

А.И. Ковалев*(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ СЕТИ НА УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

В общем случае электробезопасность электрических сетей, если не учитывать физиологические особенности и психологическое состояние человека, оценивается в основном значениями тока, проходящего через человека, напряжения прикосновения и времени воздействия указанных величин [1, 3, 4]. Однако следует предположить, что на тяжесть электротравмы существенное влияние будет оказывать режим работы нейтрали электрической сети, причем как при непосредственном прикосновении к токоведущим частям, так и при прикосновении к корпусам электрооборудования при аварийных режимах.

Как было установлено в [1,4], ни одно из защитных устройств не может гарантировать благополучного исхода при прикосновении человека к токоведущим частям в сетях с любым режимом нейтрали при напряжении 6 кВ и выше. Поэтому следует говорить об электробезопасности сети косвенной, т.е. от действия напряжения прикосновения.

Цель статьи – оценка степени влияния режимов работы нейтрали на электробезопасность в условиях реальных параметров карьерных распределительных сетей напряжением 6 кВ.

Сети с полностью изолированной нейтралью

Ток через тело человека при непосредственном прикосновении к одной из фаз сети с полностью изолированной нейтралью, если пренебречь продольным сопротивлением линии электропередачи, определится выражением

$$I_{\text{ч}} = \sqrt{3} U_{\text{н}} \frac{\sqrt{(3 R_{\text{ч}} + R + 3 \omega^2 C^2 R_{\text{ч}} R^2)^2 + (\omega C R)^2}}{(3 R_{\text{ч}} + R)^2 + (3 \omega C R R_{\text{ч}})^2}, \quad (1)$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение электрической сети; ω – угловая частота напряжения сети; R, C – соответственно активное сопротивление и емкость изоляции относительно земли одной фазы электрически связанной сети; $R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека, которое для промышленной частоты считается чисто активным.

Выполненные расчеты и их анализ позволяют утверждать, что для реальных параметров распределительных и питающих сетей железорудных карьеров прикосновение человека к одной из фаз сети, даже без учета переходного процесса, всегда является смертельно опасным.

Степень опасности распределительных сетей при прикосновении к корпусу электрооборудования, оказавшегося под напряжением вследствие повреждения изоляции одной из фаз, характеризуется значением напряжения прикосновения и временем его воздействия. Значение напряжения прикосновения для

установившегося процесса замыкания в общем случае определяется значениями тока однофазного замыкания на землю и сопротивления защитного заземления и, без учета шунтирующего действия сопротивления тела человека и активного сопротивления изоляции сети относительно земли, может быть рассчитано по выражению:

$$U_{np} = I_3 r_3 = \frac{\sqrt{3} U_n \omega C r_3}{\sqrt{1 + 9 \omega^2 C^2 r_3^2}}, \quad (2)$$

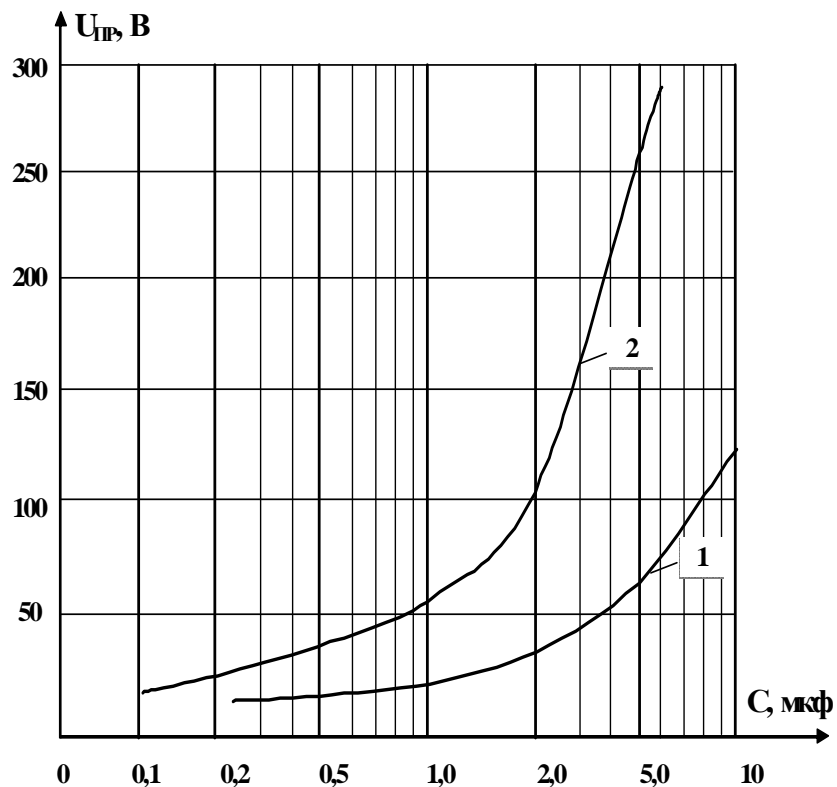
где r_3 – сопротивление защитного заземления поврежденного электрооборудования; I_3 – ток однофазного замыкания на заземленный корпус электроустановки.

При дуговых замыканиях имеет место продолжительный переходный процесс, сопровождающийся бросками емкостного тока, что приводит к увеличению действующего значения напряжения прикосновения

$$U_{np} = k_{\delta} I_3 r_3, \quad (3)$$

где k_{δ} – коэффициент, учитывающий увеличение тока замыкания в переходном режиме.

На рисунке кривыми 1 и 2 показано изменение величины напряжения прикосновения в сети с изолированной нейтралью, соответственно при глухом (коэффициент $k_{\delta} = 1$) и дуговом (коэффициент $k_{\delta} = 4$) замыкании на землю в зависимости от величины емкости сети относительно земли при величине сопротивления защитного заземления 4 Ом.



Зависимость напряжения прикосновения от емкости сети при металлическом (1) и дуговом (2) замыкании

Если условиями эксплуатации сети предусматривается действие защиты от однофазных замыканий на землю на отключение без выдержки времени, время воздействия на организм человека напряжения прикосновения находится в пределах 0,2 с. (время срабатывания защиты и коммутационного аппарата). Для этого времени воздействия и при величине сопротивления защитного заземления не более 4 Ом напряжение прикосновения в установившемся режиме замыкания не превышает допустимое (кратковременно безопасное) значение во всем возможном диапазоне изменения величины тока однофазного замыкания на землю и физических параметров распределительной сети с изолированной нейтралью. Если считать, что в соответствии с нормами в сетях с изолированной нейтралью ток однофазного замыкания на землю не должен превышать 30 А, напряжение прикосновения составит не более 120 В.

В то же время, длительно допустимое напряжение прикосновения (общепринятое значение его составляет 40 В), значительно меньше максимально возможных значений при установившемся режиме замыкания. В случае отсутствия или несрабатывания защиты от замыканий на землю появляется реальная опасность поражения человека напряжением прикосновения при соответствующей емкости сети относительно земли.

Значение напряжения прикосновения возрастает в три-пять раз и становится опасным даже при кратковременном воздействии за счет переходных процессов, возникающих при глухих и перемежающихся замыканиях на землю, которые сопровождаются бросками емкостного тока.

Сети с компенсированной нейтралью.

Ток через тело человека при непосредственном прикосновении к одной из фаз сети с компенсированной нейтралью в установившемся режиме определяется выражением

$$I_{\text{ч}} = U_{\phi} \frac{\sqrt{[\omega^2 L_k^2 (3 R_{\text{ч}} + R) + V^2 R^2 R_{\text{ч}}]^2 + (\omega L_k R^2 V^2)^2}}{\omega^2 L_k^2 (3 R_{\text{ч}} + R)^2 + V^2 R^2 R_{\text{ч}}^2}. \quad (4)$$

Из этого выражения следует, что значение тока через тело человека при непосредственном прикосновении к токоведущим частям одной из фаз сети в значительной степени зависит от степени расстройки режима компенсации от резонансного. Ток через человека при резонансной настройке компенсирующего устройства будет:

$$I_{\text{ч}} = \frac{3U_{\phi}}{R + 3R_{\text{ч}}}. \quad (5)$$

В сети с компенсированной нейтралью при настройке компенсирующего устройства близкой или равной резонансному режиму, на значение тока через человека в установившемся режиме замыкания может оказать заметное влияние активная составляющая, определяющая потери в сердечнике компенсирующего устройства. С учетом последнего ток через тело человека

$$I_{\text{ч}} = U_{\phi} \frac{\sqrt{[\omega^2 L_k^2 (3 R_{\text{ч}} + R)(3 R_k R_{\text{ч}} + R R_{\text{ч}} + R R_k) + V^2 R^2 R_k^2 R_{\text{ч}}]^2 + [V^2 R^2 R_k^2 \omega L_k]^2}}{\omega^2 L_k^2 (3 R_k R_{\text{ч}} + R R_{\text{ч}} + R R_k)^2 + (V^2 R R_k R_{\text{ч}})^2}. \quad (6)$$

Без учета переходного процесса при повреждении изоляции относительно земли одной фазы, опасность сетей с компенсированной нейтралью обуславливается в основном степенью расстройки компенсирующего устройства и параметрами электрической сети. При резонансной настройке компенсирующего устройства опасность сети определяется уровнем напряжения и значением активного сопротивления изоляции всей сети относительно земли.

Следует, однако, отметить, что наличие переходного процесса, возникающего в момент касания человеком одной из фаз, преимущества компенсированных сетей в отношении электробезопасности практически сводятся к нулю. В таких сетях в момент замыкания через тело человека пройдет, так называемый, свободный ток компенсирующего устройства, частота которого определяется физическими параметрами электрической сети и дугогасящего устройства, а значение составляет примерно 25% от емкостного тока замыкания.

Значение напряжения прикосновения, так же как и в сетях с изолированной нейтралью, зависит от значения тока однофазного замыкания на землю (корпус) и значением сопротивления защитного заземления. Кроме того, в ком-

пенсированных сетях на значение напряжения прикосновения существенное влияние оказывает режим настройки компенсирующего устройства.

В общем случае компенсация емкостного тока замыкания на землю имеет целью уменьшение, кроме тока однофазного замыкания, напряжения прикосновения и шага. Указанные напряжения могут быть уменьшены примерно во столько раз, во сколько раз уменьшен полный ток замыкания на землю. Необходимо отметить, что в переходных режимах, сопровождающих однофазные замыкания на землю, а также при замыканиях через перемежающуюся электрическую дугу, условия электробезопасности значительно ухудшаются. Однако, за счет меньшего значения остаточного тока замыкания и благоприятных условий для гашения электрической дуги, условия электробезопасности даже в переходных режимах намного лучше, чем при тех же условиях в сетях с полностью изолированной нейтралью.

Сети с активным сопротивлением в нейтрали.

Ток через тело человека при непосредственном прикосновении к одной из фаз сети с резистором в нейтрали с учетом параметров распределительной сети равен:

$$I_{\text{ч}} = U_{\phi} \frac{\sqrt{[(3 R_a + R)(3 R_a R_{\text{ч}} + R R_{\text{ч}} + R R_a)^2 + 9 \omega^2 C^2 R^2 R_a R_{\text{ч}}]^2 + (3 \omega C R^2 R_a)^2}}{(3 R_a R_{\text{ч}} + R R_{\text{ч}} + R R_a)^2 + (3 \omega C R_a R_{\text{ч}} R)^2}, \quad (7)$$

где R_a – сопротивление, включенное между нейтральной точкой сети и землей.

Для выполнения возложенных на дополнительный активный ток замыкания на землю функций подавления переходного процесса необходимо, чтобы его значение составляло от 50 до 100% емкостного тока замыкания. В этом случае полный ток замыкания на землю, в том числе и через человека, при прочих равных условиях увеличивается максимум в 1,41 раза по сравнению с сетью с полностью изолированной нейтралью. Отсюда следует, что при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям сети с резистором в нейтрали, так же как и сети с полностью изолированной нейтралью для реальных физических параметров изоляции фаз сети относительно земли являются опасными, даже в случае использования защиты от замыканий на землю действующей на отключение.

Степень опасности сети при прикосновении человека к корпусам электрооборудования, оказавшегося под напряжением вследствие повреждения изоляции в установившемся режиме также несколько возрастает по сравнению с сетью с полностью изолированной нейтралью за счет увеличения полного тока замыкания на землю и, соответственно, увеличения напряжения прикосновения.

Значение тока глухого однофазного замыкания на землю в сети с резистором в нейтрали определяется геометрическим сложением двух составляющих: емкостной, и активной, т.е.

$$I_3 = \sqrt{I_c^2 + I_a^2} \quad \text{или} \quad I_3 = \frac{U_\phi \sqrt{1 + 1/k_a^2}}{R_a},$$

где k_a – коэффициент, учитывающий долю дополнительного активного тока замыкания на землю по сравнению с емкостным,

$$k_a = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U_\phi}{3 U_\phi \omega C R_a} = \frac{1}{3 \omega C R_a}. \quad (8)$$

Однако в переходном режиме замыкания, который в сетях с изолированной нейтралью при определенных ее параметрах представляет опасность для человека, в сетях с резистором в нейтрали опасность прикосновения к корпусам поврежденного оборудования значительно уменьшается за счет резкого сокращения длительности переходного процесса, а также за счет уменьшения амплитуды бросков тока замыкания на землю. При наложении активной составляющей тока однофазного замыкания на землю величиной 50 % от емкостного тока, напряжение прикосновения при дуговых замыканиях уменьшается (например, при емкостном токе замыкания 10 А) в 1,8...2,7 раза по сравнению с сетью с полностью изолированной нейтралью.

Выводы

1. Непосредственное прикосновение человека к токоведущим частям распределительных сетей напряжением 6 кВ независимо от режима работы нейтрали электрической сети всегда является смертельно опасным.

2. Прикосновение к корпусам электрооборудования в режимах однофазного замыкания на корпус в сети с резистором в нейтрали при прочих равных условиях представляет меньшую опасность за счет резкого сокращения длительности переходного процесса, а также за счет уменьшения амплитуды бросков тока замыкания на землю.

Список литературы

1. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справ. пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
2. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. -М.: Недра, 1976. - 175 с.
3. Электробезопасность на открытых горных работах. / Под ред. В.И.Щуцкого. – М.: Недра, 1983. -192 с.
4. Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражений в горной промышленности. – М.: Недра, 1982. – 376 с.