

## Лекция №4 Анализ параметров режима при устойчивом замыкании на землю

Цель: Показать связь параметров системы и параметров режима при устойчивом замыкании на землю.

Список литературы обязательной:

33) Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.: ил.

Список литературы дополнительной:

32) Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестаков В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006.-118с.

План лекции:

1. Простейшая схема замещения сети с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю.
2. Виды замыкания на землю в незаземленных сетях.
3. Связь параметров системы и режима при однофазном замыкании на землю на основе первого закона Кирхгофа.
4. Векторная диаграмма фазных напряжений при однофазном замыкании на землю.

В сетях с изолированной нейтралью провода трехфазной системы связаны с землей через емкости и активные сопротивления изоляции, распределенные по длине линий. На рис.1.1 приведена схема замещения незаземленной сети без нагрузки согласно [32]. Схема замещения включает источник питания, эквивалентную линию, емкости фаз ( $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ) и активные проводимости ( $G_A$ ,  $G_B$ ,  $G_C$ ), которые приняты сосредоточенными, что вполне допустимо в области частот, которую занимают, рассматриваемые далее процессы. Внутреннее сопротивление источника

питания и продольные сопротивления линий сети намного меньше, чем сопротивления фаз относительно земли, поэтому при устойчивых замыканиях ими также можно пренебречь.

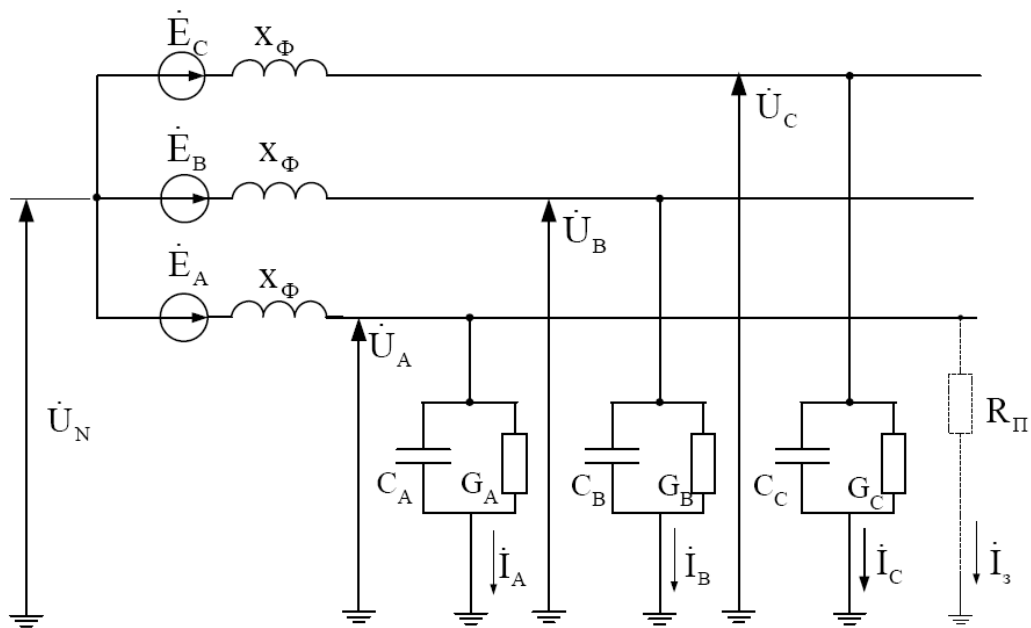


Рис.1.1.Схема замещения сети с изолированной нейтралью

При принятых допущениях можно записать следующее:

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_A, \quad \dot{I}_B = (\dot{E}_B + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_B, \quad \dot{I}_C = (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_C,$$

где  $\dot{U}_N$  – напряжение на нейтрали относительно земли,  $\dot{E}_A = \dot{E}_\phi$ ,  $\dot{E}_B = a^2 \cdot \dot{E}_\phi$ ,

$\dot{E}_C = a \cdot \dot{E}_\phi$  – ЭДС источника питания;  $\dot{Y}_A = G_A + j\omega C_A$ ,  $Y_B = G_B + j\omega C_B$ ,

$\dot{Y}_C = G_C + j\omega C_C$ ;  $\omega$  – круговая частота промышленного тока.

При отсутствии замыкания на землю сумма токов  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  равна нулю, то есть выполняется равенство:

$$(\dot{E}_A + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_A + (\dot{E}_B + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_C = 0,$$

Решив это уравнение относительно  $\dot{U}_N$  получим:

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_\phi \cdot \left( \frac{G_A + a^2 \cdot G_B + a \cdot G_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C} + jw \cdot \frac{C_A + a^2 \cdot C_B + a \cdot C_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C} \right)$$

Для разработки алгоритмов ОМП при процессах, связанных с ОЗЗ, необходимо хорошо понимать их закономерности. Данные закономерности можно пытаться получить либо расчетным путем, либо путем приведения экспериментальных наблюдений. Рассмотрим аналитические модели в которых исследуются поведение тока и напряжения при ОЗЗ.

В незаземленных сетях замыкания на землю могут быть устойчивыми или дуговыми. Устойчивые замыкания в свою очередь разделяют на металлические замыкания и замыкания через переходное сопротивление, которое обозначим  $R_{\Pi}$ . Этим сопротивлением может быть сопротивление тлеющей изоляции, сопротивление растеканию тока в земле.

Рассмотрим режим устойчивого замыкания фазы А. Для этого режима справедливо соотношение

$$(\dot{E}_A + \dot{U}_N) \cdot G_{\Pi} + (\dot{E}_B + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_C = 0 \quad (1.1)$$

где  $G_{\Pi} = \frac{1}{R}$  – проводимость в месте замыкания.

Решив (1.1) относительно  $\dot{U}_N$ , получим

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_\phi \cdot \left( \frac{G_{\Pi}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + G_{\Pi}} + \frac{\dot{Y}_A + a^2 \cdot \dot{Y}_B + a \cdot \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + G_{\Pi}} \right)$$

При определении напряжения на нейтрали в режиме однофазного замыкания можно пренебречь возможной несимметрией фаз сети, то есть считать  $\dot{Y}_A = \dot{Y}_B = \dot{Y}_C = \dot{Y}_\phi$ . При этом

$$\frac{\dot{Y}_A + a^2 \cdot \dot{Y}_B + a \cdot \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + G_{\Pi}} = 0$$

Следовательно,

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_\Phi \cdot \frac{G_\Pi}{3 \cdot \dot{Y}_\Phi + G_\Pi} \quad (1.2)$$

Преобразуем (1.2) к виду

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_\Phi \cdot \frac{1}{1 + R_\Pi(3G_\Phi + 3j\omega C_\Phi)}, \quad (1.3)$$

где  $G_\Phi = G_A = G_B = G_C$ ,  $C_\Phi = C_A = C_B = C_C$ .

Из (1.3) следует, что напряжение на нейтрали увеличивается по мере уменьшения сопротивления в месте повреждения. При  $R_\Pi = 0$  напряжение на нейтрали имеет максимальное значение, равное фазной ЭДС. Напряжения фаз относительно земли при однофазном замыкании могут быть определены следующим образом:

– напряжение фазы А

$$\dot{U}_A = \dot{U}_N + \dot{E}_A = -\dot{E}_\Phi \cdot \frac{3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}{1 + R_\Pi(3G_\Phi + 3j\omega C_\Phi)}, \quad (1.4)$$

– напряжения неповрежденных фаз В и С

$$\dot{U}_B = \dot{U}_N + \dot{E}_B = -\dot{E}_\Phi \cdot \frac{1 - a^2(1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi)}{1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}, \quad (1.5)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_N + \dot{E}_C = -\dot{E}_\Phi \cdot \frac{1 - a(1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi)}{1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}. \quad (1.6)$$

Векторная диаграмма напряжений при замыкании фазы А на землю представлена на рис.1.2. Как видно из диаграммы и из соотношений (1.4) – (1.6), при  $R_\Pi = 0$  (векторы проведены сплошными линиями) напряжение нейтрали по абсолютному значению равно фазной ЭДС, а напряжения неповрежденных фаз относительно земли равны междуфазному напряжению.

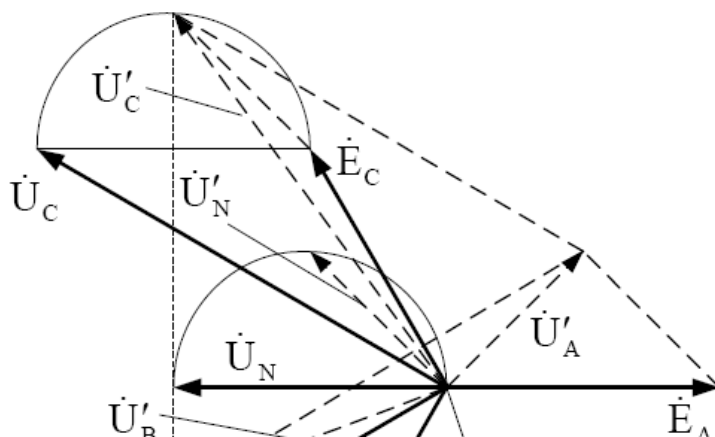


Рис.1.2. Векторная диаграмма напряжений при замыкании фазы А на землю

По мере увеличения сопротивления в месте замыкания напряжение нейтрали уменьшается. При этом конец вектора перемещается по полуокружности. Векторы напряжений неповрежденных фаз, равные сумме векторов соответствующих фаз ЭДС и напряжения нейтрали, так же скользят по полуокружностям. На диаграмме пунктиром показано положение векторов для случая, когда сопротивление в месте замыкания равно суммарному емкостному сопротивлению сети относительно земли  $R_{II} = \frac{1}{3\omega C_{\phi}}$ . Треугольник междуфазных напряжений остается неизменным, то есть замыкание фазы на землю не влияет на работу присоединенных приемников энергии.

Далее определим ток в месте замыкания. Согласно схеме на рис.1.1

$$\begin{aligned} \dot{I}_3 &= -\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C = -(\dot{E}_A + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_{\phi} - (\dot{E}_B + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_{\phi} - (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_{\phi} \\ \dot{I}_3 &= -(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C + 3\dot{U}_N) \cdot \dot{Y}_{\phi} \end{aligned} \quad (1.7)$$

В (1.7) подставим  $\dot{U}_N$  по (1.3) и учтем, что  $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ . В результате получим

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_{\phi}}{R_{II} + \frac{1}{3G_{\phi} + 3j\omega C_{\phi}}} \quad (1.8)$$

Формуле (1.8) соответствует схема, приведенная на рис.1.3. На рис.1.4 показано, как изменяется модуль относительного значения тока замыкания

$I_{3*} = \left| \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_{3R_{\Pi}=0}} \right|$  в зависимости от  $R_{\Pi}$ . Здесь ток  $\dot{I}_{3R_{\Pi}=0}$  - ток замыкания при  $R_{\Pi}=0$ .

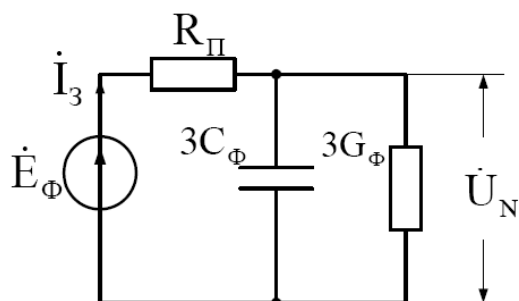


Рис.1.3. Схема замещения сети с замкнутой на землю фазой.

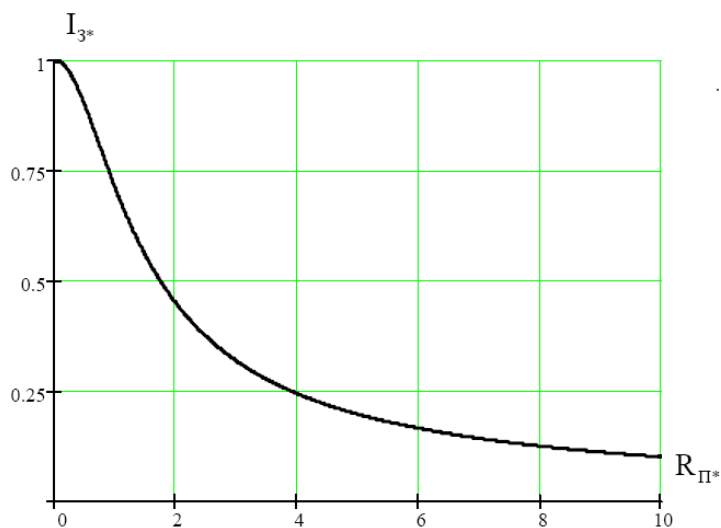


Рис.1.4. Ток замыкания