

Ассоциации электроснабжения городов России «Прогрессэлектро».

2. Технические требования к построению опорной сети 20 кВ г. Москвы ОАО «Объединённая энергетическая компания», утверждённые ОАО «ОЭК» 18.10.2011 г.

3. Методические указания по применению в ОАО «Московская объединённая электросетевая компания» основных технических решений по эксплуатации, реконструкции и новому строительству электросетевых объектов, утверждённые приказом ОАО «МОЭСК» от 04.07.2014 г. № 723.

4. Регламент организации ОАО «ОЭК» по способам подключения, обслуживанию и ремонту устройств заземления нейтрали электрических сетей 20 кВ, утверждённый 15.08.2014 г.

5. *IEEE Standard 142—2007. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, 2007.*

6. *IEEE Standard 32—1972 (Reaffirmed 1997) Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices, 1997.*

7. *EDF HN-64-S-50. Resistances metalliques monophasées, destinées, a la mise a la terre du neutre des reseaux a moyenne tension. Specification D'Enterprise. — Electricity De France/Centre de Normalisation, Fevrier 1988. P. 13.*

8. *ГОСТ Р 52719—2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007.*

9. *ГОСТ Р 54827—2011 (МЭК 60076-11:2004). Трансформаторы сухие. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2013.*

10. *Ефимов Ю. К., Шилов В. И., Шишкина О. Г. Опыт эксплуатации сетей собственных нужд блоков 500 МВт с заземлением через резистор // Электрические станции. 1992. № 5.*

11. *Ho C. Y., Chu T. K. Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Nine Selected AISI Stainless Steels (Prepared for AISI) // Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis (CINDAS). Report 45. 1977. P. 53.*

12. *ГОСТ 8024—90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1990.*

13. *Правила устройства электроустановок. 7 изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.*

14. *Патент РФ № 2289172. МПК H01B 1/18. Состав для композиционного электропроводного материала / Л. И. Сарин, Н. Г. Царегородцев, В. М. Копылов // Бюл. Изобретения. 2006. № 34.*

15. *ГОСТ 15543.1—89. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам. — М.: Изд-во стандартов, 1990.*

Ограничение тока однофазного короткого замыкания в четырёхпроводной электрической сети 22 кВ во Вьетнаме

ВАСИЛЬЕВА А. Ю., ЕМЕЛЬЯНОВ Н. И., канд. техн. наук

КОЧУРА Д. В., ООО «Болид»

630015, г. Новосибирск, Электrozаводской пр., д. 1; nio_bolid@ngs.ru

ВЬЕТ Н. К., департамент науки, технологий и окружающей среды,

Viet Nam Electricity, Вьетнам, г. Ханой; КУАН Н. Х., Dong Anh Electrical

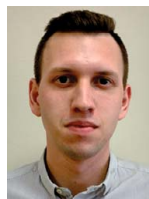
Equipment Manufacturing Corporation, Вьетнам, г. Хошимин



А. Ю. Васильева



Н. И. Емельянов



Д. В. Кочура



Н. К. Вьет



Н. Х. Куан

Представлено эффективное решение по ограничению токов короткого замыкания (КЗ) и как следствие повышению надёжности работы распределительных сетей напряжением 6 – 35 кВ с нулевым проводом. Это установка активного сопротивления в нулевой провод. Последний технически целесообразно выбирать согласно критериям эффективного ограничения токов КЗ и минимальному ограничению мощности однофазной нагрузки. При этом конструкция резистора должна обеспечивать допустимую по термической стойкости длительно рассеиваемую мощность, обусловленную током несимметрии в нормальном режиме, и кратковременно рассеиваемую мощность в режиме КЗ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: четырёхпроводная сеть, смешанная однофазно-трёхфазная нагрузка, резистор для заземления нейтрали, ток короткого замыкания.

В настоящее время в России и странах ближнего зарубежья наблюдается устойчивая тенденция к частичному пересмотру режимов заземления нейтрали электроустановок 6 – 35 кВ. В частности, предлагается исключить режим изолированной нейтрали и внедрять в эксплуатацию режимы заземления нейтрали через активное сопротивление (резистивное заземление), через параллельно подключённые дугогасящий реактор и резистор (комбинированное заземление нейтрали). Указанные режимы применяются в трёхфазных сетях, для которых изменение способа заземления нейтрали решающим образом влияет на перенапряжения при дуговых замыканиях на землю, а также определяет способ выполнения селективной защиты от замыканий на землю [1].

В ряде стран (США, Австралии, Канаде, Испании, Вьетнаме) используемый режим глухого заземления нейтрали применяется в том числе в четырёхпроводных сетях среднего напряжения 4 – 25 кВ. Концепция построения сетей с нулевым проводом заключается в возможности организации электроснабжения путём подключения не только к линейному, но и фазному напряжению [2]. Токи однофазного замыкания в таких сетях достигают десятков килоампер. В рамках данного исследования ставится задача ограничения токов однофазного замыкания в четырёхпроводных сетях

среднего напряжения при смешанной трёхфазно-однофазной нагрузке.

Четырёхпроводные сети со смешанной нагрузкой

Четырёхпроводные сети среднего класса напряжения — частный случай электрических цепей, нешироко распространённый в современной электроэнергетике. В отличие от трёхпроводных цепей, в которые, как правило, можно включать только симметричные приёмники, трёхфазные четырёхпроводные сети могут иметь смешанную нагрузку. Выбор режима работы нейтрали в таких сетях определяется комплексом требований: экономической эффективностью, надёжностью электроснабжения и электробезопасности.

За рубежом в сетях среднего класса напряжения система распределения электрической энергии по четырёхпроводным сетям применяется в городах, на промышленных объектах и в сельской местности. Сети электроснабжения в сельской местности характеризуются меньшей плотностью электрической нагрузки. В них при трёхфазном распределении электроэнергии к мелким потребителям приходится подключать три провода сети, что приводит к повышенному расходу цветного металла.

Для устранения отмеченных недостатков применяется смешанная трёхфазно-однофазная система распределения электроэнергии. При этом достигается значительное удешевление электроустановки

в целом вследствие применения меньшего числа трансформаторов, меньшего сечения проводов и пр. Сущность смешанной системы распределения электроэнергии заключается в следующем.

К основным трёхфазным линиям подключаются крупные (в том числе силовые) потребители. Мелкие же потребители (освещение, бытовая нагрузка и пр.) получают электропитание от однофазных ответвлений линий с использованием однофазных трансформаторных пунктов небольшой мощности. Применение трёхфазно-однофазного распределения нагрузки позволяет улучшить технико-экономические показатели сети электроснабжения за счёт приближения к потребителю точки понижения напряжения.

Соотношение между однофазной и трёхфазной мощностями в сети высокого напряжения зависит от характера нагрузки и условий её размещения. Для большинства сельских районов однофазные линии высокого напряжения получили распространение преимущественно на окраинах крупных селений с преобладающей нагрузкой в виде жилых домов, а также в качестве ответвлений к отдельным небольшим населённым пунктам, где не предусматривается в ближайшее время развитие промышленного электропотребления.

Токи короткого замыкания (ТКЗ) в четырёхпроводных сетях со смешанной нагрузкой

В мощных электроустановках и питаемых ими электросетях протекание ТКЗ обуславливает увеличение потерь электроэнергии в проводниках и контактах, что вызывает их повышенный нагрев. Как следствие, происходит ускоренное старение, приводящее к разрушению изоляции, а также сваривание и выгорание контактов, потеря механической прочности шин и проводов и пр.

Протекание ТКЗ сопровождается также значительными электродинамическими усилиями между проводниками. В связи с этим электрооборудование

электрических станций и подстанций, а также сечения кабелей электросети выбираются по условиям нормального режима и устойчивости работы при коротких замыканиях (КЗ).

Применение электрооборудования и кабелей, рассчитанных на большие ТКЗ, приводит к значительному увеличению затрат на сооружение электроустановок, а в некоторых случаях оказывается невозможным или весьма затруднительным. Поэтому в мощных электроустановках принимают искусственные меры ограничения ТКЗ, чем достигается возможное использование менее мощного электрооборудования, шин и кабелей меньшего сечения. Выбор способа ограничения ТКЗ определяется условиями эксплуатации сети и подкрепляется технико-экономическим обоснованием.

Меры снижения воздействия ТКЗ:

- установка токоограничивающих реакторов;
- распараллеливание электрических цепей, секционирование;
- использование понижающих трансформаторов с расщеплённой обмоткой низкого напряжения;
- применение быстродействующих коммутационных аппаратов с функцией ограничения ТКЗ (плавких предохранителей и автоматических выключателей);
- внедрение устройств релейной защиты с действием на отключение повреждённого участка с минимальной выдержкой времени.

Таким образом, основу сохранения «живучести» энергосистемы составляет идея снижения ТКЗ за счёт увеличения сопротивления цепи КЗ или уменьшения времени воздействия ТКЗ на сеть. В рамках данного исследования поставлена задача оценки эффективности использования дополнительного сопротивления в нулевом проводе с целью ограничения ТКЗ.

Для этого может быть использовано подключение индуктивного или активного сопротивления. Существенное влияние на процессы при КЗ оказывает относитель-

ное содержание апериодической составляющей отключаемого тока, регламентируемое нормативно-технической документацией. Аперриодическая составляющая зависит от многих факторов, в частности, от момента возникновения КЗ. Характер сопротивления, которое находится в цепи КЗ, определяет течение переходного процесса (степень затухания аперриодической составляющей). Эта составляющая затухает тем быстрее, чем больше активное и чем меньше индуктивное сопротивление цепи [3].

На примере действующей энергосистемы предлагается оценить значение активного сопротивления, необходимого для ограничения ТКЗ до приемлемого для эксплуатации сети значения.

Ограничение ТКЗ в действующей энергосистеме

Рассматривается четырёхпроводная сеть 22 кВ ПС «Binh An» энергосистемы Южного Вьетнама с трёхфазно-однофазной системой распределения нагрузки. Исходные данные для выполнения расчётных исследований по ограничению ТКЗ в сети 22 кВ предоставлены Государственной энергетической корпорацией Вьетнама (Electricity of Vietnam).

В указанной сети в режиме глухозаземлённой нейтралью ток однофазного КЗ составляет 17 кА, плотность нагрузки довольно высокая. Для электроснабжения потребителей используются трёхфазные и однофазные трансформаторы, связь которых с центром питания осуществляется через кабельно-воздушные линии электропередачи. В нормальном режиме питающие трансформаторы нагружены на 30 % (19 МВ · А). Суммарная мощность однофазной нагрузки в рассматриваемой сети 22 кВ не превышает 1,4 МВ · А, при этом распределение нагрузки по фазам носит вероятностный характер. В нулевом проводе протекает ток несимметрии от 20 до 60 А, что обусловлено непостоянством однофазных нагрузок.

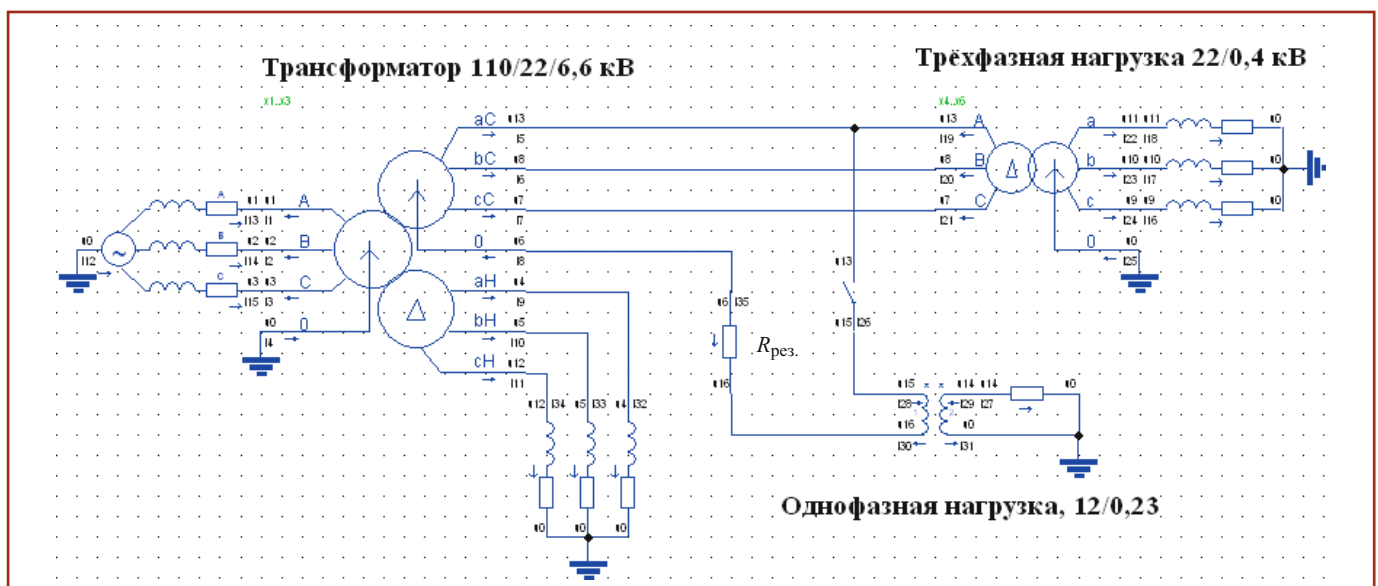


Рис. 1. Расчётная схема (компьютерная модель) сети 22 кВ

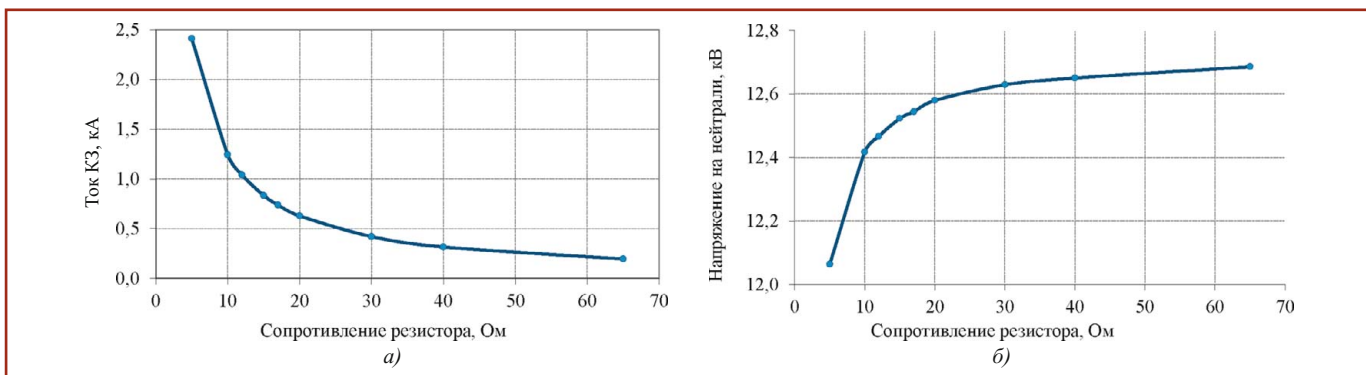


Рис. 2. Зависимости ТКЗ (а) и напряжения нейтрали (б) от сопротивления резистора

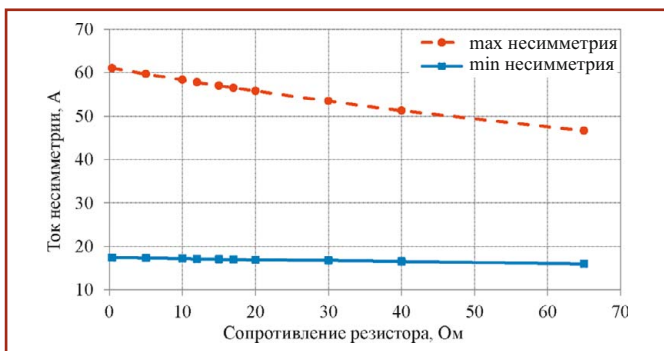


Рис. 3. Зависимость тока несимметрии в нейтральном проводе от активного сопротивления

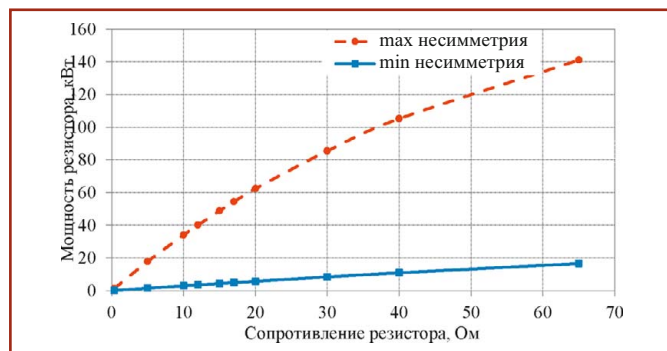


Рис. 4. Зависимость мощности подключаемого в нейтральный провод резистора от его сопротивления в сети 22 кВ

Появление несимметрии в любой сети приводит к дополнительным потерям мощности и энергии, ухудшая режимы и технико-экономические показатели её работы. В целях снижения несимметрии в сети технически оправдано мощность однофазных потребителей, подключённых в трёхфазную сеть, распределять по фазам равномерно. Данное решение в большинстве случаев не может быть реализовано, поскольку изменение нагрузки, как упоминалось ранее, носит случайный характер.

С помощью специализированного программного расчётного комплекса МАЭС смоделирована упрощённая расчётная схема сети 22 кВ (рис. 1). В исходных параметрах моделирования использованы данные действующей сети: однофазная нагрузка варьируется в диапазоне 0,2 – 0,7 МВ · А, что позволяет учесть возможную степень несимметрии режима. При моделировании выбор параметров схемы сети выполнен таким образом, чтобы обеспечить соответствие реально существующему режиму. При этом приняты следующие допущения:

- однофазная нагрузка представлена активным сопротивлением, поскольку реактивное несоизмеримо мало;
- параметры воздушно-кабельной линии не учитываются, так как сопротивление линий значительно меньше сопротивления понижающих трансформаторов.

Расчётные исследования

Режим однофазного КЗ при симметричной нагрузке

В качестве способа ограничения ТКЗ в сети 22 кВ рассматривается увеличение активного сопротивления цепи КЗ. С помощью расчётов в режиме эксплуатации сети 22 кВ с глухозаземлённой нейтралью определено действующее значение тока однофазного КЗ, которое составило

$I^{(1)} = 16,7$ кА. Учёт сопротивления заземляющего устройства подстанции, равного 0,36 Ом, приводит к снижению этого тока на 18,3 % до $I^{(1)} = 13,64$ кА. При этом напряжение на нейтрали 22 кВ равно $U_N = 4,91$ кВ (38,7 % фазного напряжения сети $U_\phi = 12,7$ кВ) (табл. 1).

Полученные значения ТКЗ значительны и могут снижать срок службы электрооборудования, в связи с чем требуется их ограничение. При этом активное сопротивление технически целесообразно выбирать с учётом следующих факторов:

- минимального ограничения тока однофазной нагрузки, в цепь протекания которого фактически включается резистор;
- ограничения ТКЗ до 1 кА, что обусловлено требованиями существующего

Таблица 1

Сопротивление резистора в нейтрали сети 22 кВ R_N , Ом	0,36*	5	10	12	15	17	20	30	40	65
Ток КЗ $I^{(1)}$, кА	13,64	2,41	1,24	1,04	0,83	0,74	0,63	0,42	0,32	0,20
Напряжение нейтрали U_N , кВ	4,91	12,06	12,42	12,47	12,52	12,54	12,58	12,63	12,65	12,69

* Сопротивление контура заземления заземляющего устройства подстанции $R_{3у}$.

Таблица 2

Мощность однофазной нагрузки, кВ · А	Токи в фазах, А			Ток несимметрии $I_{нс}$, А
	I_A	I_B	I_C	
200	598,9	582,7	583,0	17,4
300	583,0	606,9	582,2	26,1
400	582,2	582,9	614,9	34,9
500	622,9	581,9	582,9	43,4
700	583,3	639,4	581,4	61,1

Таблица 3

R_N , Ом	$I_{нс}$, А	U_N , кВ	$U_{1 \text{ ф.нагр.}}$, кВ	$I_{1 \text{ ф.нагр.}}$, А
0,36	17,39/61,02	0,01/0,02	12,71/12,68	17,39/60,81
5	17,32/59,68	0,09/0,30	12,64/12,40	17,25/59,40
10	17,18/58,34	0,17/0,58	12,54/12,13	17,18/57,98
20	16,90/55,79	0,34/1,12	12,38/11,59	16,95/55,15
30	16,76/53,46	0,50/1,60	12,21/11,11	16,73/53,03
40	16,55/51,27	0,66/2,05	12,06/10,66	16,50/50,91
65	15,98/46,60	1,04/3,03	11,68/9,68	15,98/46,67



Рис. 5. Общий вид резистора сопротивлением 10 Ом в четырёхпроводной сети 22 кВ ПС «Binh An»

ющей релейной защиты от замыканий на землю.

Включение любого резистора в нейтраль сети приводит к росту напряжения в ней, а значит и напряжений на неповреждённых фазах при однофазном КЗ. В частности, при включении резистора 10 Ом напряжение нейтрали составляет $U_N = 12,42$ кВ (97,8 % фазного напряжения сети $U_{\text{ф}} = 12,7$ кВ), а напряжения неповреждённых фаз близки к линейному $U_{\text{в,с}} = 21,0 \div 22,3$ кВ. Графическая интерпретация полученных результатов влияния активного сопротивления на уровень ТКЗ (рис. 2, а) и напряжения нейтрали в сети 22 кВ ПС «Binh An» (рис. 2, б).

Анализируя полученные результаты для четырёхпроводной сети в режиме несимметричной однофазно-трёхфазной нагрузки, можно сформулировать следующее: для ограничения ТКЗ до 1,24 кА (меньше в 11 раз относительно $I^{(1)} = 13,64$ кА при известном сопротивлении $R_{\text{ЗУ}} = 0,36$ Ом) целесообразно заземлять нейтраль сети 22 кВ через резистор номинальным сопротивлением 10 Ом.

Режим однофазного КЗ при несимметричной нагрузке

В нормальном режиме эксплуатации сети 22 кВ ПС «Binh An» неравномерность подключённой однофазной нагрузки с током несимметрии 20 – 60 А моделируется разной мощностью однофазных трансформаторов 12/0,23 кВ, близкой к эксплуатационным показателям режима несимметричной однофазной нагрузки сети (табл. 2). Результаты оценки влияния сопротивления резистора в нейтрали сети 22 кВ на токи и напряжения в узлах подключения однофазной нагрузки ($U_{1\text{ ф,нагр}} / I_{1\text{ ф,нагр}}$), а также напряжение нейтрали в режимах эксплуатации с максимальной (в числителе) и минимальной (в знаменателе) несимметрией показаны в табл. 3 (рис. 3). Под минимальной несимметрией принято понимать наличие однофаз-

ной нагрузки эквивалентной мощностью 200 кВ · А, под максимальной — 700 кВ · А.

Таким образом, сопротивление резистора, равное 10 Ом, оптимально с точки зрения ограничения токов однофазного КЗ в сети 22 кВ до значения 1,24 кА (требование релейной защиты от замыканий на землю) в режимах симметричной и несимметричной нагрузок. Включение его в нулевой провод в режиме с несимметричной однофазной нагрузкой не приводит к существенному ограничению тока несимметрии и как следствие, не ограничивает мощность однофазной нагрузки (в режиме с максимальной несимметрией снижение тока в нагрузке составляет не более 5 % по сравнению с режимом глухозаземлённой нейтрали).

Теоретически возможный вариант ограничения ТКЗ в четырёхпроводной сети 22 кВ — включение в нейтральный провод индуктивного сопротивления (реактора). Расчётное индуктивное сопротивление 10 Ом обеспечить затруднительно, так как реакторы с указанным номинальным параметром сопротивления серийно не выпускаются.

Особенности конструкции резистора в нулевом проводе

В нормальном режиме работы четырёхпроводной сети 22 кВ наличие тока несимметрии в нейтральном проводе, обусловленного непостоянством однофазной нагрузки, приводит к нагреву резистора. Зависимость длительной мощности резистора от его сопротивления (рис. 4) позволяет оценить величину мощности, которая должна быть рассеяна с поверхности резистора в нормальном режиме при наибольшем и наименьшем значениях тока несимметрии в нейтральном проводе.

Специалистами ООО «Болид» разработана конструкция резистора сопротив-

лением 10 Ом с учётом возможности рассеивания тепловой энергии при длительном пропускании тока несимметрии 60 А. Расчётная мощность резистора 10 Ом в режиме максимальной несимметрии составляет 36 кВт, что допустимо с точки зрения нагрева элементов конструкции резистора и его естественного охлаждения в тропических условиях эксплуатации.

Опыт эксплуатации

Резистор сопротивлением 10 Ом производства ООО «Болид» установлен в сети 22 кВ ПС «Binh An» и введён в эксплуатацию в декабре 2014 г. (рис. 5). На сегодняшний день эксплуатационным персоналом подстанции подтверждён положительный эффект от реализованного технического решения. Резистор работает стабильно и эффективно ограничивает ТКЗ. Температура на поверхности в нормальном режиме не превышает 50 – 60 °С, значение тока несимметрии составляет 8 – 10 А с кратковременными (несколько часов) повышениями до 25 – 30 А. Потери электроэнергии в резисторе — 20 ÷ 60 кВт · ч в сутки.

Выводы

1. Выбор режима работы нейтрали в четырёхпроводных сетях определяется комплексом требований: экономической эффективности, надёжности электрооборудования и электробезопасности.

2. Вопрос ограничения ТКЗ в четырёхпроводных сетях может быть успешно решён установкой активного сопротивления в нулевом проводе.

3. Оптимальное значение активного сопротивления должно быть выбрано на основе комплекса расчётов с учётом следующих требований:

- незначительного ограничения мощности однофазной нагрузки (т. е. тока небаланса, вызванного неравномерной по фазам 22 кВ однофазной нагрузкой);
- существенного ограничения тока однофазного КЗ (в 10 – 15 раз) для снижения его термического и электродинамического воздействия на коммутационное, трансформаторное и проводниковое электрооборудование;
- обеспечения допустимой по термической стойкости длительно рассеиваемой мощности резистора в нормальном режиме с несимметричной нагрузкой и кратковременно рассеиваемой мощности в режиме однофазного КЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов Н. И., Ширковец А. И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6 – 35 кВ // Энергоэксперт. 2010. № 2.
2. Учебный элемент. Электроустановкам необходимо обеспечить электробезопасность // Новости электротехники. 2001. № 4(10).
3. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору оборудования. РД 153-34.0-20.527-98. — М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002.