

УЛУЧШЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ СЕТЕЙ 6-35 кВ ПОСРЕДСТВОМ ВЫБОРА СПОСОБА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Борис ЖИНГАН

Технический Университет Молдовы

Rezumat: Режим изолированной нейтрали достаточно широко применяется в России, странах СНГ и в Молдове. При этом способе заземления нейтральная точка источника (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземления. Одними из главных преимуществ данных сетей является относительно малые токи замыкания на землю и в отсутствие необходимости в немедленном отключении потребителей при замыкании фазы на землю. Но данные преимущества относительно в том плане, что при определенных параметрах сети при достаточных фазных емкостях емкостной ток замыкания принимает большие значения. При этом может наблюдаться перемежающаяся дуга, которая вызывает многократные перенапряжения. Как следствие, срок эксплуатации изоляции снижается, а при ослабленной изоляции это ведет к многофазному короткому замыканию и отключению потребителей. По этой причине необходимо компенсировать емкостные токи и применять резистивное заземление нейтрали для ограничения перенапряжений.

Cuvinte cheie: Изолированная нейтраль, компенсированная, перемежающаяся дуга, перенапряжение.

Каждый режим работы нейтрали характеризуется своими параметрами и электрическими величинами. От способа заземления нейтрали зависят токи и напряжения на поврежденной и неповрежденных фазах, уровень изоляции сетей, настройка релейной защиты и уровень перенапряжений, возливаемые при аварийном режиме. Для оценки уровня перенапряжений для разного способа заземления нейтрали необходимо представить математические выражения, описывающие максимальную величину перенапряжений в электросетях.

1.Изолированная нейтраль. При нормальном режиме фазные напряжения симметричны, геометрическая сумма емкостных токов равна нулю. В случае однофазного короткого замыкания на землю фазы С при пренебрежении активным сопротивлением дуги ($R_d = 0$), емкость этой фазы шунтируется, а напряжение в поврежденной фазе уменьшается до нуля. В неповрежденных фазах напряжение возрастает до линейного, т.е. увеличивается в $\sqrt{3}$ раз. В этом случае геометрическая сумма векторов \bar{U}_B и \bar{U}_{ON} ; \bar{U}_A и \bar{U}_{ON} будет равна $\bar{U}'_A = \bar{U}_A + \bar{U}_{ON}$ и $\bar{U}'_B = \bar{U}_B + \bar{U}_{ON}$, т.е. $\bar{U}'_A = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_A$ $\bar{U}'_B = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_B$. Суммарный емкостной ток уже не равен нулю, а равен утроенному значению емкостному току фазы в нормальном режиме. ($I_3 = 3 \cdot I_C$). При определенных значениях может возникнуть электрическая дуга. Тогда переходное сопротивление в месте замыкания отлично от нуля ($R_n \neq 0$), что ведет к разогреву изоляции, что чревато переходом простого замыкания на землю в междуфазное короткое замыкание. В момент прохождения тока через ноль, дуга может погаснуть. А затем вновь загореться. Это так называемая перемежающаяся электрическая дуга. С перемежающейся дугой связаны перенапряжения, которые могут достигать многократного порядка. Кроме этого при замыкании фазы на землю возможно возникновение феррорезонансных перенапряжений в цепи намагничивания измерительных трансформаторов напряжения, возникающих при взаимодействии емкостей сети относительно земли с их индуктивностями. Существуют несколько теорий формирования перенапряжений.

1.1.Теория Петерсена. Характерной особенностью теории является предположение о том, что после каждого зажигания дуги она гаснет при первом прохождении тока замыкания через ноль. В момент погасания дуги принужденное значение напряжения на поврежденной фазе не равно нулю. Предполагается, что электрическая прочность дугового промежутка нарастает быстрее, чем останавливающееся напряжение с частотой ω_2 на поврежденной фазе. По теории Петерсена каждый последующий пробой изоляции происходит с интервалом в половину периода промышленной частоты на максимуме напряжения поврежденной фазы.

$$U_{\max} = E_{\text{фм}} \frac{1.5 + (1 - k_{\text{с}})(1 - k_{\sigma 1})}{1 - \frac{2}{3}(1 - k_{\text{с}})(1 - k_{\sigma 1})}$$

где U_{\max} – максимальное перенапряжение на неповрежденной фазе;

$k_{\text{с}}$ -коэффициент, определяющий влияние междуфазных емкостей на начальные перенапряжения на неповрежденных фазах при зажигании дуги. Обычно $k_{\text{с}} = 0.2$;

$k_{\sigma 1}$ -коэффициент снижения амплитуды свободных колебаний за половину периода переходного процесса накопления избыточных зарядов на емкостях неповрежденных фаз при зажигании дуги. $k_{\sigma 1}$ зависит от параметров и конфигурации сети и принимает практические значения $k_{\sigma 1} = 0.2 - 0.8$. Для расчета максимально возможных перенапряжений принимают $k_{\sigma 1} = 0.1$;

$E_{\text{фм}}$ – амплитудное значение фазной ЭДС.

Практически $k_{\sigma 1}$ рассчитывается по следующим выражениям:

$$k_{\sigma 1} = \frac{\sigma_1}{\omega_1} \cdot \pi; \quad \sigma_1 = \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{2 \cdot L_{\text{ЭКВ}}}; \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{2L_{\text{ЭКВ}} \cdot (C_{\text{Ф}} + C_{\text{МФ}})}},$$

где $R_{\text{ЭКВ}}, L_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентные активные и индуктивные сопротивления сети, $C_{\text{Ф}}, C_{\text{МФ}}$ – фазная и межфазная емкость.

При вышеперечисленных принятых значений, $U_{\max} = 4.2E_{\text{фм}}$. Но так как $k_{\sigma 1}$ брали с запасом, то на практике возможное перенапряжение меньше, чем $4.2E_{\text{фм}}$. Ниже приводится таблица возможных перенапряжений, в зависимости от $k_{\sigma 1}$.

$k_{\sigma 1}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
U_{\max}	4.2	3.7	3.28	2.9	2.59	2.3	2.05	1.85

1.2.Теория Петерса и Слепяна. По теории Петерса и Слепяна максимальные перенапряжения определяются при условии, когда после очередного зажигания дуги гаснет при первом прохождении через нуль принужденной составляющей тока замыкания. Остальные допущения остаются такими же, как и в теории Петерсена.

$$U_{\max} = 1.5E_{\text{фм}} + 2E_{\text{фм}}(1 - k_{\text{с}})(1 - k_{\sigma 1}).$$

Следует дополнить, что при горении дуги по теории Петерса и Слепяна переходный процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги отсутствует. Это объясняется тем, что в момент гашения дуги принужденное напряжение на поврежденной фазе равно нулю, так как в этот момент мгновенное значение ЭДС источника равно и противоположно по знаку напряжению на нейтрали. При вышеперечисленных принятых значений, $U_{\max} = 2.94E_{\text{фм}}$. Ниже приводится таблица возможных перенапряжений, в зависимости от $k_{\sigma 1}$.

$k_{\sigma 1}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
U_{\max}	2.94	2.78	2.62	2.46	2.3	2.14	1.98	1.82

1.3.Теория Белякова. Согласно теории Белякова предполагается, что дуга может погаснуть как при первом, так и любом последующем переходе через нуль свободной составляющей тока замыкания. Если дуга гаснет при каком-либо прохождении через нуль свободной составляющей тока замыкания, при предшествующем ее зажигании вблизи максимума ЭДС поврежденной фазы, то знаки напряжения на нейтрали и ЭДС поврежденной фазы различны и можно допустить что ЭДС не изменяется за время горения дуги. Беляковым было установлено, что следующее зажигание дуги происходит, если $U_{\text{п}} \leq 0.4E_{\text{фм}}$. Было экспериментально установлено, что наибольшее перенапряжение возникает на отстающей фазе по отношению к поврежденной фазе и при зажигании дуги не на максимуме ЭДС поврежденной фазы, а с некоторым опережением этого момента времени. Этому моменту времени соответствует некоторый фазовый угол(φ_3).

Тангенс угла φ_3 может быть найден из выражения:

$$\tan \varphi_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1}) + \sqrt{3}$$

Как было выше сказано, при $k_C = 0.2$ и $k_{\sigma 1} = 0.1$, угол $\varphi_3 = 68.7^\circ$.

Напряжение на нейтрали, сформировавшееся в предшествующем цикле зажигания и гашения дуги равно: $U_N = 1.2E_{\phi M}$. Максимальное перенапряжение равно:

$$U_{\max} = \sqrt{3}E_{\phi M} \sin(\varphi_3 + 210^\circ) + [\sqrt{3}E_{\phi M} \sin(\varphi_3 + 210^\circ) - E_{\phi M} \sin(\varphi_3 + 240^\circ) - U_N] \cdot (1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1}).$$

При вышеперечисленных значениях k_C , $k_{\sigma 1}$, φ_3 , $U_{\max} = 3.24E_{\phi M}$. Если принять, что очередной пробой изоляции происходит не при $\varphi_3 = 68.7^\circ$, а при максимуме ЭДС поврежденной фазы, то перенапряжение на неповрежденной фазе:

$$U_{\max} = 1.5 \cdot E_{\phi M} + (E_{\phi M} + U_N)(1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1}) = 1.5 \cdot E_{\phi M} + (1.2E_{\phi M} + E_{\phi M}) \cdot 0.8 \cdot 0.9 = 3.08E_{\phi M}.$$

Делая выводы, можно заключить, что при изолированной нейтрали какой бы теорией не руководствовались при расчете максимальных перенапряжений, перенапряжения достигают по крайней мере трехкратного значения, что существенно повышает риск пробоя изоляции и переход простого замыкания на землю в многофазное к.з., а также снижает срок службы изоляции. Поэтому стоит задача ограничения перенапряжений несколькими способами: 1. применение компенсированной нейтрали, благодаря чему существенно снижается риск появления дуги; 2. применение резистивного заземления нейтрали, при котором даже при появлении дуги обеспечивается существенное снижение максимальных перенапряжений в электросети; 3. применение комбинированной нейтрали.

2. Компенсированная нейтраль. При относительно небольших токах замыкания дуга может принять перемежающийся характер, а при больших токах значительное тепловыделение разрушает изоляцию и приводит к междуфазному к.з. Для ограничения тока замыкания применяется дугогасящая катушка. Известно, что индуктивный ток находится в противофазе с емкостным током. Если дугогасящую катушку настроить таким образом, чтобы по модулю индуктивный ток катушки равнялся бы емкостному току, то они компенсируются, и в месте замыкания ток не протекает. Другими словами при $I_C = I_L$ имеет место резонанс токов и при симметрии сети ток замыкания $I_3 = 0$. На практике достичь полной компенсации тока практически невозможно, так как конфигурация и параметры сети постоянно меняются, значит изменяется и значение емкостного тока замыкания. Необходимо ввести параметр, который бы определял степень компенсации емкостного тока. Так $\nu = 1 - \frac{I_C}{I_L}$ – степень компенсации. При точной компенсации $\nu = 0$, при $I_L > I_C$ имеет место перекомпенсация ($\nu < 0$), а при $I_L < I_C$ имеет место недокомпенсация ($\nu > 0$). Для расчета перенапряжений необходимо определить d – коэффициент демпфирования или коэффициент затухания. $d = \frac{I_{1a}}{I_C} = \frac{3G_{\phi} + G_L}{3\omega C_{\phi}}$, где

I_{1a}

– активная составляющая тока, обусловленная утечками изоляции сети и потерями в реакторе;

G_L – активная проводимость дугогасящего реактора, учитывающая потери в катушке;

G_{ϕ} – активная проводимость фазы; C_{ϕ} – фазная емкость;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота тока промышленной частоты $f = 50$ Гц.

$$U_{\max} = 1.5 \cdot E_{\phi M} + \left[E_{\phi M} + U_{N\max} \cdot e^{\frac{-d\pi}{2|1-\sqrt{1-\nu}|}} \right] (1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1}).$$

$U_{N\max} = 1.48E_{\phi M}$ – максимальное напряжение на нейтрали.

При неизменных параметрах, степень компенсации существенно влияет на перенапряжения. Так при $\nu = 0.01$, $U_{\max} = 2.22E_{\phi M}$, а при $\nu = 0.1$ $U_{\max} = 2.45E_{\phi M}$. Как видно дугогасящая катушка может снижать перенапряжения до безопасных величин, но при условии точной компенсации. Статистика показывает, что примерно 70 % всех замыканий на землю в компенсированных сетях не сопровождается развитием в междуфазные КЗ. При наличии автоматической настройки эта цифра

повышается до 80-90 % . Из-за невозможности оперативного обеспечения резонансной настройки реактора не представляется возможным полностью устранить дуговые замыкания и перенапряжения. Кроме этого, в сети с компенсированной нейтралью весьма опасны неполнофазные режимы в условиях недокомпенсации емкостного тока. В этом случае реактор является источником перенапряжений с очень большой кратностью (3-15) $E_{\phi M}$ из-за определенных параметров реактора.(добротность, индуктивность, R).

3. Резистивное заземление нейтрали. Данный способ заземления нейтрали создает путь для стекания избыточных зарядов с помощью заземления нейтрали через резистор с таким сопротивлением, при котором практически полное стекание избыточных зарядов обеспечивается к моменту возможного повторного зажигания дуги. При этом ток замыкания будет иметь не только емкостную составляющую, но и активную составляющую. Таким образом ток замыкания при резистивном заземлении примерно в 1.5 раза больше чем при режиме работы изолированной нейтрали. Принимают допущения согласно которым активный резистивный ток должен быть в пределах 30-60 А. В этом случае сеть должна быть оснащена быстродействующей защитой от замыканий на землю, действующей на отключение, так как длительное протекание таких токов в месте замыкания недопустимо.

Максимальные перенапряжения при резистивном заземлении по теории Петерсена:

$$U_{\max} = 1.5 \cdot E_{\phi M} + (1.2 \cdot E_{\phi M} \cdot e^{-\pi(d+G_N)} + E_{\phi M}) \cdot (1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1}).$$

Максимальные перенапряжения при резистивном заземлении по теории Петерса и Слепяна:

$$U_{\max} = E_{\phi M} \cdot \frac{1.5 + (1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1})}{1 - \frac{2}{3} \cdot (1 - k_C)(1 - k_{\sigma 1}) \cdot e^{-\pi(d+G_N)}}$$

Обе формулы дают практически идентичные значения $U_{\max} = (2.0 - 2.1)E_{\phi M}$. Достигается значительное уменьшение перенапряжений. Основным достоинством резонансно-заземленных сетей является то, что наиболее вероятные виды нарушения изоляции – замыкание фаз на землю – не развиваются в междуфазные КЗ, что позволяет оставить поврежденный участок сети на время, достаточное для его отыскания и отключения без перерыва питания потребителей. Повышение надежности сети достигается за счет снижения кратности и продолжительности дуговых перенапряжений, что предотвращает появление двойных замыканий на землю, феррорезонансных колебаний в цепи измерительных трансформаторов напряжений и развития многофазных коротких замыканий по всей сети, отходящей от данной секции шин центра питания. Наличие резистора в нейтрали сети обеспечивает снижение напряжения смещения нейтрали, в то время как дугогасящий реактор приводит к увеличению напряжения на нейтрали. Другой немаловажный фактор, требующий перехода от изолированной нейтрали к резистивному заземлению—это опасность поражения людей и животных электрическим током. Заземление нейтрали через резистор приводит к появлению активной составляющей тока, что благоприятно может быть использовано для обеспечения чувствительности и надежности работы релейной защиты, которая может действовать на отключение повреждаемой линии. Таким образом аварийный режим сохраняется не пару часов, а несколько секунд, что во много раз снижает риск попадания человека под шаговое напряжение.

Библиография

1. Вайнштейн Р.А. Режимы заземления нетрали в электрических системах: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В.Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118с.
2. Перенапряжения в электрических системах и защита от них/ В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
3. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для сред.проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.А. Чиркова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 448 с.
4. ПУЭ 2003г, 7 издание.
5. Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей/ М. А. Короткевич.-Мн.:ЗАО “Техноперспектива”, 2003.-373 с.