

УДК 621.316

Сивокобыленко В.Ф.¹, Лебедев В.К.²

ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ РЕЗИСТОРА ДЛЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6-35 КВ

Рассмотрены достоинства и недостатки сетей с резистивно-заземленной нейтралью. Предложено подключение резисторов к обмоткам низшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора, соединенным в разомкнутый треугольник. Изложена методика выбора параметров трансформатора и низковольтного резистора с учетом параметров сети и требуемого уровня ограничения перенапряжений, а также предотвращения феррорезонансных процессов, представляющих опасность для оборудования.

Введение

Электрические сети напряжением 6-35 кВ получили широкое распространение и относятся к сетям, работающим с изолированной нейтралью. Наиболее частым видом повреждения в этих сетях являются металлические или дуговые однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые сопровождаются перенапряжениями, достигающих уровня $(3,5-4,0)U_{\phi}$; феррорезонансными процессами; переходом ОЗЗ в междуфазные короткие замыкания; повреждениями трансформаторов напряжения и неселективными отключениями потребителей релейной защитой. Поэтому в настоящее время актуальным является разработка способов повышения надежности работы такого типа сетей.

Состояние вопроса

Для повышения надежности работы сетей с изолированной нейтралью, в зависимости от величины напряжения сети, при емкостных токах замыкания на землю свыше 10-30 А применяется заземление нейтрали через индуктивное сопротивление для компенсации емкостных токов [1]. Для сетей с токами замыкания меньше указанных, в последнее время применяют заземление нейтрали сети через активное сопротивление.

Так, например, в сети собственных нужд 6 кВ тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электрических станций согласно [2] требуется заземление нейтрали сети через низкоомный резистор величиной 100 Ом, который подключается к нейтрали специального трансформатора ТСНЗ-63/10 мощностью 63 кВА. Установка такого резистора согласно [2] увеличивает токи замыкания на землю, что обеспечивает селективную работу релейной защиты, которая действует на отключение поврежденного присоединения. Однако с целью снижения термического действия дуги и повышения термостойкости самого резистора, в [3] рекомендуется применение высокоомных резисторов величиной 1000-2000 Ом. К положительным сторонам установки резисторов относятся снижение уровня перенапряжений до $(2,2-2,5)U_{\phi}$, предотвращение возникновения феррорезонансных процессов и повышение четкости действия релейной защиты. Первоначально в качестве заземляющих резисторов использовались стеклоэпоксидные бетэловые резисторы, к недостаткам которых относятся громоздкость конструкции и ограниченная термическая стойкость, что не позволяло широко их использовать в системах электроснабжения ответственных потребителей. В настоящее время Новосибирским предприятием «ППП Болид» разработаны и выпускаются резисторы из материала «Эком» (электропроводящий композиционный материал - керамика с электропроводящими добавками), которые имеют повышенную термостойкость и могут длительно (до 6 ч) оставаться в работе при однофазных замыканиях на землю. Однако недостатком таких резисторов является высокая стоимость, громоздкость конструкции, сложность монтажа и наладки. В связи с изложенным, акту-

¹ Донецкий национальный технический университет, д-р техн. наук., проф.

² Донецкий национальный технический университет, канд. техн. наук., доц.

альным является дальнейшее совершенствование способа увеличения активной составляющей тока замыкания на землю, не требующего установки высоковольтных резисторов.

Целью работы является обоснование возможности установки резисторов со стороны, соединенных в разомкнутый треугольник, обмоток низшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора.

Результаты исследований

В электрических сетях 6-35 кВ, которые могут длительно работать с замыканием фазы на землю, нейтралеобразующий трансформатор выбирают с номинальным фазным напряжением первичных обмоток, равным линейному напряжению сети, а нейтраль обмоток высшего напряжения заземляют через резистор (рис.1).

При решении вопросов, связанных с подключением резистора с помощью нейтралеобразующего трансформатора, необходимо выбрать соответствующий трансформатор, величину резистора, его мощность и способ подключения.

В настоящее время Московским электрозаводом для сетей 6 кВ серийно выпускается специальный сухой трансформатор для заземления нейтрали типа ТСНЗ-63/10 с номинальным напряжением 10 кВ и мощностью 63 кВА, с группой соединения обмоток звезда с нулевым выводом-треугольник. При этом линейные концы обмоток низшего напряжения не выводят, так как трансформатор не рассчитан на подключение нагрузки, а только на подключение резистора к нейтрали обмоток высшего напряжения. Следует отметить, что данный трансформатор используется, в основном, только в сетях 6 кВ собственных нужд электростанций для заземления нейтрали через резистор величиной порядка 100 Ом. Для других же систем электроснабжения необходимо определить требуемую мощность нейтралеобразующего трансформатора с учетом реальных параметров сети и подключаемого резистора. Для этих целей могут быть использованы, при незначительной реконструкции, обычные сухие или масляные серийно выпускаемые трансформаторы, нейтраль обмоток высшего напряжения которых не имеет вывода. Реконструкция трансформаторов заключается в том, что дополнительно устанавливается вывод для нейтрали обмоток высшего напряжения, который заземляют через резистор.

При возникновении дугового замыкания в сети с изолированной нейтралью и погасании дуги в момент перехода через “ноль” высокочастотной составляющей, заряженные емкости сети не имеют пути разряда, что и является причиной возникновения перенапряжений величиной до $(3-4)U_{\phi}$ при повторных зажиганиях дуги. Включение резистора в нейтраль разряжает емкость сети, что предотвращает процесс накопления зарядов на ней и возможность появления больших перенапряжений.

Высоковольтный резистор должен также предотвращать возникновение феррорезонансного процесса в сети при перемежающемся характере горения дуги. Эти процессы могут возникать при высокой степени намагничивания магнитопроводов трансформаторов напряжения, имеющих заземленную нейтраль, через индуктивность обмоток которых стекает емкостной заряд после погасания дуги. Насыщение магнитопроводов трансформаторов могут возникнуть, если энергия, запасенная в емкостях сети к моменту погасания дуги (W_C), окажется больше электромагнитной энергии (W_L), запасенной в индуктивностях указанных выше трансформаторов. Другими словами, если на емкости остается заряд, величина которого достаточна для высокой степени насыще-

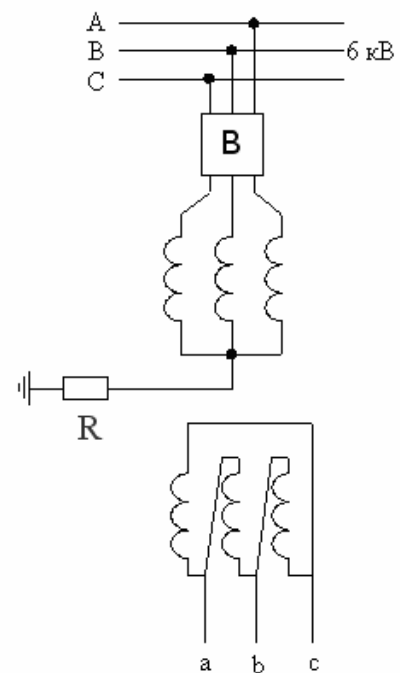


Рис. 1 – Схема подключения резистора к нейтрали обмоток высшего напряжения трансформатора

ния магнитопровода трансформатора при разряде емкости на землю через одну из обмоток, то в сети возникает феррорезонансный процесс:

$$W_C > W_L \text{ или } \frac{C \cdot U^2}{2} > \frac{L \cdot I^2}{2},$$

где C - емкость сети; U - величина напряжения при погасании дуги; L - индуктивность трансформатора, через который стекает заряд; I - величина тока разряда емкостей сети.

Насыщение магнитопровода можно предотвратить, если разряд емкости после погасания дуги протекает за время менее полупериода промышленной частоты сети (0,01 с). Зная, что процесс затухания емкости через резистор должен произойти за 3,6 постоянной времени разряда емкости, величину резистора можно определить как:

$$R \leq 0,01 \cdot (3,6 \cdot C)^{-1}. \quad (1)$$

Мощность, на которую должен быть рассчитан резистор, а также и трансформатор, находим из условия

$$P \geq R \cdot (3 \cdot U_\phi \cdot \omega \cdot C)^2. \quad (2)$$

При этом следует иметь в виду, что активная составляющая тока замыкания на землю, обусловленная сопротивлением резистора, не должна превышать величину емкостного тока сети. Уровень перенапряжений в сети тем выше, чем больше сопротивление резистора и мощность трансформатора. Поэтому не следует принимать мощность трансформатора слишком завышенной.

Такого же уровня токи нулевой последовательности в первичной сети, как и в схеме на рис. 1, можно получить, если подключить резистор к низковольтным обмоткам трансформатора, соединенным в разомкнутый треугольник, а нейтраль обмоток высшего напряжения заземлить (рис. 2).

Использование схемы (рис. 2) не требует установки громоздкого высоковольтного резистора, а позволяет использовать серийно выпускаемые проволочные фехралевые резисторы, имеющие относительно низкую стоимость, малые габариты и выполняющие те же функции, что и высоковольтный резистор в схеме рис. 1. Реконструкция серийно выпускаемых трансформаторов при этом состоит в дополнительном выводе нулевого соединения звезды обмоток высшего напряжения. Обмотки низшего напряжения пересоединяют в разомкнутый треугольник, используя те же выводы.

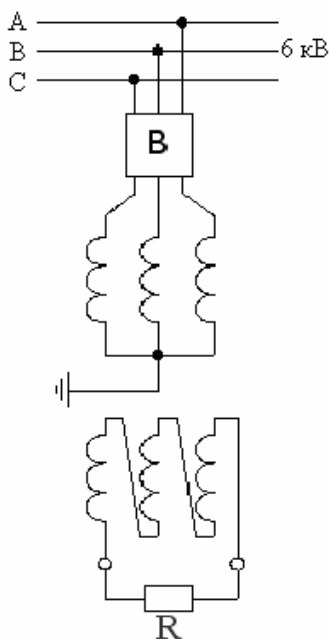


Рис. 2 – Схема подключения резистора в разомкнутый треугольник обмоток низшего напряжения трансформатора

Рассмотрим эквивалентность схем (рис. 1, рис. 2) с точки зрения значений токов нулевой последовательности в первичной цепи для выбранных по (1), (2) присоединительного трансформатора и резистора. Для схемы (рис. 1), при собранных в треугольник обмотках низшего напряжения, расчетная схема замещения показана на рис. 3, параметры которой определяются по известным соотношениям.

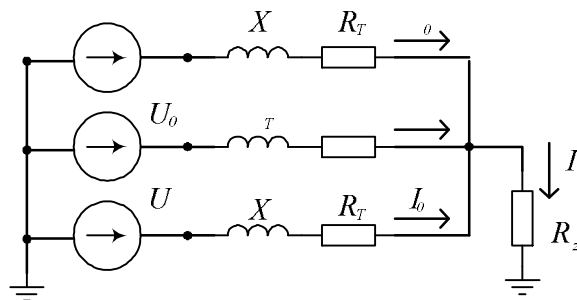


Рис. 3 – Расчетная схема замещения при подключении резистора к нейтрали обмоток высшего напряжения трансформатора

Сопротивления фазы нейтралеобразующего трансформатора определяем по известным номинальным мощности, токе, напряжении, а также напряжению и потерям короткого замыкания:

$$R_T = \frac{P_{к.з}}{3 \cdot I_H^2}; \quad X_T = \frac{Uk\%}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H}. \quad (3)$$

Коэффициент трансформации, при соединении обмоток высшего напряжения в звезду, а низшего в треугольник, рассчитывается следующим образом:

$$K_T = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}}. \quad (4)$$

При установке резистора в нейтрали обмотки высшего напряжения (рис. 1), ток в цепи высоковольтного резистора будет равен:

$$I_Z = \frac{U_0}{\frac{1}{3} \cdot R_T + j \cdot \frac{1}{3} \cdot X_T + R_Z} = \frac{3 \cdot U_0}{(R_T + 3 \cdot R_Z) + j \cdot X_T}, \quad (5)$$

где U_0 -напряжение нулевой последовательности, равное номинальному фазному напряжению обмотки высшего напряжения.

Величина активной мощности, поглощаемая высоковольтным резистором, равна:

$$P_Z = |I_Z|^2 \cdot R_Z, \quad (6)$$

Падение напряжения на высоковольтном резисторе составит:

$$\Delta U_Z = I_Z \cdot R_Z. \quad (7)$$

При установке резистора в цепи разомкнутого треугольника обмоток низшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора (рис. 2), схема замещения для определения тока нулевой последовательности имеет вид (рис. 4):

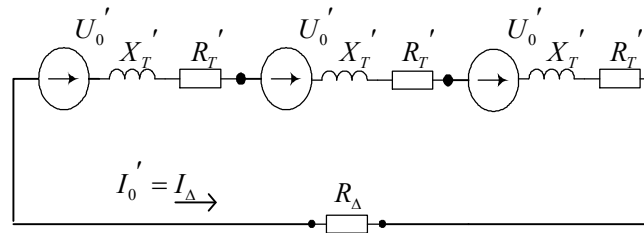


Рис. 4 – Эквивалентная схема замещения при подключении резистора в разомкнутый треугольник обмоток низшего напряжения

Параметры этой схемы замещения, приведенные к номинальному напряжению низшей стороны, определяются по следующим соотношениям:

$$U'_0 = K_T^{-1} \cdot U_0; \quad R'_T = R_T \cdot K_T^{-2}; \quad X'_T = X_T \cdot K_T^{-2}. \quad (8)$$

При установке резистора в цепи разомкнутого треугольника обмоток низшего напряжения трансформатора (рис. 4) запишем выражение для тока в его цепи:

$$I'_0 = I_\Delta = \frac{3 \cdot U'_0}{3 \cdot R'_T + j \cdot 3 \cdot X'_T + R_\Delta}. \quad (9)$$

Величину резистора в треугольнике обмоток низшего напряжения R_Δ (рис. 4), найдем из условия равенства, с учетом коэффициента трансформации, токов в одноименных фазах обмоток высшего и низшего напряжений. Тогда, используя (5) и (9), получим

$$R_\Delta = \frac{9 \cdot R_Z}{K_T^2}. \quad (10)$$

Величину активной мощности низковольтного резистора определяем как:

$$P_\Delta = |I'_0|^2 \cdot R_\Delta. \quad (11)$$

Падение напряжения на низковольтном резисторе составит:

$$\Delta U_\Delta = I'_0 \cdot R_\Delta. \quad (12)$$

Для примера приведем результаты расчетов схемных параметров при использовании в качестве нейтралеобразующего трансформатора ТСНЗ-63/10 ($S_n = 63$ кВА, $U_{нв} = 10,5$ кВ, $U_{нн} = 0,4$ кВ, $U_k = 5.5\%$, $P_{xx} = 500$ Вт, $P_{кз} = 1450$ Вт, $I_n = 3,5$ А).

Параметры схемы замещения (рис. 1, 3), рассчитанные по (3)-(5), составили:

$$U_0 = 3640 \text{ В}; R_T = 39,5 \text{ Ом}; R_T = 96 \text{ Ом}; K_T = 15,2;$$

Параметры схемы замещения (рис. 2, 4), найденные с учетом (8), составили:

$$U_0' = 239 \text{ В}; R_T' = 0,171 \text{ Ом}; X_T' = 0,416 \text{ Ом}.$$

Для схем электроснабжения с различными емкостными токами были найдены параметры резисторов для разных схем их включения (рис. 1 или рис. 2) по соотношениям (1)-(12). Расчетные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов параметров при ОЗЗ для разных схемах подключения резистора

№ п.п.	Величина резистора в нейтрали ВН, R_z , Ом	Величина резистора в треугольнике обмоток НН, R_{Δ} , Ом	Модуль тока в нейтрали обмоток ВН, А	Модуль тока в треугольнике обмоток НН, А	Активная мощность резисторов, кВт	Напряжение на резисторе в нейтрали ВН, В	Напряжение на резисторе в треугольнике НН, В
1	100	3,9	30,9	162	102	3093	632
2	200	7,8	16,9	86	58	3375	672
3	400	15,6	8,8	44,6	31	3511	695
4	500	19,5	7,07	35,9	25	3537	699
5	700	27,3	5,1	25,8	18,2	3567	705
6	1000	39	3,6	18,2	12,9	3588	709
7	1100	42,9	3,3	16,6	11,7	3593	709
8	1300	50,6	2,8	14,0	9,97	3600	711
9	1500	58	2,4	12	8,7	3605	711
10	1700	66	2,1	10,7	7,6	3609	712
11	2000	78	1,8	9,1	6,5	3613	713

По методике, изложенной в [4], были получены расчетные осциллограммы возникновения и погасания дуги при различных величинах заземляющего резистора, включенного по схемам рис. 1, рис. 2. Расчетные осциллограммы приведены на рис. 5, 6, на которых показаны напряжения нулевой последовательности и поврежденной фазы, а также токи в месте замыкания на землю.

Как видно из рис. 5, при значении высоковольтного резистора 100 кОм в нейтрали трансформатора или эквивалентного ему резистора 3,9 кОм в цепи разомкнутого треугольника, напряжение нулевой последовательности затухает за время порядка 0,2 с, что при повторном ОЗЗ может вызвать значительные перенапряжения и феррорезонансный процесс.

При включении же резисторов соответственно величиной 1000 Ом для схемы рис.1 и 39 Ом для схемы рис. 2 затухание напряжения нулевой последовательности при исчезновении ОЗЗ (рис. 6) происходит за требуемое время, составляющее 0,01 с.

Таким образом результатами расчетов стационарных режимов и математическим моделированием однофазных замыканий фазы на землю подтверждена возможность и целесообразность использования низковольтного резисторного заземления нейтрали сети, что требует меньших затрат при той же технической эффективности.

Выводы

1. Для повышения надежности работы сетей 6-35 кВ целесообразно применять резисторное заземление нейтрали сети с использованием специальных нейтралеобразующих трансформаторов, что позволяет снизить уровень перенапряжений при замыканиях фазы на землю и предотвратить возникновение феррорезонансных процессов, вызывающих повреждения трансформаторов напряжения и неселективную работу защит.

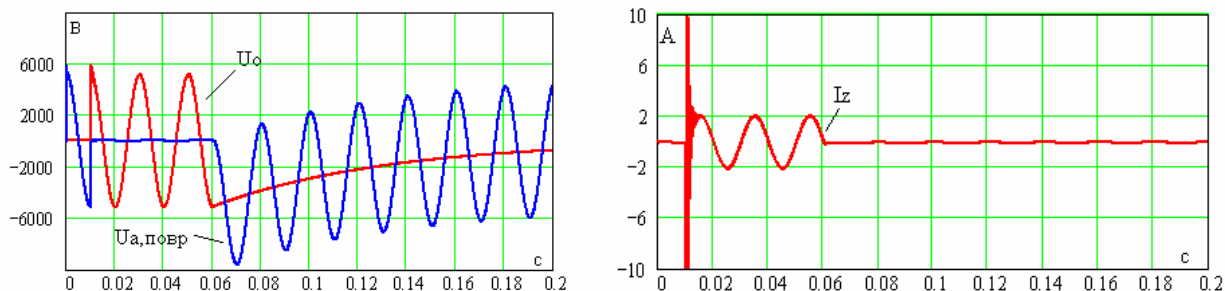


Рис. 5 – Осциллограмма напряжений и токов при возникновении и отключении ОЗЗ при неоптимальной величине резистора

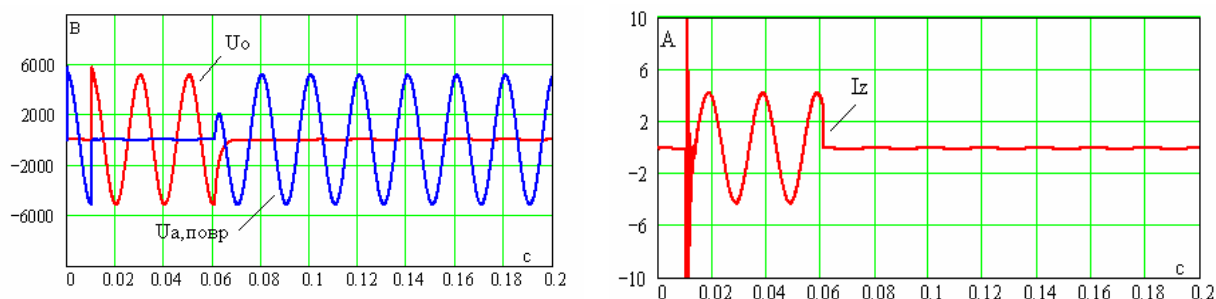


Рис. 6 – Осциллограмма напряжений и токов при возникновении и отключении ОЗЗ при оптимальной величине резистора

2. Высоковольтное резисторное заземление сети требует установки громоздких, дорогостоящих и термически малостойких бетэловых или выполненных из композиционных материалов резисторов, поэтому, более целесообразной, является установка фехральных или проволочных резисторов в цепь разомкнутого треугольника обмоток низшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора.

3. Изложена методика выбора мощности параметров нейтралеобразующих трансформаторов и дополнительных резисторов, включаемых в цепь разомкнутого треугольника обмоток низшего напряжения с учетом параметров сети.

4. Показана возможность использования серийно выпускаемых сухих или масляных трансформаторов в качестве нейтралеобразующих путем незначительной реконструкции.

5. Результатами математического моделирования подтверждена эффективность применения низковольтного резисторного заземления нейтралей сетей напряжением 6-35 кВ.

Перечень ссылок

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
2. Циркуляр Ц-01-88. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС. – М., 1988. – 7с.
3. Евдокунин Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов. – Электричество, 1998. – №12. – С. 8-22.
4. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев: Учебное пособие. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 136с.

Рецензент: И.В. Жежеленко
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 25.03.2008