



УДК 631.371

## МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В НЕСИММЕТРИЧНО НАГРУЖЕННОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ

Лежнюк П.Д., д.т.н.,

*Винницкий национальный технический университет*

Мирошник А.А., к.т.н.

*Харьковский национальный технический университет*

*сельского хозяйства им. П. Василенка*

Тел.: (057) 712-35-37

**Аннотация** – предложена методика для вычисления потерь мощности в несимметрично нагруженной распределительной сети 0,38/0,22 кВ.

**Ключевые слова** – распределительная сеть, несимметричная нагрузка, потери, активная мощность.

*Постановка проблемы.* В современных условиях развития электрификации сельского хозяйства, характеризующейся увеличением мощностей нагрузок сельскохозяйственных предприятий, развитием электротехнологии и автоматизации технологических процессов, а также повышением степени использования электрического оборудования, следует уделять особое внимание наиболее эффективному использованию электрической энергии. Характерные черты, свойственные режимам работы сельских сетей 0,38 кВ могут быть установлены только на основании изучения массовых процессов, связанных с потреблением электроэнергии, путем специально организуемых наблюдений и исследований.

Потребление электрической энергии отдельными однофазными приемниками в общем случае зависит от факторов двух родов, одни из которых носят регулярный и устойчивый характер, а характер других отражает нерегулярные случайные колебания нагрузки.

Это обстоятельство является причиной того, что токи на участках фидеров под влиянием целого ряда случайных факторов в любой рассматриваемый момент времени могут отклоняться от своего среднего значения, то есть по сути являются случайными величинами. Следовательно, временные изменения нагрузки сельскохозяйственных фидеров и потребительских подстанций можно рассматривать как

случайную функцию, математическое ожидание которой характеризуется средним графиком изменения нагрузки во времени.

*Анализ последних достижений.* Для определения потерь активной мощности (и энергии) в четырехпроводных (и трехпроводных) неравномерно нагруженных линиях предложен ряд методов, основанных, главным образом, на необходимости знания величин линейных токов и тока в нулевом проводе [1]. Методы основаны, в общем, на определении степени несимметрии или коэффициентов неравномерности токов и зависящей от них кратности увеличения потерь (по отношению к потерям в симметричном режиме). При прочих равных условиях практически наиболее приемлемым следует считать поэлементный метод расчета [2].

*Формулировка целей статьи.* Необходимо разработать методику для определения потерь мощности в несимметрично нагруженной распределительной сети 0,38/0,22 кВ.

*Основная часть.* С точки зрения эксплуатации сетей 0,38 кВ, особенно сельских, нужно учесть следующее: неравномерно нагруженные линии с одной сосредоточенной на конце нагрузкой встречаются на практике крайне редко, нагрузка, как правило, распределена вдоль линии; измерение токов в проводах на многочисленных участках линий с распределенной нагрузкой затруднительно, а иногда невозможно.

Поэтому, основными недостатками методов следует считать:

- необходимость знания токов в трех линейных проводах и нулевом проводе на всех многочисленных участках сети;
- возможность определения потерь (или кратности их увеличения) только на каждом отдельном участке с последующим их суммированием, для чего необходимо, кроме всего прочего, измерение токов производить одновременно на всех участках и т.п.

Учитывая все сказанное, приходим к заключению, что с точки зрения эксплуатации сети метод определения потерь мощности в неравномерно нагруженной линии с распределенной нагрузкой должен удовлетворять следующим требованиям:

- давать возможность вычисления потерь сразу по всей линии с любым числом неравномерно нагруженных участков;
- не требовать для вычислений знания токов в линейных и нулевом проводах ни на одном участке линии;
- позволять производить вычисления по таким доступным в эксплуатации показателям режима, как уровни напряжения в начале и конце линии и по средним электрическим параметрам электропередачи.

Ниже приводится методика вычисления потерь мощности для общего случая несимметрично нагруженной четырехпроводной сети.

Матрица падений напряжений на любом элементе трехфазной сети в несимметричном режиме равна [3]:

$$\Delta \dot{U}_{S_3} = \dot{I}_S Z_{S_3}, \quad (1)$$

где

$$Z_{S_3} = \begin{Bmatrix} Z_{0_3} & Z_{2_3} & Z_{1_3} \\ Z_{1_3} & Z_{0_3} & Z_{2_3} \\ Z_{2_3} & Z_{1_3} & Z_{0_3} \end{Bmatrix},$$

$$Z_{0_3} = \frac{1}{3}(Z_A + Z_B + Z_C) = Z_{0_3} e^{j\varphi_0};$$

$$Z_{1_3} = \frac{1}{3}(Z_A + aZ_B + a^2Z_C) = Z_{0_3} e^{j\varphi_1};$$

$$Z_{2_3} = \frac{1}{3}(Z_A + a^2Z_B + aZ_C) = Z_{0_3} e^{j\varphi_2};$$

где  $Z_A, Z_B, Z_C$  – сопротивления фаз элемента сети.

Из уравнения (1) может быть получена матрица сопротивлений элемента сети в схемах симметричных составляющих:

$$\Delta Z_S = \begin{Bmatrix} \Delta Z_1 \\ \Delta Z_2 \\ \Delta Z_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Z_{0_3} & Z_{2_3} & Z_{1_3} \\ Z_{1_3} & Z_{0_3} & Z_{2_3} \\ Z_{2_3} & Z_{1_3} & Z_{0_3} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 & \dot{\alpha}_i & \dot{\beta}_i \\ 1 & \dot{\alpha}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i \\ 1 & \dot{\beta}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i^{-1} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\dot{\alpha}_i = \frac{I_2}{I_1} e^{j(\nu_2 - \nu_1)}$ ;  $\dot{\beta}_i = \frac{I_0}{I_1} e^{j(\nu_0 - \nu_1)}$ ;  $\dot{\gamma}_i = \frac{I_0}{I_2} e^{j(\nu_0 - \nu_2)}$ .

Из (2) вытекает, что

$$Z_S = Z_{0_3} + \Delta Z_S, \quad (3)$$

то есть сопротивление элемента сети току соответствующей последовательности равно его сопротивлению  $Z_{0_3}$  плюс добавочное сопротивление, обусловленное протеканием по данному элементу токов всех трех последовательностей, т.е. всегда  $Z_S > Z_{0_3}$ , где

$$Z_S = \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Z_{2_3} & Z_{1_3} \\ Z_{1_3} & Z_{2_3} \\ Z_{2_3} & Z_{1_3} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\alpha}_i & \dot{\beta}_i \\ \dot{\alpha}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i \\ \dot{\beta}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i^{-1} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

В линиях 038/0,22 кВ при неучете реактивного сопротивления могут иметь место следующие два частных случая:

1.  $\dot{\alpha}_i \neq 0$ ;  $\dot{\beta}_i \neq 0$ ;  $\dot{\gamma}_i = 0$ ;  
 $Z_A = Z_B = Z_C \neq 0$ ;  
 $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 = \Delta Z_0 = 0$ ;

2.  $\dot{\alpha}_i \neq 0; \dot{\beta}_i \neq 0; \dot{\gamma}_i \neq 0;$   
 $Z_A \neq Z_B \neq Z_C \neq 0;$   
 $\Delta Z_1 \neq 0; \Delta Z_2 \neq 0; \Delta Z_0 \neq 0.$

В трансформаторах в случае, когда углы между векторами токов в фазах равны  $\frac{2}{3}\pi$ :

$$\alpha_i = \beta_i = \frac{1}{3}; \gamma_i = 1,$$

$$\Delta Z_1 = \frac{1}{3} \left[ Z_{2\varnothing} e^{j(\nu_2 - \nu_1)} + Z_{1\varnothing} e^{j(\nu_0 - \nu_1)} \right],$$

$$\Delta Z_2 = \frac{1}{3} \left[ Z_{1\varnothing} e^{j(\nu_1 - \nu_2)} + Z_{2\varnothing} e^{j(\nu_0 - \nu_2)} \right], \quad (5)$$

$$\Delta Z_0 = \frac{1}{3} \left[ Z_{2\varnothing} e^{j(\nu_1 - \nu_0)} + Z_{1\varnothing} e^{j(\nu_2 - \nu_0)} \right].$$

Потери активной мощности в рассматриваемом режиме в элементе сети могут быть вычислены по выражению

$$\Delta P_{нес} = 3(I_1^2 \operatorname{Re} Z_1 + I_2^2 \operatorname{Re} Z_2 + I_0^2 \operatorname{Re} Z_0) + 9I_0^2 \operatorname{Re} Z_{нн}, \quad (6)$$

где  $Z_{нн}$  - кажущееся сопротивление нулевого провода.

Обращаясь к (2), найдем матрицу действительных частей кажущихся сопротивлений элемента сети:

$$\operatorname{Re} \mathbf{Z}_s = \begin{Bmatrix} \operatorname{Re} Z_1 \\ \operatorname{Re} Z_2 \\ \operatorname{Re} Z_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Z_{0\varnothing} & \alpha_i Z_{2\varnothing} & \beta_i Z_{1\varnothing} \\ Z_{1\varnothing} & \alpha_i^{-1} Z_{0\varnothing} & \gamma_i Z_{2\varnothing} \\ Z_{2\varnothing} & \beta_i^{-1} Z_{1\varnothing} & \gamma_i^{-1} Z_{0\varnothing} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 & g & d \\ 1 & b & e \\ 1 & c & f \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

где

$$g = \frac{\cos(\nu_2 - \nu_1 - \varphi_0)}{\cos \varphi_0}, \quad b = \frac{\cos(\nu_1 - \nu_2 + \varphi_0)}{\cos \varphi_0},$$

$$c = \frac{\cos(\nu_1 - \nu_0 + \varphi_2)}{\cos \varphi_0}, \quad d = \frac{\cos(\nu_0 - \nu_1 + \varphi_1)}{\cos \varphi_0},$$

$$e = \frac{\cos(\nu_0 - \nu_2 + \varphi_2)}{\cos \varphi_0}, \quad f = \frac{\cos(\nu_2 - \nu_0 + \varphi_1)}{\cos \varphi_0}.$$

Легко убедиться, что

$$K_y = \frac{\Delta P_{нес}}{\Delta P_{сум}} = \frac{(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2) \operatorname{Re} Z_{0\varnothing} + (I_1^2 \operatorname{Re} \Delta Z_1 + I_2^2 \operatorname{Re} \Delta Z_2 + I_0^2 \operatorname{Re} \Delta Z_0) + 3I_0^2 \operatorname{Re} Z_{нн}}{I_{ср.ар}^2 \operatorname{Re} Z_{0\varnothing}} > 1, \quad (8)$$

где  $K_y$  - кратность увеличения потерь.

**Выводы.** Потери активной мощности в любом элементе сети при неравномерной нагрузке фаз превышают потери в этом же элементе в

симметричном режиме. Кратность увеличения потерь в реальных сетях 0,38 кВ может намного превышать единицу.

*Литература*

1. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: ГОСТ 13109-97. – [Действует с 1999-01-01]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 35 с.
2. Железко Ю. С. Расчет технологических потерь электроэнергии в электрических сетях / Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. // Энергетик. – 2003. – №2. – С. 29–33.
3. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей/ Н. А. Мельников – М.: Энергия, 1972. – 231 с.

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ У  
НЕСИМЕТРИЧНО НАВАНТАЖЕНІЙ  
ЧОТИРЬОХПРОВІДНІЙ МЕРЕЖІ**

*Лежнюк П.Д., Мирошник О.О.*

**Анотація** - запропонована методика для обчислення втрат потужності у несиметрично навантажених розподільчій мережі 0,38/0,22 кВ.

**TECHNIQUE OF CALCULATION OF LOSSES OF CAPACITY  
FOR A GENERAL CASE OF THE ASYMMETRICALLY LOADED  
NETWORK C BY FOUR WIRES**

*P. Legnjuk, A. Miroshnyk*

**Summary**

**Is offered a technique for calculation of losses of capacity in the asymmetrically loaded distributive network 0,38/0,22 kV.**