Надійшла до редакції 19.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

М.М.ФЕДОРОВ¹, І.П.КУТКОВИЙ²

¹ Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

² Державний вищий навчальний заклад «Донбаська державна машинобудівна академія»

Еквівалентні схеми заміщення несиметричних трифазних систем. Розроблені методи визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення несиметричних трифазних систем. Запропоновано алгоритм визначення параметрів ЕРС еквівалентної схеми заміщення та спосіб визначення внутрішніх опорів кожної з фаз з урахуванням активної та реактивної складової.

Ключові слова: трифазні системи, схема заміщення, метод симетричних складових, комплексний вхідний опір, холостий хід, коротке замикання.

M.M.FEDOROV¹, I.P.KUTKOVY²

¹ State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

² State Institution of Higher Education “Donbass State Engineering Academy”

Equivalent Circuits of Asymmetric Substitution of Three-Phase Systems. Exploitation of the three-phase systems is accompanied by the different asymmetrical modes. Similar unsymmetries can be caused by the disrepairs of separate sources three-phase E.M.F. or sharply asymmetrical loading, including different malfunctions of separate consumers. Similar unsymmetry has influence on the modes of operations of different consumers. For the estimation of electromechanics descriptions and mode of operations of separate consumers it is very convenient to have an equivalent chart of substituting for the three-phase system, Equivalent circuit of three-phase substitution systems can be represented by a star and a detector contains six elements: three asymmetrical sinusoidal E.M.F. source and three integrated resistance. When defining complex resistances individual phases, input resistance, complexes are used to determine which you need to perform the following tests: 1) experience of idling on the appropriate clamps; 2) experience a short circuit; 3) experience with famous capacitive impedance. Next, on the known formulae are complex impedances separate phases. Complexes phase E.M.F. equivalent chart of substitution in general case is the asymmetrical three-phase system the parameters of which are determined by means of method of symmetric constituents. For the three-wire system, the constituents of a zero sequence are absent, therefore we will have three sources straight-in and by a reverse sequence. Complexes of the E.M.F. are determined using a complex linear voltage. These complexes are formed according to the results of stress analysis of linear experiences idling and their vector diagrams.

Key words: three-phase system, replacement scheme, method of symmetrical components, complex impedance, idling, short circuit.