

Ф. П. Шкрабец, д-р техн. наук, Е. П. Месяц
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Однофазные замыкания на землю в распределительных сетях напряжением выше 1000 В относятся к повреждениям, сопровождающимся малыми токами замыкания. Значение тока однофазного замыкания на землю в таких сетях определяется, в основном, уровнем напряжения и параметрами изоляции (емкостью и активным сопротивлением) сети относительно земли. В свою очередь параметры изоляции сети относительно земли являются распределенными и зависят от ряда факторов, основными из которых являются исполнение электрической сети (воздушные или кабельные линии) и физические параметры линий (сечение токоведущих жил, длина, высота подвески и т.п.).

Наиболее распространенным и доступным методом исследования аварийных режимов в системах электроснабжения является метод математического моделирования, основанный на формализации изучаемых процессов и построения частных математических моделей. В общем случае математическую модель как совокупность математических выражений, связывающих параметры объекта с характеристиками изучаемого процесса, получают в результате формализации изучаемого процесса и построения его формализованной схемы с требуемой степенью приближения к действительности /2/.

Цель статьи - представить математические модели влияния параметров изоляции относительно земли распределительной сети и отдельных присоединений и характера заземления нейтрали на составляющие аварийных токов, а также методику определения их значений на основе прямого замера характеристик изоляции без снятия рабочего напряжения.

В симметричной трехфазной системе линейные (междуфазные) напряжения представляют равносторонний треугольник. При отсутствии нагрузки векторы фазных напряжений U_A , U_B , U_C при строгом равенстве проводимостей изоляции фаз сети относительно земли образуют симметричную трехлучевую звезду фазных напряжений, а нейтраль сети имеет потенциал, равный потенциалу земли. При нарушении равенства проводимостей изоляции фаз сети относительно земли точка нулевого потенциала системы сместится и нейтраль системы получит потенциал U_O относительно земли, а симметрия фазных напряжений относительно земли нарушится /1/.

На основании общепринятых допущений схема замещения распределительной сети для исследования аварийных токов будет иметь вид, представленный на рис. 1 /2/. Полученная схема учитывает в своей структуре лишь те элементы и связи, которые оказывают ощутимое влияние на исследуемые аварийные токи при замыканиях одной фазы на землю. На рисунке приняты следую-

щие обозначения: Y_H – проводимость нейтральной точки сети относительно земли; Y_A, Y_B, Y_C – проводимости соответственно фаз А, В и С относительно земли; y – проводимость переходного сопротивления в точке замыкания; U_0 – напряжение смещения нейтрали сети или напряжение нулевой последовательности; I_H – ток через проводимость нейтральной точки сети относительно земли; I_A, I_B, I_C – токи через проводимости относительно земли соответствующих фаз; I_3 – ток однофазного замыкания на землю.

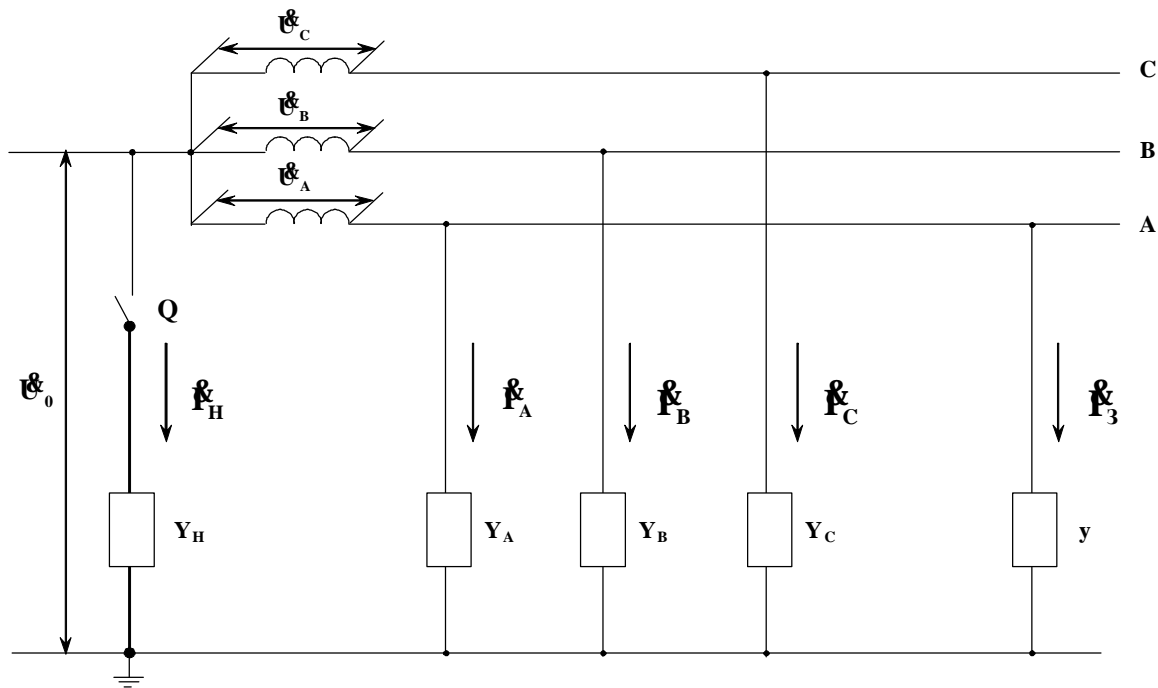


Рис. 1. Схема замещения распределительной сети

Сеть с полностью изолированной нейтралью

С учетом того, что

$$I_3 = U_A y; \quad I_A = U_A Y_A; \quad I_B = U_B Y_B; \quad I_C = U_C Y_C;$$

$$U_A = U_A + U_0; \quad U_B = U_B + U_0; \quad U_C = U_C + U_0$$

и принимая во внимание, что система является симметричной, для которой справедливо соотношение $Y_A = Y_B = Y_C = Y$, после соответствующих подстановок и преобразований получим в общем виде выражение для тока однофазного замыкания на землю в сети с полностью изолированной нейтралью:

$$I_3 = -3U_0 Y = 3U_\phi Y \frac{y}{3Y + y}, \quad (1)$$

где $Y = \frac{1}{R} + j\omega C$ и $y = \frac{1}{r}$, U_A, U_B, U_C – напряжения фаз сети относительно земли; R и C – соответственно активное сопротивление изоляции и емкость всей электрически связанной сети относительно земли; r – переходное сопротивление в точке замыкания фазы на землю.

Действующее значение тока однофазного замыкания на землю, учитывающее все составляющие изоляции относительно земли сети с полностью изолированной нейтралью:

$$I_3 = 3U_\phi \frac{\sqrt{(R+3r+3\omega^2 C^2 R^2 r)^2 + j(\omega C R^2)^2}}{(R+3r)^2 + (3\omega C R r)^2}. \quad (2)$$

В реальных сетях напряжением 6 кВ системы электроснабжения шахт активная составляющая сопротивления изоляции относительно земли более чем на порядок превышает емкостную составляющую и естественно оказывает незначительное влияние на значение тока замыкания на землю, что позволяет без учета названного сопротивления получить упрощенную формулу для тока замыкания:

$$I_3 = 3U_\phi \frac{\omega C}{\sqrt{1+(3\omega C r)^2}}. \quad (3)$$

Сеть с компенсированной нейтралью

Приняв на схеме замещения, представленной на рис.1, проводимость нейтральной точки сети относительно земли равной проводимости компенсирующего устройства ($Y_n = Y_k$), и считая выключатель Q , находящимся во включенном положении, проведя необходимые преобразования, получим в общем виде выражение для тока однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью:

$$I_3 = -U_\phi (3Y + Y_k) = U_\phi y \frac{3Y + Y_k}{3Y + Y_k + y}, \quad (4)$$

где $Y_k = 1/R_k - j1/(\omega L_k)$ - проводимость компенсирующего устройства.

Для случая полной компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю, т.е. резонансной настройки дугогасящего реактора с емкостью сети относительно земли $I_C = I_L$, ток однофазного замыкания на землю в установившемся режиме будет

$$I_3 = 3U_\phi \frac{3r+R}{3R_k r + Rr + RR_k}. \quad (5)$$

Из выражения (1 - 5) видно, что в резонансном режиме настройки дугогасящего реактора ток однофазного замыкания на землю в установившемся режиме является чисто активным и определяется практически только активными сопротивлениями изоляции сети относительно земли и компенсирующего устройства. Если пренебречь активными потерями в сердечнике компенсирующего устройства ($R_K = \infty$), то

$$I_3 = 3U_\phi \frac{1}{R+3r}; \quad \text{и при } r = 0 \quad I_{3м} = 3U_\phi \frac{1}{R}.$$

Общее выражения для тока однофазного замыкания на землю электрической сети с компенсированной нейтралью (5) можно записать по другому:

$$I_3 = U_\phi \frac{3Yy}{3Y+Y_K+y} + U_\phi \frac{Y_K y}{3Y+Y_K+y} = I_{3C} + I_{3K} \quad (6)$$

Из последнего выражения видно, что ток однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью в общем случае при прочих равных условиях состоит из двух составляющих:

- 1) I_{3C} – ток обусловленный проводимостью изоляции относительно земли всей электрически связанной сети;
- 2) I_{3K} – ток обусловленный проводимостью компенсирующего устройства.

Сеть с резистором в нейтрали.

Приняв на схеме замещения проводимость нейтральной точки сети относительно земли равной проводимости резистора, включенного в нейтраль ($Y_H = Y_R$), после преобразований в общем виде получим выражение для тока однофазного замыкания на землю для сети с резистором в нейтрали:

$$I_3 = -U_\phi (3Y + Y_R) = U_\phi y \frac{3Y + Y_R}{3Y + Y_R + y} \quad (7)$$

или

$$I_3 = U_\phi y \frac{3Y}{3Y + Y_R + y} + U_\phi y \frac{Y_R}{3Y + Y_R + y} = I_{3C} + I_{3R} \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что ток однофазного замыкания на землю в сети с резистором в нейтрали в общем случае при прочих равных условиях состоит из двух составляющих:

- 1) I_{3C} – ток обусловленный проводимостью изоляции относительно земли всей электрически связанной сети;

2) I_{3K} – ток обусловленный проводимостью включенного в нейтраль резистора.

Действующее значение второй составляющей, или ток, протекающий через включенного в нейтраль резистора при однофазном замыкании на землю, выраженный через параметры сети и резистора будет равен

$$I_{3R} = U_{\phi} \frac{R}{\sqrt{(3R_a r + RR_a + Rr)^2 + (3wCRR_a r)^2}}. \quad (9)$$

Без учета активного сопротивления изоляции сети относительно земли, которое более чем на порядок превышает емкостное, получим упрощенное выражение для тока однофазного замыкания на землю в сети с резистором в нейтрали:

$$I_3 = U_{\phi} \frac{\sqrt{(9w^2 C^2 R_a r + R_a + r)^2 + (3wC R_a^2)^2}}{(R_a + r)^2 + (3wC R_a r)^2}. \quad (10)$$

Максимальное значение тока, или ток металлического ($r = 0$) однофазного замыкания на землю для тех же условий будет равен

$$I_{3M} = U_{\phi} \frac{\sqrt{1 + 9w^2 C^2 R_a^2}}{R_a}. \quad (11)$$

Для расчета значений аварийных токов по представленным выражениям для любой реальной распределительной сети необходимо иметь значения параметров изоляции сети и контролируемого присоединения, а также параметры режима нейтрали сети, которые в процессе эксплуатации могут существенно менять свои значения. В этом случае эффективным является метод периодического или непрерывного измерения названных параметров. Для указанной цели авторы предлагают использовать новый метод непрерывного контроля значений составляющих сопротивления изоляции сети относительно земли под рабочим напряжением, основанный на использовании наложенных на сеть оперативных токов промышленной частоты. Суть предложенного метода оперативного определения параметров изоляции относительно земли электрической сети и ее элементов состоит в том, что на электрическую сеть одновременно накладываются два оперативных синусоидальных сигнала, частоты которых не равны между собой и отличается от промышленной. На контролируемых участках (линии или присоединении), а также в месте подключения оперативного источника устанавливаются устройства, назначением которых является снятие параметров оперативных сигналов и их соответствующая обработка. Применение микроЭВМ или контроллеров позволяет предложенный метод использовать для оперативной оценки уровня активного и емкостного сопротивления изоля-

ции как всей сети в целом, так и каждого из присоединений распределительной сети, а также для оперативного измерения значения индуктивности дугогасящего реактора и резистора в нейтрали.

Если на электрическую сеть накладываются одновременно два оперативных сигнала с разными частотами, то тогда от каждого оперативного источника будем иметь токи:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{1 + w_1^2 C^2 R^2}}{R}, \quad I_2 = \frac{U_2 \sqrt{1 + w_2^2 C^2 R^2}}{R}, \quad (12)$$

где I_1 , U_1 , w_1 – ток, напряжение и частота первого оперативного источника; I_2 , U_2 , w_2 – ток, напряжение и частота второго оперативного источника.

Решив уравнения (12) относительно R и C , получим выражения для суммарной емкости и для активного сопротивления изоляции относительно земли трех фаз всей сети или соответствующего контролируемого участка (присоединения) относительно земли:

$$C = \frac{1}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_1^2 - U_1^2 I_2^2}{(w_1^2 - w_2^2)}}, \quad (13)$$

$$R = U_1 U_2 \sqrt{\frac{w_2^2 - w_1^2}{U_2^2 I_1^2 w_2^2 - U_1^2 I_2^2 w_1^2}}. \quad (14)$$

Проведя соответствующие преобразования для случая наложения оперативных токов на систему с неизолированной нейтралью, получим выражения для индуктивности и активного сопротивления дугогасящего реактора

$$L_k = \frac{U_1 U_2}{w_1 w_2} \sqrt{\frac{w_1^2 - w_2^2}{U_1^2 I_2^2 - U_2^2 I_1^2}}, \quad R_k = U_1 U_2 \sqrt{\frac{w_2^2 - w_1^2}{U_1^2 w_2^2 I_2^2 - U_2^2 w_1^2 I_1^2}}, \quad (15)$$

и значения сопротивления заземляющего резистора в нейтрали

$$R_a = U_1 / I_1 = U_2 / I_2. \quad (16)$$

Выводы

1. Разработаны математические модели, позволяющие оценить влияние параметров изоляции относительно земли всей сети и ее элементов, а также режима заземления нейтрали на составляющие аварийных токов при однофазных замыканиях на землю в распределительных сетях напряжением 6 – 10 кВ.

2. Предложен метод непрерывного контроля или периодического измерения активного сопротивления изоляции и емкости относительно земли всей сети и отдельных присоединений, а также параметров устройств заземления

нейтрали без снятия рабочего напряжения, основанный на использовании бичастотных оперативных синусоидальных сигналов.

3. Изложена методика определения составляющих тока однофазного замыкания на землю для распределительных сетей напряжением 6 - 10 кВ на основе измерения параметров изоляции относительно земли электрической сети и ее составляющих под рабочим напряжением, путем наложения на сеть одновременно двух оперативных синусоидальных сигналов не промышленной частоты.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 10-е изд. - М.: УИЦ "Гардарики", 2001. – 638 с.
2. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справ. пособие. - М.: Недра, 1993. – 192 с.