

Импульсно-резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях

КАЧЕСОВ В.Е., ФИНАШИН Р.А.

Для распределительных сетей разработан способ импульсно-резистивного (высокоомного) заземления нейтрали. Подключение (заземление) нейтрального резистора происходит при неустойчивых (переключающихся) замыканиях на землю, когда производная напряжения в нейтрали сети имеет большое значение. Для параметров большинства электрических распределительных сетей производная напряжения при установившемся замыкании на землю много меньше, чем при неустойчивом ($du_N / dt_{\max} \gg du_{N\sim} / dt$), что позволяет эффективно управлять режимом резистивного заземления нейтрали сети и устранять недостатки постоянного резистивного заземления, обусловленные повышенным током замыкания промышленной частоты.

Ключевые слова: распределительные сети, замыкания на землю, способ заземления нейтрали

Распределительные сети с неэффективно заземленной нейтралью исторически разрабатывались как сети с достаточно высокой надежностью транспорта электрической энергии, поскольку даже наличие дефекта фазной изоляции не нарушает полноценного питания электропотребителей. Из-за возможности работы сети с замыканием на землю заложены необходимые запасы электрической прочности изоляции для электрооборудования, длительно работающего под линейным напряжением. Однако его значительный износ, а также большие издержки на его ремонт (например, генераторов и двигателей) часто ставят задачу глубокого ограничения дуговых перенапряжений, провоцируемых неустойчивыми однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ) и деградирующих фазную изоляцию.

Высокоомное резистивное заземление. Несомненно, эффективное снижение дуговых перенапряжений достигается установкой дугогасящих катушек (ДГК)[1], первостепенное назначение которых – снижение емкостных токов замыкания на землю (ЕТЗЗ) и повышение вероятности самовосстановления диэлектрических свойств изоляции. Основным недостатком их применения остается дороговизна устройств автоматической компенсации емкостного тока замыкания на землю I_C , необходимых в связи с изменением полной емкости сети при различного рода коммутациях питающих фидеров.

Для сетей с малыми ЕТЗЗ альтернативой является применение нейтральных/заземляющих высокоомных резисторов R_N , позволяющих в паузах между повторными зажиганиями дуги снимать заряд и напряжение с нейтрали сети и, соответственно, снижать интенсивность переходного процесса замыкания на землю и дуговые перенапряжения.

Установка нейтрального резистора приводит к увеличению установившегося тока замыкания на землю (в $\sqrt{2}$ раз при резистивном коэффициенте компенсации $K_r = I_{RN} / I_C = 1$), что в противоположность ДГК снижает электробезопасность сети (и ее экологичность), увеличивая шаговое напряжение и напряжение прикосновения, а также усиливая разрушения в месте дефекта изоляции. Необходимо отметить, что введение высокоомного резистора в нейтраль сети практически не изменяет переходные токи замыкания – как его разрядную, так и перезарядную компоненты (при одинаковых напряжениях повторного пробоя фазной изоляции). Перезарядная компонента тока замыкания принципиально несколько изменяется из-за шунтирования фазного луча индуктивности эквивалентного источника L_S . Однако для типичных мощностей понизительных трансформаторов 32–63 МВА индуктивное сопротивление фазного луча эквивалентного источника оказывается много меньше сопротивления резистора R_N : для наиболее вероятного диапазона частот собственных колебаний в перезарядном контуре сети $f_{\Pi} = 1, \dots, 5$ кГц сопротивление фазного луча эквивалентной индуктивности не превышает $X_C \approx 30$ Ом, что более чем на порядок меньше сопротивления нейтрального резистора.

Некоторым незначительным преимуществом сети с высокоомным заземлением нейтрали является снижение напряжения пика гашения $U_{п.г}$, что способствует снижению вероятности возникновения повторных зажиганияй заземляющей дуги. После ее самопогасания происходит рассеяние заряда (и уменьшение напряжения) нулевой последовательности. Степень его снижения при $K_r = 1$ определяется как

$$K \approx 1 - \exp\left(-\frac{\omega\pi}{\beta_1}\right)$$

или для промышленной частоты $\omega = 100\pi$

$$K \approx 1 - \exp\left(-\frac{100\pi^2}{\beta_1}\right),$$

где $\beta_1 = (L_S C_1)^{-0,5}$ – круговая частота свободных колебаний в контуре прямой последовательности, C_1 – емкость сети для этой последовательности.

В диапазоне частот $\beta_1 / 2\pi = 1, \dots, 5$ кГц, соответственно, $K = 0,145 \div 0,03$. Принимая во внимание тот факт, что напряжение пика гашения при фазе первичного пробоя $\varphi = 90^\circ$ составляет, как правило, $U_{п.г} = 0,3 \div 0,5$ отн. ед., его относительное снижение может достигать нескольких десятков процентов.

Уменьшение напряжения пика гашения сопровождается одновременным уменьшением скорости нарастания напряжения на поврежденной фазе, что также способствует снижению вероятности повторного электрического пробоя участка с ослабленной изоляцией. На рис.1 показаны кривые восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги при различных коэффициентах компенсации K_r . Для верхних огибающих напряжений до значений, приблизительно равных $U_{п.г}$, по четырем точкам построены аппроксимирующие кубические полиномы вида

$$U_{ЭП}(t) = at + bt^2 + ct^3,$$

производная от которых позволяет оценить минимальную (требуемую) начальную скорость нарастания электрической прочности (ЭП) изоляции $K_{ЭП\min}$, при которой не происходит повторный пробой изоляции:

$$K_{ЭП\min} = u'(t)|_{t=0} = a.$$

В качестве усредненной скорости нарастания ЭП изоляции $K_{ЭП\text{ср}}$ примем значение скорости изменения огибающей напряжения в момент времени, равный четверти периода свободных колебаний β_1 , т.е. $t_{\text{ср}} = \pi / (2\beta_1)$, поэтому

$$K_{ЭП\text{ср}} = a + 2bt_{\text{ср}} + 3ct_{\text{ср}}^2.$$

Расчетные значения скорости нарастания ЭП и напряжения пика гашения представлены в таблице. Введение резистора в нейтраль сети позволяет более чем в 2 раза снизить требование к начальной скорости нарастания ЭП изоляции после гашения дуги (для $K_r = 1$) и приблизительно в 1,6 раза спустя четверть периода свободных колебаний в контуре прямой последовательности.

Коэффициент компенсации K_r	Скорость нарастания ЭП, отн.ед./мс		Напряжение пика гашения дуги $U_{п.г}$
	$K_{ЭП\min}$	$K_{ЭП\text{ср}}$	
0	4,00	0,33	0,48
0,8	2,10	0,22	0,33
1,0	1,54	0,20	0,30
1,2	0,98	0,30	0,26

В отличие от высокоомного резистивного заземления использование в нейтрали сети ДГК практически не изменяет напряжение пика гашения и скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе, но длительное время после самогашения дуги позволяет сохранять низкое напряжение практически промышленной частоты (при коэффициенте компенсации ЕТЗЗ $K_L = I_L / I_C$, близком к единице), начальное значение которого $U \approx U_{п.г}/2$.

Основным недостатком сети с высокоомным резистивным заземлением является значительный ток замыкания промышленной частоты, который помимо отмеченных ранее недостатков требует применения нейтральных резисторов большой мощности и приводит, соответственно, к ощутимым потерям электрической энергии. В закрытых распределительных устройствах это приводит также к увеличению пожароопасности.

Импульсно-резистивное заземление (ИРЗ). Для устранения недостатков сетей с высокоомным постоянным заземлением нейтрали разработан импульсно-резистивный способ, позволяющий исключить работу нейтрального резистора в режиме устойчивого замыкания на землю [2, 3]. Подключение резистора R_N к контуру заземления подстанции (станции) происходит автоматически только при неустойчивых замыканиях на землю, когда производная напряжения в нейтрали сети имеет большое значение.

u , отн. ед.

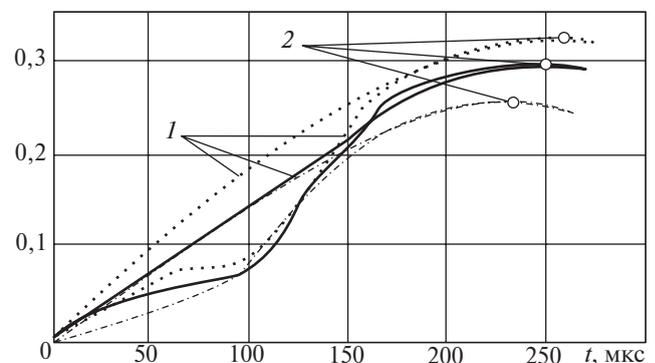


Рис. 1. Кривые восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе после самопогашения заземляющей дуги и аппроксимирующие огибающие минимальной электрической прочности фазной изоляции: 1 – $U_{ЭП}$; 2 – $U_{п.г}$; --- $K_r = 1,2$; — — — $K_r = 1,0$; $K_r = 0,8$

В режиме устойчивого замыкания на землю напряжение в нейтрали сети u_N близко по форме к синусоидальному и его производная, приблизительно равная

$$\frac{du_N(t)}{dt} \approx \omega U_{\text{ф.м}} \cos(\omega t),$$

достаточно мала.

В режиме дуговых (перебегающих) замыканий напряжение на нейтрали содержит быстрые перепады/скачки, что обусловлено наличием в нем широкого спектра свободных колебаний высших частот, вызываемых пробоями изоляции. Основная частота свободных колебаний, формирующая фронт напряжения u_N , — это перезарядная частота $\beta_{\text{п}}$, характеризующая перезарядный процесс на неповрежденных фазах, и разрядная — $\beta_{\text{р}}$, обусловленная колебательным разрядом емкости сети поврежденной фазы.

Перепад напряжения в нейтрали сети и, следовательно, его производная (du_N/dt) пропорциональны напряжению повторного зажигания $U_{\text{п.з}}$, которое случайным образом может варьироваться в широких пределах. Количество повторных зажига-

ний заземляющей дуги за один полупериод промышленной частоты при условии $U_{\text{п.з}} = \text{const}$ теоретически ограничено отношением: $N_{\text{п.з max}} \leq \text{int}(2U_{\text{ф.м}}/U_{\text{п.з}})$. В действительности перепад напряжения, под действием которого происходят ПЗ дуги, уменьшается из-за отличия фазы восстанавливающегося напряжения от 0 или 180° после последнего за полупериод ПЗ, а также из-за конечной длительности горения дуги, составляющей около π/β_1 . Считая среднюю скорость нарастания напряжения на поврежденной фазе равной $2U_{\text{ф.м}}\omega/\pi$, оценка числа повторных зажигания получается как

$$N_{\text{п.з}} \leq \text{int} \left(\frac{2U_{\text{ф.м}}\beta_{\text{п}}}{2U_{\text{ф.м}}\omega + U_{\text{п.з}}\beta_{\text{п}}} \right).$$

При малых значениях $U_{\text{п.з}}$ сумма свободных токов замыкания ($i_{\text{разр}} + i_{\text{пер}}$) не превышает вынужденную компоненту i_{\sim} и гашения дуги за время существования свободных колебаний не происходит, что соответствует модели горения дуги по [4] с одним ПЗ за полупериод основной частоты. Разрядная компонента $i_{\text{разр}}$ имеет, как правило, частоту собственных колебаний, в несколько раз большую перезарядной, и интенсивно затухает к моменту нуля полного тока замыкания (наступающего приблизительно спустя $\pi/\beta_{\text{п}}$). С учетом последнего допущения (неучета разрядной составляющей тока) гашение дуги замыкания в нуле тока промышленной частоты при малом $U_{\text{п.з}}$ определяется неравенством:

$$\frac{U_{\text{п.з}}}{\sqrt{0,75L_S/(C_{\text{ф}} + C_{\text{фф}})}} \frac{C_{\text{ф}}}{C_{\text{ф}} + C_{\text{фф}}} < I_{\sim m} \sin\left(\frac{\pi}{\beta_{\text{п}}}\right).$$

Так, для кабельной сети напряжением $U_{\text{ном}} = 10$ кВ с максимальным амплитудным ЕТЗЗ $I_{\sim m} = 14,1\sqrt{2} = 20$ А, $C_{\text{фф}}/C_{\text{ф}} = 0,27$ и эквивалентной индуктивностью $L_S = 1 \div 2$ мГн значение $U_{\text{п.з}}$, при котором происходит только одно ПЗ после гашения дуги в нуле тока промышленной частоты, равно $0,12 \div 0,24U_{\text{ф.м}}$.

Производная напряжения du_N/dt изменяется в зависимости от места замыкания, уменьшаясь при его удалении от центра питания, что используется в параметрических методах локации ОЗЗ [5–7]. Приближенная оценка скорости изменения напряжения на нейтрали сети может быть получена с помощью эквивалентной схемы замещения сети, приведенной на рис. 3. Система дифференциальных уравнений, описывающая переходный процесс в двухчастотном контуре (рис. 3), имеет вид:

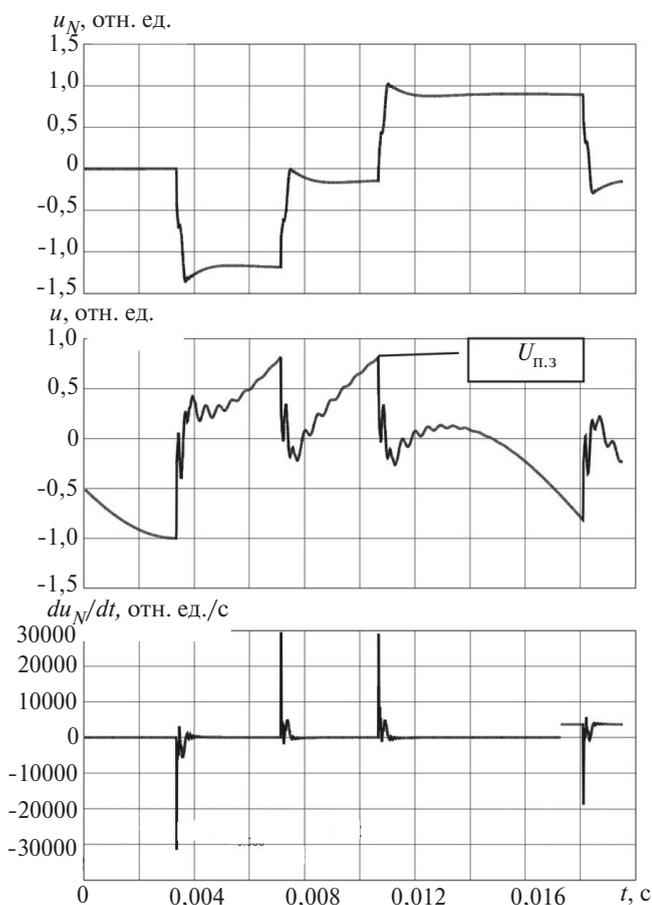


Рис. 2. Напряжение на нейтрали сети в поврежденной фазе и производная напряжения на нейтрали

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{C_\phi}{K_C} & \frac{2C_{\phi\phi}}{K_C} \\ 0 & 0 & -\frac{3C_\phi}{K_C} & \frac{2C_\phi}{K_C} \\ 0 & \frac{1}{1,5L_S + L_{л.экв}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{L_{л}} & -\frac{1}{L_{л}} & 0 & -\frac{R_{д}}{L_{л}} \end{bmatrix} \mathbf{X},$$

где вектор переменных состояния $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{C12} \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$

$$K_C = 6C_\phi C_{\phi\phi} + 2C_\phi^2.$$

При первичном пробое фазной изоляции на положительном максимуме сетевого напряжения вектор начальных условий равен: $\mathbf{X}_0 = [-0,5 \ 1,5 \ 0 \ 0]^T$. Решение системы дифференциальных уравнений может выполняться любым численным методом, например методом трапеций.

Производная du_N / dt вычисляется от напряжения на нейтрали, представляемого как

$$u_N(t) = u_{C1} + u_{C12} \frac{0,5L_S + L_{л.экв}}{1,5L_S + L_{л.экв}}.$$

Расчетные значения максимальной производной du_N / dt_{max} от индуктивности поврежденного фидера ($L_{л} \in [0,05;1]$ мГн), пропорциональной расстоянию до места замыкания применительно к параметрам кабельной сети, приведены на рис. 4. Максимальная производная в режиме неустойчивой перемежающейся дуги много больше производной в установившемся режиме $du_N / dt_{max} \gg du_N \sim / dt$. В воздушных сетях параметры линий обладают приблизительно на порядок большей индуктивностью, но более чем на порядок меньшей емкостью, поэтому максимальные производные du_N / dt_{max} находятся в диапазоне значений, близком для кабельных сетей.

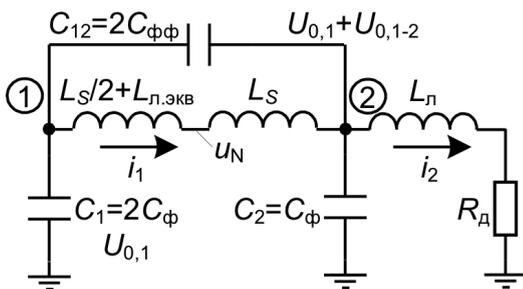


Рис. 3. Эквивалентная расчетная схема замещения распределительной сети при замыкании на землю

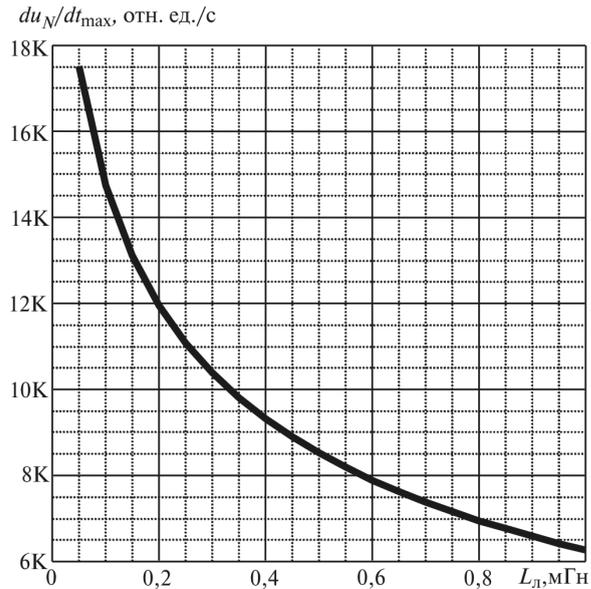


Рис. 4. Расчетная зависимость максимальной производной напряжения в нейтрали распределительной кабельной сети от индуктивности поврежденного фидера (масштабный коэффициент по оси ординат $K=1000$)

В электрических сетях с достаточно низкими свободными частотами $\beta_{п}$ и $\beta_{р}$ (удаленные от центра питания замыкания в воздушных распределительных сетях, например, на протяженных линиях электрохимической защиты нефте- и газопроводов) и повторных зажиганиях с малыми $U_{п.з}$ принципиально могут возникать ситуации, когда производная du_N / dt_{max} соизмерима с уставкой срабатывания и импульсное резистивное заземление не осуществляется. Однако такие режимы не представляют практический интерес с точки зрения ограничения дуговых перенапряжений, поскольку пробой фазной изоляции при малых $U_{п.з}$ создают, соответственно, малые свободные колебания и перенапряжения.

Техническая реализация ИРЗ. Упрощенная электрическая схема устройства ИРЗ представлена на рис. 5. Дифференцирующе-запускающая цепь (ДЗЦ), подключенная между нейтралью сети и контуром заземления станции/подстанции, при неустойчивом замыкании на землю формирует короткие (запускающие) импульсы напряжения, поступающие на высоковольтный ключ, в качестве которого выступает симистор. Его открытие и подключение к контуру заземления нейтрального резистора происходит в момент нарастания (по модулю) напряжения на нейтрали. При установлении устойчивого замыкания на землю, когда напряжение в нейтрали не содержит заметных перепадов, открытие полупроводникового ключа не происходит (производная du_N / dt меньше уставки срабатывания) и сеть работает с изолированной нейтралью.

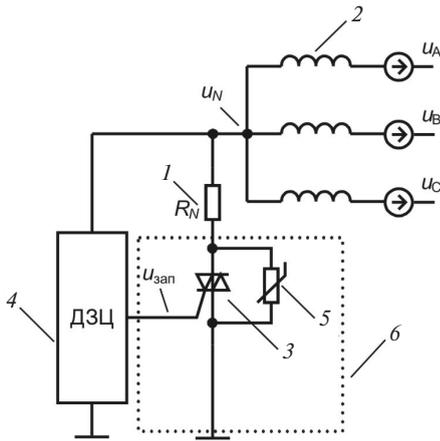


Рис. 5. Симисторное устройство для высокоомного ИРЗ нейтрали: 1 – нейтральный резистор; 2 – трехфазный источник напряжения; 3 – симистор; 4 – ДЗЦ; 5 – нелинейный ограничитель перенапряжений; 6 – симисторный блок

Наряду с симисторами в качестве высоковольтного ключа перспективно применение управляемого вакуумного разрядника (РВУ) [8] с соответствующими цепями запуска. Однако область устойчивых разрядных токов современных РВУ начинается приблизительно с 80 А [9], что накладывает ограничение на их использование в сетях с малыми ЕТЗЗ.

Оценим энергию, выделяемую в нейтральном резисторе при его импульсном заземлении и при постоянном подключении к контуру заземления. Примем $K_r = 1$, тогда постоянная времени убыви напряжения нулевой последовательности при неустойчивых замыканиях равна $\tau = 1/\omega$. Относительная энергия в заземляющем резисторе с некоторым условным сопротивлением $R_N = 1$ Ом, выделяемая в течение полупериода промышленной частоты π/ω после самогашения заземляющей дуги, равна

$$E_{ИРЗ} = \int_0^{\pi/\omega} (U_{N0} e^{-\omega t})^2 dt = \frac{U_{N0}^2 (1 - e^{-2\pi})}{2\omega} \approx \frac{U_{N0}^2}{2\omega},$$

где U_{N0} – начальное по отношению к фазному максимальному значению ($U_{ф.м}$) напряжение на нейтрали сети после самогашения заземляющей дуги.

Относительная энергия, выделяемая при устойчивом («металлическом») замыкании на землю, при напряжении в сети $U_{ф.м} = 1$ отн.ед. и постоянно включенном заземляющем резисторе, очевидно, равна

$$E_R = \int_0^{\pi/\omega} \sin^2(\omega t) dt = \pi/2\omega,$$

а соотношение энергий

$$\frac{E_{ИРЗ}}{E_R} = \frac{U_{N0}^2}{\pi}.$$

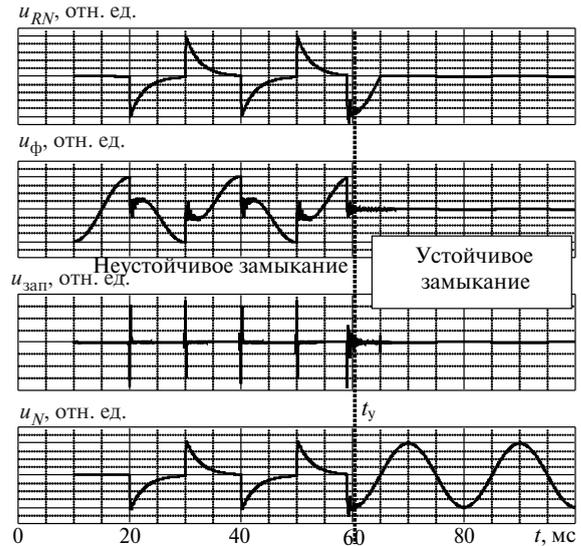


Рис. 6. Напряжение на нейтральном резисторе, поврежденной фазе, запускающее напряжение и напряжение в нейтрали сети с ИРЗ (фрагменты устойчивого и неустойчивого замыканий)

Максимальное (начальное) напряжение на нейтрали сети, определяемое напряжениями на неповрежденных фазах после самогашения заземляющей дуги при первичном пробое и первом переходе высокочастотной (перезарядной) составляющей тока замыкания через нулевое значение, оценивается без учета затухания как

$$U_{N0} = \frac{2}{3} \left[1,5U_{ф.м} + U_{ф.м} \frac{C_{\phi}}{C_{\phi} + C_{\phi\phi}} \right]$$

и для типичных соотношений $C_{\phi\phi}/C_{\phi} = 0,25 \div 0,3$ равно $U_{N0} = 1,51 \div 1,53$ отн. ед.

Приблизительно принимая $U_{N0} = 1,5$ отн.ед., отношение энергий $E_{ИРЗ}/E_R = 0,72$, т.е. рассеиваемая в нейтральном резисторе мощность, как минимум, на 28% меньше, чем при его постоянном подключении к нейтрали сети.

В реальных сетях из-за потерь как в самой сети, так и в канале заземляющей дуги *среднее начальное смещение напряжения* на нейтрали сети заметно меньше указанного ранее максимального: оно составляет для кабельных сетей приблизительно $U_{N0} \approx 1$ отн. ед. [10], часто снижаясь по мере увеличения длительности горения дуги. Поэтому требуемая мощность заземляющего резистора R_N при импульсном заземлении нейтрали электрической сети составляет лишь ~32% по отношению к мощности, требуемой при его постоянном включении.

На рис. 6 приведены расчетные осциллограммы, полученные компьютерным моделированием переходного процесса однофазного замыкания на землю с использованием [11] при неустойчивом и устойчивом замыканиях на землю в электрической сети, оснащенной симисторным устройством ИРЗ. После гашения заземляющей дуги в момент прохо-

ждения тока замыкания через нулевое значение происходит быстрый рост напряжения на нейтрали электрической сети u_N , поэтому формируется достаточное запускающее напряжение $u_{зап}$, открывающее симисторный ключ. Возникающий и протекающий в заземляющем резисторе R_N ток приводит к экспоненциальному снижению напряжения на нейтрали сети u_N . После установления устойчивого замыкания начиная с момента времени t_y напряжение в нейтрали имеет форму, близкую к синусоидальной, ключ запирается, сеть переходит в режим изолированной нейтрали, напряжение к нейтральному резистору (u_{RN}) не прикладывается и ток замыкания определяется только его емкостной составляющей.

Выводы. 1. Разработанный для распределительных сетей среднего напряжения импульсно-резистивный способ заземления нейтрали исключает протекание активного тока в месте замыкания в установившемся режиме. Это позволяет повысить электробезопасность сети, снизить разрушающее воздействие заземляющей дуги на изоляцию и оборудование, снизить требование к мощности нейтрального резистора и потери электроэнергии в режиме устойчивого замыкания.

2. Работоспособность ИРЗ, ограниченная значением производной на нейтрали сети, сохраняется для широкого спектра параметров сетей. Для подавляющего большинства сетей выполняется условие $du_N / dt_{max} \gg du_{N-} / dt$.

3. В качестве высоковольтного ключа, подключающего нейтральный резистор к контуру заземления, перспективно применение управляемого вакуумного разрядника. Однако из-за малых разрядных токов современных РВУ, минимальное значение которых приближается к 80 А, не обеспечивается их стабильный запуск, поэтому требуется разработка специализированных разрядников, ориентированных на малые коммутируемые токи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. — М.: Энергия, 1971, 152 с.

2. Патент РФ № 2454769. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/В.Е. Качесов. — БИ, 2012, № 18.

3. Патент на полезную модель РФ № 117738. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/В.Е. Качесов, А.Е. Петухов. — БИ, 2012, № 18.

4. Peters I.E., Slepian J. Voltage Induced by Arcing Ground. — Tr. AIEE, 1923, Apr., p. 478.

5. Патент РФ № 2222026. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания в распределительных сетях/В.Е. Качесов. — БИ, 2004, № 2.

6. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением. — Электричество, 2005, № 6, с. 9–19.

7. Bogdasheva L.V., Kachesov V.E. Parametric On-line Fault Location Methods for Distribution MV Networks. — Proc. of IEEE PowerTech'05. St.Petersburg, 27–30 June, 2005, Paper 159.

8. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А. и др. Применение управляемых вакуумных разрядников в высоковольтном быстродействующем защитном устройстве. — Приборы и техника эксперимента, 2004, №3, с. 94–101.

9. Качесов В.Е., Петухов А.Е., Финашин Р.А. Исследование управляемых вакуумных разрядников для импульсного резистивного заземления нейтрали. — Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации, 2015, №3, с. 28–32.

10. Kachesov V.E., Larionov V.N., Ovsyannikov A.G. Overvoltage monitoring for single-phase arc-to-ground failures in distribution cable networks. — Power Technology and Engineering, 2002, vol. 36, No. 4.

11. Banzhaf W. Computer aided circuit analysis using SPICE. — Prentice Hall, 1989.

[29.08.2017]

А в т о р ы: Качесов Владимир Егорович окончил в 1981 г. Новосибирский электротехнический институт (ныне Новосибирский государственный технический университет). В 2008 г. в Томском политехническом университете защитил докторскую диссертацию «Однофазные повреждения в электрических сетях среднего и высокого классов напряжения. Теория, методы исследований и меры предотвращения повреждений». Ведущий специалист ООО НПП «ЭНЕРГОКОНСАЛТ». Профессор Новосибирского государственного технического университета.

Финашин Роман Андреевич — Магистрант Новосибирского государственного технического университета.

Pulse-resistive Neutral Grounding in Distribution Networks

KACHESOV Vladimir Ye. (Scientific and production enterprise «ENERGONSALT», Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

FINASHIN Roman A. (NSTU, Novosibirsk, Russia)—Master of Science

For distribution network a method of pulse-resistive grounding is proposed. Resistive grounding is automatically executed only during intermittent earth-to-ground faults when the neutral voltage derivative is high enough. Parameters of the majority of electrical distribution networks are such that the neutral

voltage derivative at steady-state ground fault is much smaller than at intermittent one ($du_N / dt_{\max} \gg du_{N\sim} / dt$). This feature allow effectively to manage the mode of resistive grounding of network neutral and eliminate the disadvantages of direct resistive grounding caused by the higher fault current of industrial frequency.

Key words: *distribution networks, ground faults, method of neutral grounding*

REFERENCES

1. **Likhachev F.A.** *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu i kompensatsiy eimkostnykh tokov* (Earth-faults in Networks with the Insulated Neutral and Compensation of Capacitive Currents). Moscow, Publ. «Energiya», 1971, 152 p.
2. **Patent RF № 2454769.** *Ustroystvo zazemleniya neutrali trekhfaznoi elektricheskoi seti* (Grounding the Neutral of Three-phase Electric Network)/V.Ye. Kachesov. Bulletin of inventions, 2012, No. 18.
3. **Patent RF napoleznuyu model No. 117738.** *Ustroystvo zazemleniya neutrali trekhfaznoi elektricheskoi seti* (Utility patent RF No. 117738, Grounding the Neutral of Three-phase Electric Network)/V.Ye.Kachesov, A.Ye. Petukhov. Bulletin of Inventions, 2012, No. 18.
4. **Peters I.E., Slepian J.** Voltage Induced by Arcing Ground. — Tr. AIEE, 1923, Apr., p. 478.
5. **Patent RF № 2222026.** *Sposob opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'nykh setyakh* (Mrthod for Determining the Distance to the Single-Phase Closure in Distribution Networks). Bulletin of Inventions, 2004, No. 2.
6. **Kachesov V.Ye.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2005, No. 6, pp. 9–19.
7. **Bogdasheva L.V., Kachesov V.E.** Parametric On-line Fault Location Methods for Distribution MV Networks. — Proc. of IEEE PowerTech'05 St.Petersburg, 27–30 June, 2005, Paper 159.
8. **Alferov D.F., Matveyev N.V., Sidorov V.A. et al.** *Pribory i tekhnika eksperimenta in Russ. (Instruments and Experimental Techniques)*, 2004, No. 3, pp. 94 – 101.
9. **Kachesov V.Ye., Petukhov A.Ye., Finashin R.A.** *Operativnoye upravleniye v elektroenergetike: podgotovka personala i podderzhaniye ego kvalifikatsii – in Russ. (An Operational Management in the Electric Power Industry)*, 2015, No. 3, pp. 28–32.
10. **Kachesov V.E., Larionov V.N., Ovsyannikov A.G.** Overvoltage monitoring for single-phase arc-to-ground failures in distribution cable networks. — Power Technology and Engineering, 2002, vol. 36, No. 4.
11. **Banzhaf W.** Computer aided circuit analysis using SPICE. — Printice Hall, 1989.

[29.08.2017]