

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НЕСИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ

М. Л. Сапунков, А. А. Худяков

Пермский государственный технический университет

Рассматривается вопрос оценки несимметрии трехфазных систем. Приведена методика оценки несимметричного состояния трехфазной сети с изолированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю.

Несимметрию трехфазных систем принято оценивать двумя показателями [1]:

1) коэффициентом несимметрии по напряжению обратной последовательности (K_{2U});

2) коэффициентом несимметрии по напряжению нулевой последовательности (K_{0U}).

В ряде случаев такая оценка трехфазной системы оказывается недостаточно показательной. Например, применительно к электрическим сетям напряжением 6–35 кВ, работающих с изолированной или компенсированной нейтралью, по значению показателя K_{2U} можно судить о степени симметрии, прежде всего, линейных напряжений. Если $K_{2U} = 0$, то эти напряжения абсолютно симметричны. По показателю K_{0U} судят о степени смещения нейтрали и причине изменений фазных напряжений. Например, если $K_{0U} = 100\%$, то это свидетельствует о возникновении режима однофазного замыкания на землю (режим ОЗЗ). Однако при этом отсутствует важная информация о величине тока замыкания на землю, о месте возникновения ОЗЗ, т.е. неизвестно, какая линия в сети оказалась поврежденной.

В данной публикации рассматривается методика оценки несимметричного состояния трехфазной сети с изолированной нейтралью в режиме ОЗЗ. Эта методика основывается на известном из теории трехфазных цепей положении о характере изменения мгновенной мощности трехфазной системы [2].

Мгновенная мощность трех фаз линии определяется как

$$p(t) = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c, \quad (1)$$

где $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ – мгновенные значения соответственно фазных напряжений и токов трех фаз.

В общем случае мгновенную мощность по (1) можно представить в виде двух составляющих:

$$p(t) = P_{CP} + p_{ПЕРЕМ}(t), \quad (2)$$

где $P_{CP} = \frac{1}{t} \int_0^t p(t) dt$ – постоянная составляющая мгновенной мощности;

$p_{ПЕРЕМ}(t)$ – переменная составляющая, которая изменяется во времени с удвоенной частотой сети.

Переменная составляющая суммарной мгновенной мощности трех фаз зависит от симметрии фазных напряжений и симметрии токов. Только при их абсолютной симметрии переменная составляющая мгновенной мощности трех фаз будет равна нулю. Следовательно, все другие ее значения могут быть обобщенным показателем несимметрии трехфазной системы.

На рис. 1 приведена упрощенная принципиальная схема трехфазной сети с изолированной нейтралью. Сеть содержит несколько отходящих от секции шин линий. На одной из них (нижняя на рис. 1) произошло замыкание на землю фазы А.

Анализ процессов в сети в режиме ОЗЗ проводится при следующих допущениях:

- линейные напряжения источника питания симметричны;
- учитываются только емкостные проводимости фаз на землю, величина этих проводимостей по фазам одинакова;
- продольные сопротивления фаз линий не учитываются;
- величина переходного сопротивления в месте замыкания на землю равна нулю.

Возникновение в сети ОЗЗ, как известно, не изменяет режим работы нагрузок линий, т.к. при этом линейные напряжения остаются неизменными.

Однако замыкание фазы на землю на любой линии в сети нарушает симметрию всех линий относительно земли. При коротком замыкании проводимость этой фазы на землю станет бесконечно большой величиной. Напряжение этой фазы уменьшится до нуля, а напряжения двух других фаз относительно земли увеличатся до линейных значений. Это вызовет изменение мгновенной мощности линий на величину приращения переменной составляющей мощности:

$$\Delta p_{\text{ПЕРЕМ}} = p_{\text{ПЕРЕМ}}(t)|_{t>0} - p_{\text{ПЕРЕМ}}(t)|_{t\leq 0}. \quad (3)$$

При этом наибольший эффект будет иметь место на поврежденной линии, где в замкнувшейся на землю фазе протекает общий (суммарный) ток замыкания на землю.

На схеме (см. рис. 1) показано распределение токов в сети при замыкании на землю фазы А. На рис. 2 приведены векторные диаграммы, характеризующие величины и фазовые соотношения напряжений и токов при замыкании фазы А для неповрежденных (а) и поврежденной (б) линий.

Очевидно, что напряжение поврежденной фазы относительно земли в этом случае равно нулю, т.е. $U_{a3} = 0$,

напряжения двух других неповрежденных фаз станут равны по модулю соответствующим линейным значениям, т.е. $U_{b3} = -U_{ab}, U_{c3} = U_{ca}$. В то же время необходимо учесть, что в режиме ОЗЗ напряжения всех фаз относительно нейтрали трехфазной системы останутся равными фазным значениям, т.е. не изменятся. Именно поэтому при анализе изменений составляющих мгновенной мощности линий, обусловленных замыканием фазы на землю по выражениям (1)–(3), необходимо использовать значения фазных напряжений относительно нейтрали системы, а не относительно земли.

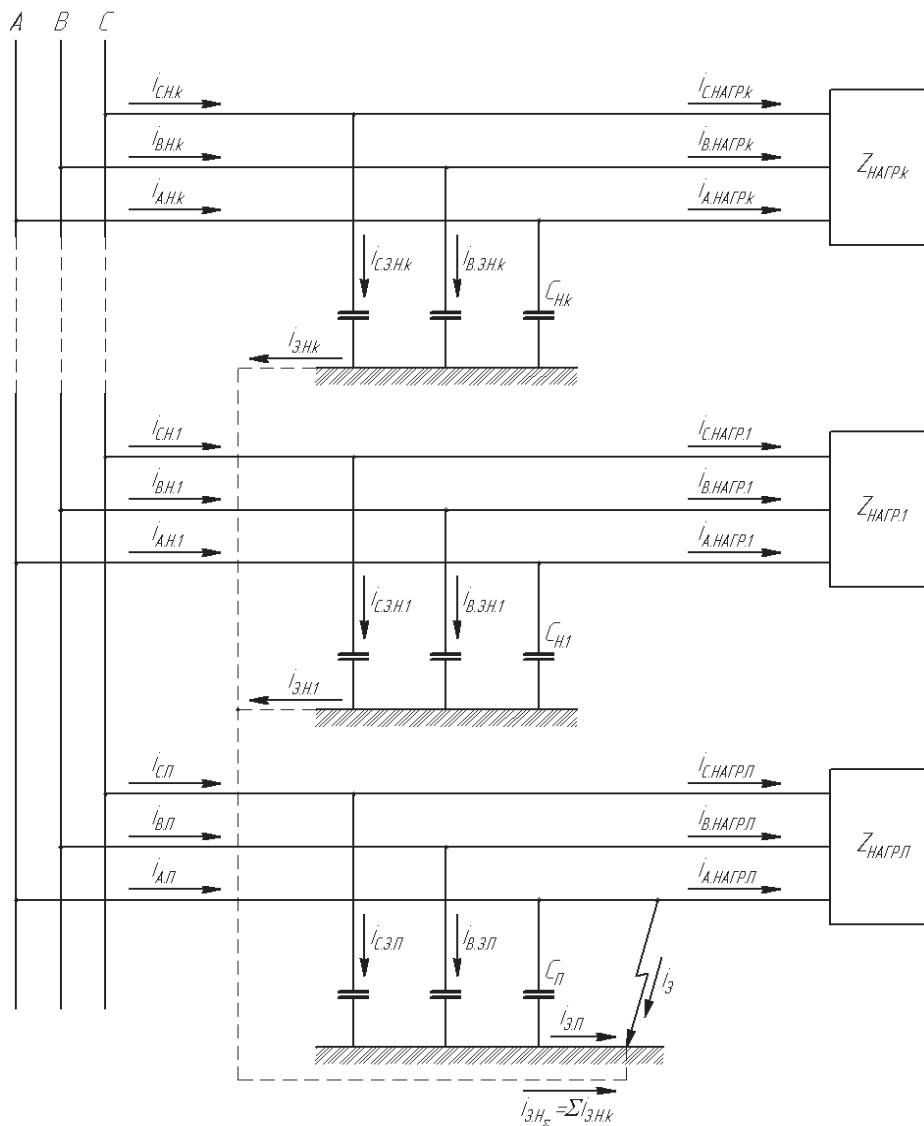


Рис. 1. Схема электрической сети с распределением токов при замыкании на землю фазы А

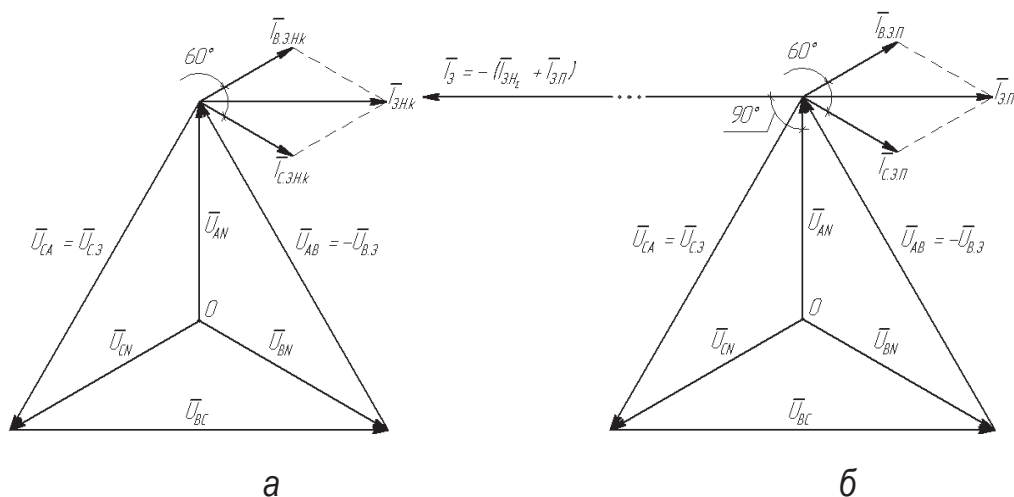


Рис. 2. Векторные диаграммы: а – неповрежденные линии; б – поврежденная линия

На основании изложенного выше для схемы (см. рис. 1), приняв за начало отсчета положение вектора фазного напряжения фазы А, можно записать:

$$\begin{aligned}
 u_a &= U_{\Phi m} \sin(\omega t), \\
 u_b &= U_{\Phi m} \sin(\omega t - 120^\circ), \\
 u_c &= U_{\Phi m} \sin(\omega t + 120^\circ),
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где $U_{\Phi m}$ – амплитуда фазного напряжения сети.

Значения составляющих токов в фазах линий, обусловленных емкостными проводимостями на землю, будут соответствовать рис. 2:

- на неповрежденных линиях

$$\begin{aligned}
 i_{a3Hk} &= 0, \\
 i_{b3Hk} &= U_{Лm} \omega C_{Hk} \sin(\omega t - 60^\circ), \\
 i_{c3Hk} &= U_{Лm} \omega C_{Hk} \sin(\omega t - 120^\circ);
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

-на поврежденной линии

$$\begin{aligned}
 i_{a3\Pi} &= i_3 = -(i_{3H\Sigma} + i_{3\Pi}) = \sqrt{3} U_{Лm} \omega C_{\Sigma} \sin(\omega t + 90^\circ), \\
 i_{b3\Pi} &= U_{Лm} \omega C_{\Pi} \sin(\omega t - 60^\circ), \\
 i_{c3\Pi} &= U_{Лm} \omega C_{\Pi} \sin(\omega t - 120^\circ);
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где $U_{Лm}$ – амплитуда линейного напряжения сети;

C_{Hk} – емкость фазы относительно земли k -й неповрежденной линии;

$C_{П}$ – емкость фазы относительно земли поврежденной линии;

$C_{\Sigma} = C_{П} + \Sigma C_{Hk}$ – суммарная емкость фазы относительно земли всех линий;

$\sqrt{3}U_{Лm} \omega C_{\Sigma} = I_{zm}$ – амплитуда общего тока замыкания на землю.

Если подставить значения напряжений и токов по выражениям (4)–(6) в (1), то с учетом (3) в результате преобразований получим:

- для неповрежденных линий

$$\Delta p_{\text{ПЕРЕМ.}H.k} = -\sqrt{3}U_{\Phi}^2 \omega C_{Hk} [\cos(2\omega t - 180^0) + \cos(2\omega t)] = 0; \quad (7)$$

- для поврежденной линии

$$\Delta p_{\text{ПЕРЕМ.}П} = 3U_{\Phi}^2 \omega (C_{H\Sigma} + C_{П}) \sin(2\omega t) = 3U_{\Phi}^2 \omega C_{\Sigma} \sin(2\omega t). \quad (8)$$

Из (7) следует, что при возникновении в сети ОЗЗ приращение мгновенной мощности на неповрежденной линии представляет собой сумму двух косинусоид двойной частоты с одинаковой амплитудой, пропорциональной емкости соответствующей линии, находящихся в противофазе. Следовательно, значения приращений переменной составляющей мощности на всех неповрежденных линиях при возникновении в сети ОЗЗ будут равны нулю.

Из (8) следует, что приращение мгновенной мощности на поврежденной линии, обусловленное возникновением ОЗЗ, тоже представляет собой переменную мощность, изменяющуюся с двойной частотой. Амплитуда этой мощности пропорциональна суммарной емкости фазы всех линий сети, т.е. величина амплитуды зависит от общего (суммарного) тока замыкания на землю.

Таким образом, при наличии информации о переменной составляющей мгновенной мощности трех фаз каждой линии путем анализа результатов можно сделать оценку состояния сложной электрической сети в несимметричном режиме работы и выявить именно поврежденную линию. Кроме того, можно определить величину тока однофазного замыкания на землю, а также общую емкость сети относительно земли.

Использование переменной составляющей мгновенной мощности дополнительно к основным показателям несимметрии K_{2U} и K_{0U} позволит сделать более полную обобщенную оценку несимметрии трехфазных систем.

Список литературы

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники / 2 авт. – М.: Госэнергоиздат, 1959.

Получено 07.12.06.