



Автор:

Ширковец А.И.,

ООО «Болид»,
г. Новосибирск, Россия.

Shirkovets A.I.,

BOLID LLC,
Novosibirsk, Russia.

Abstract:

The paper clarifies the classification of single phase-to-ground faults. Ground fault characteristics for a half-year period are analyzed for the operational 6 kV cable network of the opencast mine where a lot of electromagnetic voltage transformers are installed. Based on experimental oscillograms and field experience, engineering evaluation of ferroresonance danger is made with respect to the portion of capacitive current per one voltage transformer and

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СЕТИ К ФЕРРОРЕЗОНАНСУ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИИ АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ

УДК 621.311

CLASSIFICATION OF SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULTS AND ESTIMATION OF NETWORK STABILITY TO FERRORESONANCE CONDITIONS BASED ON RESULTS OF EMERGENCY EVENT REGISTRATION

Аннотация: в представленной статье обоснована задача и показаны способы классификации видов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Проанализированы характеристики ОЗЗ за полугодовой период регистрации для действующей кабельной сети 6 кВ электроснабжения карьера, отличающейся большим количеством трансформаторов напряжения (ТН) электромагнитного типа. На основе натуральных осциллограмм и опыта эксплуатации сделана инженерная оценка опасности возникновения феррорезонансных процессов (ФРП) в зависимости от доли емкостного тока сети в расчете на один ТН и времени затухания нелинейного процесса после погасания заземляющей дуги. Отмечены меры борьбы с феррорезонансом и обеспечения пожаробезопасности ТН в режимах длительных замыканий на землю. Определена линейная зависимость, позволяющая оценить сопротивление цепи замыкания на землю в кабельной сети при устойчивых ОЗЗ, характеризующихся ненулевым значением напряжения на поврежденной фазе.

Ключевые слова: классификация видов замыканий на землю, устойчивость к феррорезонансу, регистрация аварийных событий, кабельная сеть, трансформаторы напряжения.

to the decay time of non-linear process after arc extinction. Methods of ferroresonance elimination and fire safety at continuous ground faults are presented. Linear dependence for cable ground fault impedance evaluation at continuous single phase-to-ground faults which are characterized by non-zero voltage on a faulty phase is determined.

Keywords:

Classification of phase-to-ground faults, stability to ferroresonance conditions, registration of emergency events, cable network, voltage transformers.

Задача классификации однофазных замыканий на землю

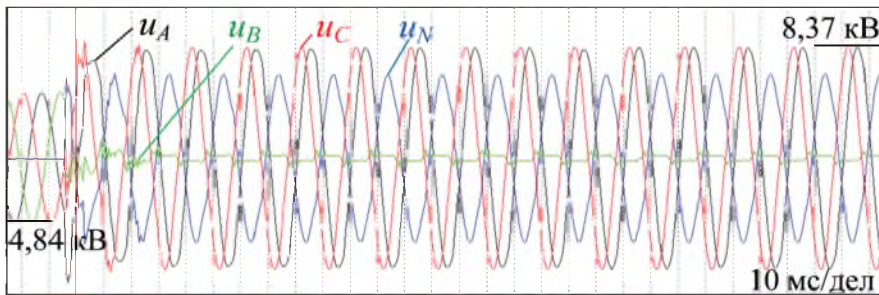
Многообразие видов замыканий на землю обуславливает необходимость их классификации по какому-либо характерному признаку. Одним из таких признаков можно считать длительность бестоковой паузы Δt , которая зависит от напряжения пробоя $u_{\text{ПР}}$ и соотношения скоростей восстановления напряжения на поврежденной фазе $du_{\text{ВОССТ}}/dt$ и роста электрической прочности дугового промежутка $de_{\text{ПР}}/dt$. Эти скорости являются функциями отношения активного и емкостного тока I_R/I_C , а также, при наличии дугогасящего реактора, уровня расстройки компенсации v .

Перебегающие дуги характеризуются значениями $\Delta t = 10-40$ мс. За это время потенциал изолированной нейтрали не успевает снизиться до значения, близкого к нулю. Прерывистой дуга считается, если $\Delta t = 160-200$ мс и более [1]. Указанное деление является условным, поскольку в условиях эксплуатации

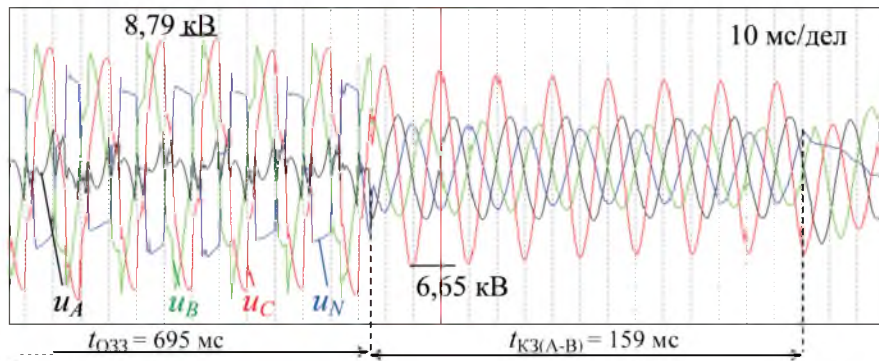
действующих кабельных сетей 6-35 кВ наблюдается большой разброс Δt , обусловленный случайностью момента пробоя и соответствующим случайным сочетанием влияющих параметров $u_{\text{ПР}}$, $du_{\text{ВОССТ}}/dt$ и $de_{\text{ПР}}/dt$, I_R/I_C , v .

Длительность горения дуги $t_{\text{ДУГ}}$ в единичном пробое также можно рассматривать как характерный признак, отличающийся для перемежающихся / прерывистых ($t_{\text{ДУГ}} = 1-10$ мс) и устойчивых ($t_{\text{ДУГ}} > 20$ мс) дуговых ОЗЗ. В то же время устойчивые замыкания в кабельной сети могут отличаться по признаку «глубины просадки» напряжения поврежденной фазы $u_{\text{ПОВР}} \neq 0$ за счет сопротивления в цепи замыкания [2] и, соответственно, сопротивления в месте повреждения Z_3 . Такие замыкания приводят, как правило, к электрическому пробоею междуфазной изоляции и аварийному отключению фидера.

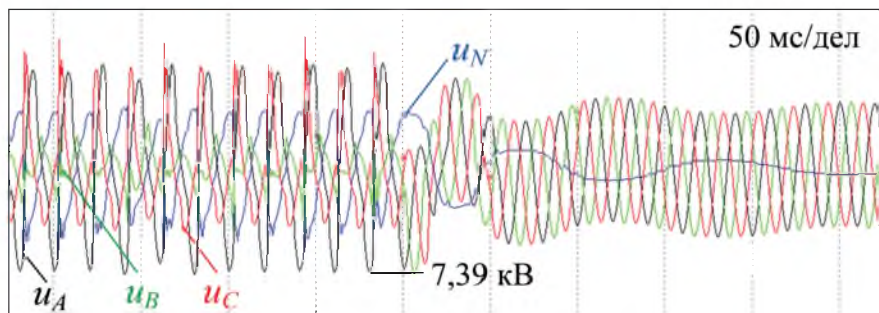
Наличие и длительность нелинейных колебаний фазных напряжений после обрыва тока ОЗЗ, в свою очередь, является косвенной



а)



б)



в)

Рис. 1. Натурные осциллограммы фазных напряжений при дуговых ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью, $I_{OЗЗ} 50 \text{ Гц} = 12 - 14 \text{ А}$:

- а) устойчивое дуговое замыкание длительностью $t_{OЗЗ} > 15 \text{ с}$; $U_{ПОВР} \neq 0$;
- б) перемежающееся дуговое ОЗЗ переходит в двухфазное КЗ, отключенное защитой;
- в) перемежающееся дуговое ОЗЗ $t_{OЗЗ} = 13,9 \text{ с}$, после устранения – затухающий ФРП длительностью $t_{ФРП} = 340 \text{ мс}$

Табл. 1. Общие характеристики ОЗЗ в сети 6 кВ карьера с оценкой опасности возникновения феррорезонанса

Сеть 6 кВ	Общее количество ОЗЗ	Минимальная длительность ОЗЗ, мс	Максимальная длительность ОЗЗ, мс	Длительность ФРП, с	Опасность ФРП
1	32	66,0	658	0,37	средняя
2	52	2,00	$91,5 \cdot 10^3$	0,22	средняя
3	44	20,0	1047	1163	высокая
4	62	30,0	$61 \cdot 10^4$	0,45	средняя

характеристикой устойчивости схемы сети к феррорезонансу, которая для разных режимов эксплуатации может существенно отличаться. Условия возбуждения феррорезонансных процессов определяются в зависимости от текущего значения I_C , количества и типов измерительных трансформаторов напряжения в электрически связанной сети и режима заземления ее нейтрали, строгое описание указанных условий представлено в [3]. Феррорезонансные колебания в сети с ТН электромагнитного типа, сопровождающиеся насыщением их сердечников, способны привести к неселективному срабатыванию защиты и веерному отключению фидеров. Возможно также срабатывание защиты ввода с последующим отключением поврежденной секции.

Характеристики замыканий на землю и устойчивость сети к феррорезонансу

Для получения одного из вариантов реального распределения видов замыканий на землю в эксплуатируемой кабельной сети проведем краткий анализ осциллограмм с регистраторов «Парма», установленных для записи аварийных процессов в сетях двух центров питания (четыре секции 6 кВ) с распределительными пунктами, от которых запитаны электроприводы карьерных потребителей – станки, буровые механизмы, экскаваторы и т.д. Рассматриваемая сеть 6 кВ выполнена преимущественно кабелями с резиновой и бумажно-масляной пропитанной изоляцией. На каждую секцию 6 кВ приходится от 6 до 12 ТН типа НТМИ-6-66, НТМК-6.

Зарегистрированные осциллограммы отличаются большим разнообразием, поэтому в качестве иллюстрации процессов ОЗЗ приведем лишь некоторые из них (рис. 1).

Характеристики ОЗЗ, полученные по результатам анализа натурных осциллограмм с регистратора за полугодовой период, сведены в табл. 1. Невысокая частота дискретизации регистраторов «Парма», не превышающая



1 кГц на канал, не позволяет корректно оценить уровни перенапряжений, поскольку характерные частоты переходного процесса ОЗЗ могут достигать 5-50 кГц.

Анализ большого количества натурных осциллограмм позволяет сделать следующую инженерную оценку: $t_{\text{ФРП}} < 80-100$ мс при условии самозатухания нелинейного процесса и доле емкостного тока сети $I_{C-1ТН} > (2,5-3,0)$ А в расчете на один ТН электромагнитного типа характеризует неопасную по условию возбуждения устойчивого ФРП сеть. В рассматриваемой схеме соотношение составляет $I_{C-1ТН}=1-2$ А, при этом в сети секции (3) были зарегистрированы частые устойчивые ФРП, наибольшей длительностью $t_{\text{ФРП}} > 19$ мин (1163 с), что представляет опасность для ТН электромагнитного типа из-за протекающих в первичных обмотках сверхтоков с бросками $I > 1$ А. Допустимые по условию термической стойкости токи не превышают 0,1-0,3 А [3], поэтому длительные ФРП могут приводить к каскадному повреждению ТН.

На секциях (1), (2) и (4) в 20-25% случаев дуговых ОЗЗ наблюдались неустойчивые самозатухающие колебания $t_{\text{ФРП}} < 0,5$ с, опасность нелинейного резонанса оценена как «средняя». Для еще шести секций трех центров питания 6 кВ, которые не рассматриваются подробно в настоящем исследовании, доля емкостного тока на один ТН составила 0,37-1,38 А. В этих сетях также были отмечены случаи устойчивого длительного ФРП, подтвержденные расчетами.

Однако оперативный персонал цеха электроснабжения в течение рассматриваемого срока регистрации не отмечал проблем с явным повреждением или нарушением работы шинных ТН 6 кВ, что обусловлено следующими факторами. Во-первых, ТН с масляной изоляцией, в том числе эксплуатируемые НТМИ-6 и НТМК-6, вероятно, способны до нескольких минут выдерживать протекание ненормированных токов по первичным обмоткам. Это можно связать с низким энергетическим воздействием бросков первич-

ного тока (особенно при неустойчивом дуговом ОЗЗ и затухающем ФРП) на фоне хорошего теплоотвода, который обеспечивает масляная изоляция. Во-вторых, несмотря на возможность возникновения группового ФРП в сети промышленного предприятия с большим количеством ТН, реальные режимы работы такой сети связаны с коммутациями электроприводных нагрузок и соответствующим изменением условий насыщения заземленных шунтов намагничивания. С большой вероятностью это приводит к срыву нелинейных колебаний, возникающих между циклами «зажигание-погасание» заземляющей дуги, и способствуют облегчению условий эксплуатации масляных ТН.

Задача обеспечения их пожаробезопасности может быть решена за счет применения новых типов синтетических жидких диэлектриков пониженной горючести (например, FR3™, Midel 7131), которые сегодня активно используются при производстве силового электрооборудования в Великобритании, США, Канаде, Японии [4].

Влияние антирезонансных ТН на переходный процесс замыкания на землю

Любые виды ФРП чреваты развитием аварийных ситуаций в сети, когда за счет квазистационарных перенапряжений возможны многоместные и междофазные пробой изоляции кабельных линий, электродвигателей, реакторов, а также повреждение самих трансформаторов напряжения.

Отключение коротких замыканий в сетях 6-10 кВ, в том числе каскадное отключение фидеров, срывает условия ФРП и в ряде случаев «спасает» ТН. Это справедливо для сетей с изолированной нейтралью. В сети с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали повреждения ТН не наблюдаются, поскольку условий возникновения феррорезонансных явлений при этом не создается. Поэтому замена в таких сетях стандартных ТН, не вызывающих нареканий в эксплуатации, на антирезонансные может быть обоснова-

на только лучшими метрологическими характеристиками и более низкой стоимостью последних.

Влияние стандартных электромагнитных ТН на процесс развития дугового ОЗЗ известно: через эти ТН с заземленной первичной обмоткой фазы «В» обеспечивается стекание избыточного заряда с нейтрали в бестоковые паузы, для сети с изолированной нейтралью это основной путь стекания таких зарядов. В сетях с изолированной нейтралью, где в определенных режимах эксплуатации выполняются условия устойчивого или неустойчивого ФРП, имеют место нелинейные колебания фазных напряжений и напряжения на нейтрали после погасания дуги либо отключения устойчивого ОЗЗ с квазистационарными перенапряжениями до (1,8-2,0) $U_{\text{ФМАХ}}$ и длительностью от 80-100 мс до 0,3-0,5 с, реже до нескольких минут. Это повышает вероятность повторных пробоев изоляции кабеля с соответствующим снижением длительности бестоковых пауз. Кроме того, насыщение ТН может приводить к появлению дополнительных гармонических искажений тока ОЗЗ, что ухудшает условия гашения заземляющей дуги [5].

В качестве мер борьбы с ФРП в сетях 6-35 кВ в настоящее время используются резистивное и комбинированное заземление нейтрали; внедрение антирезонансных ТН типа НАМИ, (3)НАМИТ, ЗНОЛ-СЭЩ, НАЛИ-СЭЩ, ЗНОЛ.06 (ЗНОЛП); включение низковольтного резистора 25 Ом в схему «разомкнутого треугольника» вторичной обмотки ТН. Следует отметить, что последняя из указанных мер приводит к росту сопротивления ветви намагничивания при насыщении, поэтому она эффективна лишь в случае очень малых емкостей сети на землю ($I_C \leq 0,013$ А) и «не работает» при несимметрии кривых намагничивания ТН по фазам порядка 20% [6].

Насыщение антирезонансных ТН в режимах дуговых ОЗЗ не происходит, что обеспечивается специальной конструкцией этих трансформаторов [6, 7]. При оснащении сетей такими



ТН появления нелинейных колебаний частотой 16-25 Гц в бестоковые паузы ОЗЗ и соответствующего роста перенапряжений ожидать не приходится (если в рассматриваемой сети нет стандартных ТН). Тогда можно заключить, что антирезонансные ТН «благоприятствуют» естественному затуханию переходного процесса после погасания дуги и не ухудшают условий восстановления электрической прочности в бестоковые паузы, поскольку не влияют на напряжение пробоя. В остальном через заземленную обмотку таких ТН также происходит стекание избыточного заряда.

Хотя сами антирезонансные ТН, как правило, не повреждаются при феррорезонансных процессах, условия возникновения нелинейного резонанса они не ликвидируют. Поэтому проблема защиты изоляции силового оборудования, в том числе стандартных ТН электромагнитного типа, изношенных кабельных линий, электродвигателей, особенно в разветвленных сетях промышленных предприятий, остае-

ся острой даже при частичном оснащении сети антирезонансными ТН. Кроме того, повреждение антирезонансных ТН при длительных дуговых замыканиях на землю в сети не исключается полностью [6]. Как было указано выше, обеспечить пожаробезопасность ТН в таких режимах возможно за счет использования негорючих жидких диэлектриков с улучшенными электрофизическими характеристиками при обеспечении их биологической разлагаемости и минимального токсического воздействия.

Классификация замыканий на землю по критерию устойчивости горения дуги

Детальный анализ 246 осциллограмм для сети четырех секций 6 кВ (1-4) за полугодовой период регистрации с точки зрения аварийности показал, что в рассматриваемой сети зафиксировано $n_{ОЗЗ\Sigma} = 190$, из которых 17 (8,95%) перешли в двухфазные и трехфазные КЗ с отключением фидеров 6 кВ. Исследование $t_{ДУГ}$, Δt , характера ОЗЗ (перемежающее-

ся, устойчивое) и его развития (самопогасание дуги, прожигание междуфазной изоляции), наличия и устойчивости ФРП позволило провести классификацию ОЗЗ с указанием их параметров для рассматриваемой сети 6 кВ (табл. 2).

В рассматриваемых сетях 6 кВ из $n_{ОЗЗ\Sigma} = 190$ зарегистрированных случаев замыканий на землю 25,8% ($n_{ОЗЗ} = 49$) характеризуются условно малым сопротивлением цепи замыкания, о чем можно судить по напряжению поврежденной фазы в режиме замыкания: $u_{ПОВР} \leq 0,1u_{\Phi}$, и могут продолжаться от 1,5-5,1 периодов до 24-34 периодов 50 Гц. Наибольшая длительность $t_{ОЗЗ} = 610$ с такого вида замыканий отмечена всего в одном случае и связана, вероятно, с горением заземляющей дуги в резиновой изоляции однофазного кабеля.

Как удаленные замыкания на землю либо замыкания через большие сопротивления цепи замыкания, при условии $u_{ПОВР} = (0,22-0,86)u_{\Phi}$, классифицированы 54,7% ($n_{ОЗЗ} = 104$) из всех зарегистрированных ОЗЗ. Ненулевое напряжение аварийно заземленной фазы обусловлено следующими факторами:

а) включение в цепь протекания тока ОЗЗ от места повреждения до шин секции сопротивлений оболочек кабелей (гибкие питающие кабели шагающих экскаваторов зачастую эксплуатируются с поврежденной оболочкой);

б) повышенное относительно нормы 10 Ом сопротивление заземляющего устройства, например, за счет недостаточной проводимости карьерных грунтов;

в) сопротивление дугового канала пробоя изоляции фазы на землю.

Известные для текущего режима эксплуатации значения $I_C = 12-14$ А каждой секции 6 кВ позволяют оценить сопротивление цепи протекания тока замыкания на землю при устойчивом горении дуги как $Z_3 \approx U_{ПОВР}/I_C$. Тогда для $U_{\Phi} = 3,46$ кВ получим $Z_3[u_{ПОВР} = 0,1u_{\Phi}] = 24,7-28,9$ Ом; $Z_3[u_{ПОВР} = (0,22-0,86)u_{\Phi}]_{12A} = 63,5-248,3$ Ом; $Z_3[u_{ПОВР} = (0,22-0,86)u_{\Phi}]_{14A} = 54,4-212,8$ Ом. Оценка Z_3 для рассматриваемой сети 6 кВ в диапазоне $u_{ПОВР}/u_{\Phi} = 0-1$ приведена на рис. 2. Можно показать, что

Табл. 2. Классификация ОЗЗ в сетях 6 кВ карьера по результатам длительной регистрации с осциллографированием фазных напряжений

Сеть 6 кВ	Устойчивые, $u_{ПОВР} \leq 0,1u_{\Phi}$		Устойчивые, $u_{ПОВР} > 0,1u_{\Phi}$		Перемежающиеся дуговые		С переходом в междуфазные КЗ	
	$n_{ОЗЗ}$	$t_{ОЗЗ}, \text{мс}$	$n_{ОЗЗ}$	$u_{ПОВР}/u_{\Phi}$	$n_{ОЗЗ}$	$t_{ОЗЗ}, \text{мс}$	$n_{ОЗЗ}$	$t_{ОЗЗ}, \text{мс}$
1	9	103-480	17	0,33-0,86	2	147-219	4	66,0-658
2	6	48,0-685	39	0,38-0,80	2	115-91,5·10 ³	5	2,00-168
3	15	46,0-617	19	0,45-0,84	6	20,0-1047	4	140-340
4	19	30,0-61·10 ⁴	29	0,22-0,61	10	39,0-15·10 ³	4	200-3700

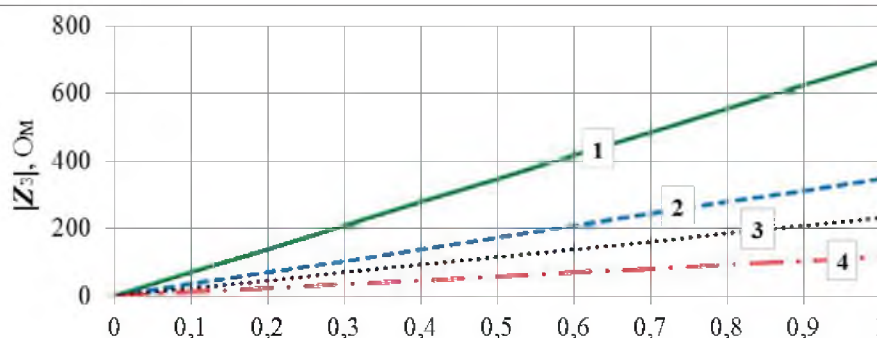


Рис. 2. Инженерная оценка сопротивления цепи протекания тока замыкания в режиме устойчивого горения заземляющей дуги при ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ для емкостных токов 5 (1), 10 (2), 15 (3), 30 А (4)



Ширковец

Андрей Игоревич

Дата рождения: 06.09.1983 г.

Окончил в 2006 г. Новоси-

бирский государственный

технический университет

(НГТУ), кафедру «Техника

электрофизика высоких

напряжений».

В настоящее время — соискатель

ученой степени кандидата

технических наук (НГТУ).

ведущий инженер научно-ис-

следовательского отдела

ООО «Болд».

учет токов активной проводимости изоляции $I_G = (0,05-0,10)I_C$ приведет к снижению Z_3 не более чем на 0,5%.

Нижнее значение тока $I_C = 5$ А принято из условия разгрузки секции, $I_C = 10-15$ А – межсекционный выключатель 6 кВ отключен, $I_C = 30$ А – межсекционный выключатель 6 кВ включен, секции объединены. Приведенная линейная зависимость позволяет оценить сопротивление цепи замыкания Z_3 при устойчивых ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ, характеризующихся ненулевым значением напряжения $U_{ПОВ}$ на поврежденной фазе.

Выводы

1. Многообразие видов замыканий на землю обуславливает необходимость и возможность их классификации по одному или нескольким характерным признакам: длительности бестоковых пауз, времени горения дуги, наличию и длительности нелинейных колебаний фазных напряжений после обрыва тока ОЗЗ, факту перехода ОЗЗ в междуфазные КЗ.

2. Представлена классификация и характеристики ОЗЗ для реальной кабельной сети 6 кВ электроснабжения карьера. На основании результатов длительной регистрации переходных процессов обработано 190 случаев ОЗЗ, из которых перемежающиеся дуговые ОЗЗ составили 10,5%, устойчивые – 80,5%; 17 (8,95%) перешли в двухфазные и трехфазные КЗ с отключением фидеров 6 кВ. На трех секциях 6 кВ в 20-25% случаев дуговых ОЗЗ наблюдались нелинейные самозатухающие колебания длительностью до 0,5 с. В одном случае имел место устойчивый феррорезонанс длительностью более 19 мин, не приведший к повреждению ТН.

3. Анализ большого количества натуральных осциллограмм показал, что длительность феррорезонанса, доходящая до 80-100 мс, при условии самозатухания нелинейного процесса и доле емкостного тока сети более 2,5-3,0 А в расчете на один ТН электромагнитного типа, характеризует неопасную по условиям возбуждения устойчивого феррорезонанса схему сети.

4. Масляные трансформаторы напряжения, по сравнению с измерительными ТН с литой изоляцией, обеспечивают лучшие условия теплоотвода при протекании сверхтоков в их первичных обмотках, что снижает вероятность их повреждения в режимах длительной горения перемежающейся дуги. Задача

обеспечения пожаробезопасности стандартных и антирезонансных ТН может быть решена за счет применения экологичных и нетоксичных жидких синтетических диэлектриков пониженной горючести, широкое внедрение которых пока ограничивается их высокой стоимостью.

5. Внедрение антирезонансных трансформаторов напряжения приводит к снижению влияния этих элементов схемы на процесс и результат развития дуговых ОЗЗ. Для сетей с резистивным и комбинированным заземлением нейтрали применение антирезонансных ТН актуально только при условии их лучших, по сравнению с функционально аналогичными стандартными ТН, метрологических характеристик и более привлекательной стоимости.

Литература

1. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Влияние электрической дуги на направленные защиты // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1(37). – С. 35-38.
2. Барановская М.Л. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью // Вестник Криворожского техн. ун-та, вып. 28. 2011 – С. 3-6.
3. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
4. Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком. Возможности увеличения нагрузочной способности, срока службы, предельной рабочей температуры трансформаторов с органическим охлаждающим маслом «FR3™» [Электронный ресурс] // Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Силовые, распределительные трансформаторы и реакторы. Системы диагностики». Москва, 19-20 июня 2012 г. Режим доступа – <http://www.energo-info.ru/2011-11-08-20-23-16/2012-09-05-07-06-45/22238-2012-09-06-16-28-18.html>
5. Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – №04 (ноябрь) – С. 54-59.
6. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Лаптев О.И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с.
7. Лавров Ю.А., Лаптев О.И. Современные антирезонансные трансформаторы напряжения // Новости ЭлектроТехники. – 2009. – №5(59).