

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

СТАЦИИ

ISSN 0201-4564

2019

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Экономические вызовы для угольных электростанций в России и мире

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Наш сервис – пожизненный! Программа фирменного ремонтно-технического обслуживания АО «ОДК-Авиадвигатель»

Характеристики и использование в энергетике нефтяного кокса

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Особенности функционирования парогазовых установок при больших отклонениях частоты

Особенность мониторинга температуры воздушных ЛЭП с защищёнными проводами

Схемные решения заземления нейтрали сети 20 кВ мегаполиса

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины. Часть III.

Исследование информационных основ алгоритмов, контролирующих высшие гармоники тока

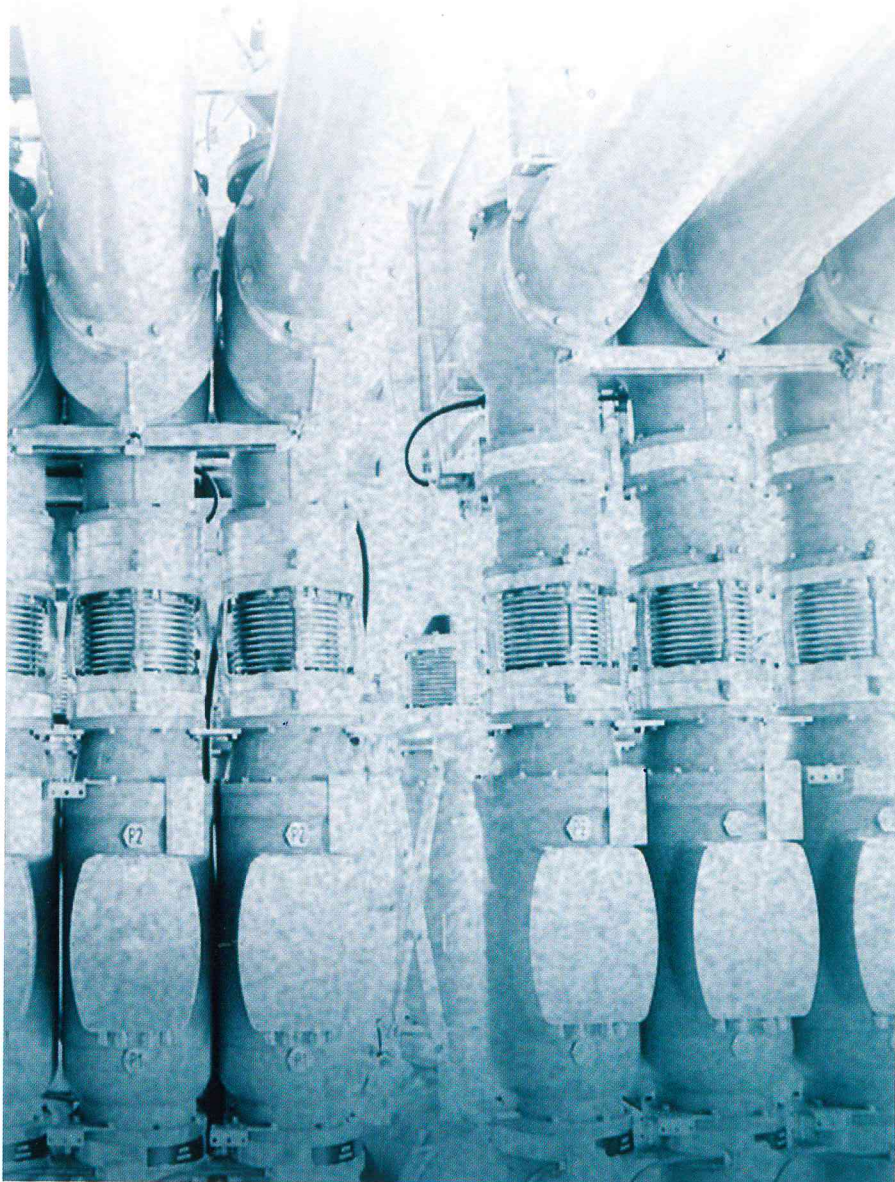
Принципы автоматического расчёта параметров срабатывания релейной защиты относительной селективности для распределительных сетей

ИСТОРИЧЕСКИЕ ВЕХИ И СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Первый руководитель Кыргызской энергосистемы (К 90-летию со дня принятия в эксплуатацию Малой Аламединской ГЭС)

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний



УЧРЕДИТЕЛИ

МИНЭНЕРГО РОССИИ,
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ
КОМПАНИЯ ЕЭС,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
“КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК”,
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА
“ЭНЕРГОПРОГРЕСС”,
НП “НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС”

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **Ольховский Г.Г.**,
доктор техн. наук, чл.-кор. РАН
Зам. главного редактора **Сокур П.В.**,
канд. техн. наук

Антипов К.М., канд. техн. наук
Бондаренко А.Ф., Волков Э.П., академик РАН,
Воротицкий В.Э., доктор техн. наук,
Денисов В.И., доктор эконо. наук,
Долматов И.А., канд. эконо. наук,
Зорченко Н.В., канд. техн. наук, Касьянов Л.Н.,
Корниенко А.Г., Кощев Л.А., доктор техн. наук,
Лачугин В.Ф., доктор техн. наук,
Лейзерович А.Ш., доктор техн. наук (США),
Львов М.Ю., доктор техн. наук,
Любарский Д.Р., доктор техн. наук,
Мисриханов М.Ш., доктор техн. наук (США),
Нечаев В.В., канд. техн. наук,
Новак В., доктор техн. наук (Польша),
Орфеев В.М., Пикин М.А., канд. техн. наук,
Савваитов Д.С., канд. техн. наук,
Седлов А.С., доктор техн. наук,
Соловьёва Т.И., Тулов В.Б., доктор техн. наук,
Широкова М.И., Шульгинов Н.Г., канд. техн. наук

РЕДАКЦИЯ

Зам. главного редактора
Соловьёва Т.И.

Ответственный секретарь, научный редактор
Широкова М.И.

Секретарь редакции
Васина С.А.

Компьютерный набор
Коновалова О.Ф.

АДРЕС РЕДАКЦИИ

115280, Москва,
3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1

ТЕЛЕФОНЫ

Редакция (495) 234-7417, 234-7419

Главный редактор (495) 234-7617

Internet www.elst.energy-journals.ru

E-mail

el-stantsii@rambler.ru

el.stantsii@gmail.com

Журнал включен в перечень ВАК.
Свидетельство о регистрации СМИ –
ПИ № ФС 77-37404 от 04.09.2009;
рег. орган – Роскомнадзор

Редакция не несёт ответственности за
достоверность информации, опубликованной
в рекламных объявлениях.
При перепечатке ссылка на журнал
«Электрические станции» обязательна.

Сдано в набор 28.02.2019

Подписано в печать 18.03.2019

Дата выхода в свет 25.03.2019

Формат 60×84 1/8

Бумага Galerie Art Silk. Печать офсетная

Усл. п. л. 9. Тираж 1800. Цена свободная

Оригинал-макет

выполнен в издательстве “Фолиум”

127411, Москва, Дмитровское ш., 157

Тел/факс: (499) 258-0828

Internet: www.folium.ru

E-mail: prepress@folium.ru

Отпечатано

в типографии издательства “Фолиум”

127411, Москва, Дмитровское ш., 157

Адрес учредителя и издателя: 109044, Москва,
Воронцовский пер., д. 2, стр. 1

© НТФ “Энергопрогресс”,
“Электрические станции”, 2019



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2019 3

Издаётся
с января 1930 г.
1052-й выпуск
с начала издания

Содержание

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Веселов Ф. В., Хоршев А. А., Ерохина И. В., Аликин Р. О. Экономические вызовы для угольных электростанций в России и мире 2

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Хайрулин Т. Н. Наш сервис – пожизненный! Программа фирменного ремонтно-технического обслуживания АО “ОДК-Авиадвигатель” 9

Алехнович А. Н., Богомолов В. В., Артемьева Н. В. Характеристики и использование в энергетике нефтяного кокса. 13

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Полякова О. Ю., Чусовитин П. В., Паздерин А. В. Особенности функционирования парогазовых установок при больших отклонениях частоты 19

Вихарев А. П. Особенность мониторинга температуры воздушных ЛЭП с защищёнными проводами 27

Майоров А. В. Схемные решения заземления нейтрали сети 20 кВ мегаполиса 30

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

Солдатов А. В., Наумов В. А., Антонов В. И., Александрова М. И. Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины. Часть III. Исследование информационных основ алгоритмов, контролирующих высшие гармоники тока 38

Куликов А. Л., Шарьгин М. В., Илюшин П. В. Принципы автоматического расчёта параметров срабатывания релейной защиты относительной селективности для распределительных сетей 45

ИСТОРИЧЕСКИЕ ВЕХИ И СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Беляков Ю. П. Первый руководитель Кыргызской энергосистемы (К 90-летию со дня принятия в эксплуатацию Малой Аламединской ГЭС). 56

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний 58

Content, Abstracts, Keywords 68

Правила оформления рукописи статьи 70

Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины¹

Часть III. Исследование информационных основ алгоритмов, контролируемых высшие гармоники тока

- **Солдатов А. В.**, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, ООО “НПП “Экра”, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Наумов В. А.**, канд. техн. наук, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, ООО “НПП “Экра”, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Антонов В. И.**, доктор техн. наук, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, ООО “НПП “Экра”, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Александрова М. И.**², ООО “НПП “Экра”, Чувашская Республика, Чебоксары

Исследуются информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) статора генератора, работающего на сборные шины. Изучаются информационные основы алгоритмов, в которых используются действующие значения составляющих высших гармоник тока нулевой последовательности и дифференциального тока. Показано, что высшие гармоники в токе ОЗЗ статора генератора подразделяются на три группы, гармоники каждой из которых обладают свойством индивидуальности, проявляющимся в оригинальном характере зависимости их уровня от места ОЗЗ. Информационное содержание гармоник одной группы обогащает информационную ценность гармоник других групп, повышая чувствительность и селективность защиты. Из анализа следует, что наиболее перспективным направлением развития алгоритмов защиты от ОЗЗ является использование составляющих высших гармоник тока.

Ключевые слова: информационные основы алгоритмов защиты, информационные сигналы защит, свойство индивидуальности групп гармоник, защиты от однофазного замыкания на землю генератора.

Настоящая статья является продолжением работ [1] и [2]; в ней представлено исследование информационных основ алгоритмов защит генератора от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), в которых в качестве информационных сигналов используются высшие гармоники тока. В дальнейшем применяются результаты расчётов высших гармоник токов, приведённые в [3].

В зависимости от номера гармоники тока ОЗЗ условно можно разделить на три группы – первую ($v = 1, 7, 13 \dots$), вторую ($v = 5, 11, 17 \dots$) и нулевую ($v = 3, 9, 15 \dots$) по аналогии с названиями последовательностей ЭДС, являющихся источниками для этих гармоник. Иными словами, гармоника тока, вызванная действием ЭДС прямой последовательности, относится к первой группе, обратной последовательности – ко второй, нулевой последовательности – к нулевой. Необходимость разделения

гармоник тока на группы вызвана тем, что гармоники групп обладают *свойством индивидуальности*, заключающимся в том, что амплитуды гармоник разных групп имеют различный характер их зависимости от места ОЗЗ. Амплитуды гармоник тока первой и второй групп по мере отдаления места ОЗЗ от нейтрали линейно растут до максимального значения. Это характерно как для внутреннего, так и для внешнего ОЗЗ. Амплитуды гармоник тока нулевой группы изменяются в зависимости от места ОЗЗ иначе; для них характерен переход кривой зависимости уровня через нуль при ОЗЗ внутри обмотки защищаемого или эквивалентного генераторов.

Не следует путать названия групп гармоник тока с названиями последовательностей электрических величин, потому что в схеме, в которой действует трёхфазный источник ЭДС генератора с гармониками одной последовательности, в режиме ОЗЗ могут появиться и другие последовательности тех же гармоник тока. Это следует непо-

¹ Части I, II “Электрические станции”, 2019, № 1, с. 45 – 51 и № 2 с. 43 – 48.

² Александрова Марина Ивановна: alexsandrova_mi@ekra.ru

средственно из положений метода симметричных составляющих, устанавливающего, что в режиме ОЗЗ в схемах последовательностей наряду с соответствующими источниками высших гармоник ЭДС генератора появляются источники, вызванные несимметрией.

Свойство индивидуальности гармоник групп устанавливает, что анализ информационных сигналов защит от ОЗЗ, использующих высшие гармоники, необходимо проводить отдельно для нулевой и первой (второй) групп. Поэтому достаточно анализировать информационные сигналы различных групп только для третьей и пятой гармоник, как представителей гармоник этих групп. Затем полученные выводы можно распространить и на другие гармоники соответствующих групп.

Защита, контролирующая действующее значение высших гармонических составляющих тока нулевой последовательности. Типичным примером защиты, использующей в качестве характеристической величины действующее значение высших гармонических составляющих тока нулевой последовательности, является защита ЗГНП-4.2 [4]. С учётом свойства индивидуальности гармоник групп анализ информационных основ алгоритма защиты выполним на примере третьей и пятой гармоник.

В нормальном режиме относительное значение составляющей третьей гармоники тока нулевой последовательности со стороны фазных выводов

$$(I_{P,3}^{(0)})_{\text{ном}} = \frac{1}{2} \frac{1+k_E}{2(1+k_E+k_B)(1-k_{R,3})} \quad (1)$$

при значительной ёмкостной проводимости внешней сети $[(k_E+k_B) \rightarrow \infty]$ определяется только ёмкостной проводимостью генератора (рис. 1):

$$(I_{P,3}^{(0)})_{\text{ном}} \rightarrow \frac{1}{2}.$$

Хотя в сети действует ЭДС пятой гармоники, но составляющей нулевой последовательности в токе она не вызывает, т.е.

$$(I_{P,5}^{(0)})_{\text{ном}} = 0.$$

В режиме внутреннего ОЗЗ в токе нулевой последовательности со стороны фазных выводов кроме составляющей третьей гармоники

$$(I_{P,3}^{(0)})_{\text{int}} = (1-\gamma_G)[(1+k_E+k_B)(1-k_{R,3})-1] - \frac{k_E}{2} \quad (2)$$

появляется составляющая пятой гармоники

$$(I_{P,5}^{(0)})_{\text{int}} = -\gamma_G[(1+k_E+k_B)(1-k_{R,5})-1]. \quad (3)$$

В режиме внешнего ОЗЗ те же электрические величины не зависят от ёмкостного тока внешней сети:

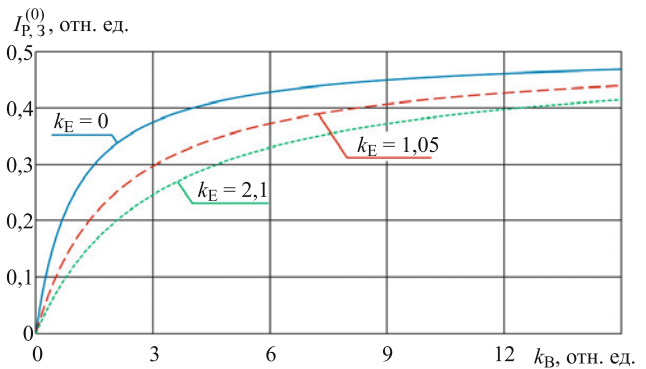


Рис. 1. Относительный уровень составляющей третьей гармоники тока нулевой последовательности на фазных выводах генератора в нормальном режиме

$$\left. \begin{aligned} (I_{P,3}^{(0)})_{\text{ext}} &= \gamma_E - \frac{1}{2}; \\ (I_{P,5}^{(0)})_{\text{ext}} &= \gamma_E. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь γ_G и γ_E – отсчитываемые от нейтрали генератора относительные электрические расстояния до места ОЗЗ в защищаемом и эквивалентном генераторах; k_E и k_B – относительные величины ёмкостных проводимостей эквивалентного генератора и поперечных ветвей эквивалентной нагрузки; k_R – степень компенсации ёмкостных токов на частоте основной гармоники; индексы nom, int, ext – соответственно нормальный режим, внутреннее или внешнее ОЗЗ.

Для обеспечения селективности защита должна отстраиваться от максимального уровня токов нагрузочного режима и внешнего ОЗЗ

$$\zeta_{th} = K_r \max[|(I_{P,3}^{(0)})_{\text{ном}}|, |(I_{P,3}^{(0)})_{\text{ext}}|], \quad (5)$$

где K_r – коэффициент отстройки.

С учётом относительной малости уровня токов гармоник с номерами 5 и выше [5], уставку защиты можно выбирать по третьей гармонике тока нулевой последовательности. Как видно из формул (1) и (4), а также из рис. 1, действующее значение тока третьей гармоники не превышает половины собственного ёмкостного тока защищаемого генератора:

$$\max_{k_E, k_B \rightarrow \infty} |(I_{P,3}^{(0)})_{\text{ном}}| = \max_{\gamma_E=0;1} |(I_{P,3}^{(0)})_{\text{ext}}| = \frac{1}{2}.$$

Тогда уставка по выражению (5) будет равна

$$\zeta_{th} = \frac{K_r}{2}.$$

Расчётным режимом для оценки чувствительности защиты будет внутреннее ОЗЗ с минимальным током, который наступает при минимальной ёмкостной проводимости внешней сети или работе генератора на холостом ходу ($k_E = 0$, $k_B = 0$). В

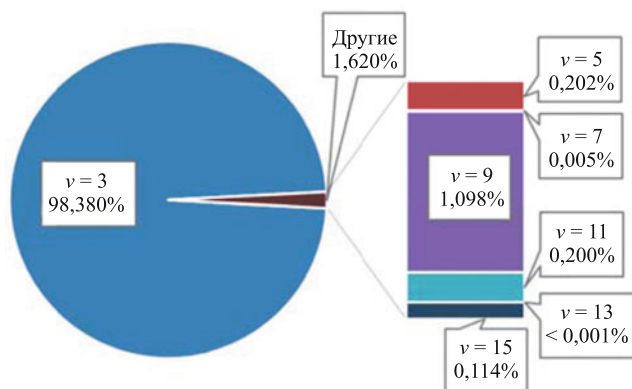


Рис. 2. Вклад высших гармоник тока в уровень характеристической величины для защиты, использующей действующее значение высших гармонических составляющих тока

этих режимах, как видно из уравнений (2) и (3), составляющие высших гармоник тока нулевой последовательности

$$(I_{P,3}^{(0)})_{\text{int}} = -(1 - \gamma_G) k_{R,3}$$

и

$$(I_{P,5}^{(0)})_{\text{int}} = \gamma_G k_{R,5}$$

будут определяться степенью компенсации ёмкостного тока сети $k_{R,v}$ на соответствующей гармонике. В сети с небольшой ёмкостью компенсация не выполняется ($k_R = 0$), тогда токи будут равны нулю.

Следовательно, защита от ОЗЗ генератора, использующая действующее значение высших гармонических составляющих тока нулевой последовательности, удовлетворяет требованиям чувствительности только при значительной ёмкости внешней сети.

Защита, контролирующая наибольшее из действующих значений высших гармонических составляющих дифференциальных токов фаз. Повысить чувствительность защиты при невысокой ёмкости внешней сети можно за счёт использования в качестве характеристической величины наибольшего из действующих значений высших гармонических составляющих дифференциальных токов фаз [6]:

$$\zeta = \max(I_{\Delta,RMS}^A, I_{\Delta,RMS}^B, I_{\Delta,RMS}^C). \quad (6)$$

Величину $I_{\Delta,RMS}^\chi$ для каждой фазы $\chi = A, B, C$ формируют в виде действующего значения остаточного сигнала, получаемого путём исключения основной гармоники из фазного дифференциального тока. Для исследования информационных основ алгоритма защиты удобно представлять действующее значение дифференциального тока в относительных единицах:

$$I_{\Delta,RMS}^\chi = \sqrt{\sum_{v=3,5,7,\dots} \left(\frac{I_{\Delta,v}^\chi I_{base,v}}{I_{base,RMS}} \right)^2}, \quad (7)$$

принимая за базис собственный ёмкостной ток защищаемого генератора на третьей гармонике

$$I_{base,RMS} = j3\omega_1 C_G E_3^f. \quad (8)$$

Порог срабатывания защиты пропорционален медианному значению из действующих значений высших гармонических составляющих дифференциальных токов фаз

$$\zeta_{th} = K_r \text{mid}(I_{\Delta,RMS}^A, I_{\Delta,RMS}^B, I_{\Delta,RMS}^C) \quad (9)$$

и зависит от режима работы сети. Из выражений (6) и (9) следует, что защита срабатывает, если действующее значение тока по уравнению (7) одной из фаз превышает действующие значения токов двух других фаз более чем в K_r раз. Коэффициент отстройки K_r выбирается из условий обеспечения селективности работы защиты в нормальном режиме работы генератора и при внешнем ОЗЗ.

Относительные уровни отдельных гармоник дифференциального тока, как это видно из рис. 2 и 3 [1], практически не зависят от номера гармоники; они испытывают на себе только влияние коэффициента компенсации ёмкостного тока сети $k_{R,v}$ (в дифференциальном токе составляющая тока нагрузки отсутствует). Но, как следует из уравнения (13) [1], коэффициент $k_{R,v}$ стремительно убывает с ростом номера гармоники из-за существенного ослабления роли дугогасящего реактора в схемах для высших гармоник по сравнению со схемой на основной гармонике. Дугогасящий реактор компенсирует лишь около 11% ёмкостных токов третьей гармоники ($k_{R,3} = 0,111$) и только 4% ёмкостных токов пятой гармоники ($k_{R,5} = 0,040$), а в пределе при $v \rightarrow \infty$ коэффициент компенсации $k_{R,v} \rightarrow 0$.

Кроме этого, значение тока по уравнению (7), выраженное в базисе по формуле (8) с учётом уравнения (9) [1], связано с относительными значениями высших гармоник дифференциальных токов фаз $I_{\Delta,v}^\chi$ соотношением

$$I_{\Delta,RMS}^\chi = \sqrt{\sum_{v=3,5,7,\dots} \left(\frac{v E_v I_{\Delta,v}^\chi}{3 E_3} \right)^2}. \quad (10)$$

Поэтому относительные уровни высших гармоник группы будут близки друг к другу. Вклад каждой гармоники в величину, выраженную уравнением (10), будет определяться практически только коэффициентом

$$K_{s,v} = \left(\frac{v E_v}{3 E_3} \right)^2.$$

Поскольку абсолютный уровень третьей гармоники ЭДС значительно превосходит уровни других гармоник [1], а суммарный вклад всех высших гармоник с номерами $\nu \geq 5$ составляет менее 2% (рис. 2), то величина $I_{\Delta,RMS}^{\lambda}$ определяется, в основном, уровнем третьей гармоники дифференциального тока фазы.

Проанализируем информационные основы алгоритма защиты на примере третьей и пятой гармоник с учётом свойства индивидуальности гармоник групп.

В нормальном режиме относительные значения третьей и пятой гармоник дифференциальных токов особой фазы f генератора равны

$$(I_{\Delta,3}^f)_{\text{ном}} = \frac{1}{2} - \frac{1+k_E}{2(1+k_E+k_B)(1-k_{R,3})} \quad (11)$$

и

$$(I_{\Delta,5}^f)_{\text{ном}} = -\frac{1}{2} \quad (12)$$

соответственно. Дифференциальные токи других фаз определяются с учётом фазных соотношений ЭДС по формуле (10) [1] и равны по уровню токам выражений (11) и (12). Поэтому при $K_r > 1$ характеристическая величина ζ [формула (6)] будет меньше порога срабатывания ζ_{th} [выражение (9)].

При внешнем ОЗЗ относительные значения третьей гармоники дифференциального тока всех фаз будут равны друг другу

$$(I_{\Delta,3}^f)_{\text{ext}} = (I_{\Delta,3}^{\sigma})_{\text{ext}} = \gamma_E - \frac{1}{2},$$

а уровни пятой гармоники в неповреждённых фазах

$$(I_{\Delta,5}^{\sigma})_{\text{ext}} = \gamma_E - \frac{a^{5\lambda}}{2}$$

(где $a = e^{j120^\circ}$ – комплексный оператор поворота) будут теоретически одинаковыми, но больше, чем в неповреждённой фазе

$$(I_{\Delta,5}^f)_{\text{ext}} = \gamma_E - \frac{1}{2}.$$

Следовательно, при внешних ОЗЗ защита надёжно заблокирована также при $K_r > 1$. Здесь и далее $\lambda = 1$ для опережающей фазы ($\sigma = f + 1$) и $\lambda = 2$ для отстающей фазы ($\sigma = f - 1$). На практике для отстройки защиты от токов небаланса и погрешностей измерения значение коэффициента отстройки $K_r \geq 1,5$.

При внутреннем ОЗЗ составляющие третьей и пятой гармоник в токе повреждённой фазы f будут равны

$$(I_{\Delta,3}^f)_{\text{int}} = (1-\gamma_G)[3(1+k_E+k_B)(1-k_{R,3})-1]-1-3\frac{k_E}{2} \quad (13)$$

и

$$(I_{\Delta,5}^f)_{\text{int}} = -\gamma_G[3(1+k_E+k_B)(1-k_{R,5})-1]-\frac{1}{2} \quad (14)$$

соответственно. В неповреждённых фазах те же гармоники будут следующими:

$$(I_{\Delta,3}^{\sigma})_{\text{int}} = \gamma_G - \frac{1}{2} \quad (15)$$

и

$$(I_{\Delta,5}^{\sigma})_{\text{int}} = \gamma_G - \frac{a^{5\lambda}}{2}. \quad (16)$$

В этом случае по повреждённой фазе к месту ОЗЗ протекают ёмкостные токи всех элементов сети. Поэтому амплитуды гармонических составляющих дифференциального тока в повреждённой фазе генератора при внутреннем ОЗЗ существенно возрастают. Это справедливо и для случая работы генератора на холостом ходу, так как к месту ОЗЗ текут токи остальных неповреждённых фаз генератора.

В то же время дифференциальный ток неповреждённой фазы защищаемого генератора зависит только от ёмкостного тока этой же фазы.

Для проверки соответствия защиты требованиям чувствительности оценим уровни гармоник дифференциальных токов повреждённой и неповреждённых фаз при ОЗЗ в разных точках обмотки статора защищаемого генератора и различных параметрах элементов сети. Для оценки чувствительности защит рассматривается работа генератора на холостом ходу ($k_E = 0, k_B = 0$) и при включении защищаемого генератора в сеть с небольшой ($k_B = 1$) и значительной ($k_B \geq 3$) ёмкостью.

В режиме холостого хода защищаемого генератора и при отсутствии компенсации ($k_{R,\nu} = 0$) уровень третьей гармоники дифференциального тока повреждённой [формула (13)] и неповреждённых [выражение (15)] фаз снижается и достигает нуля при перемещении места ОЗЗ к середине обмотки статора генератора (рис. 3, а). Уровень пятой гармоники в повреждённой и неповреждённых фазах будет линейно расти при перемещении места ОЗЗ от нейтрали к фазным выводам (рис. 3, б). При этом действующее значение высших гармонических составляющих дифференциальных токов в повреждённой фазе почти в 2 раза больше, чем в неповреждённых фазах (рис. 3, в). Следовательно, характеристическая величина по формуле (6) определяется гармониками дифференциального тока только повреждённой фазы

$$\zeta = I_{\Delta,RMS}^f,$$

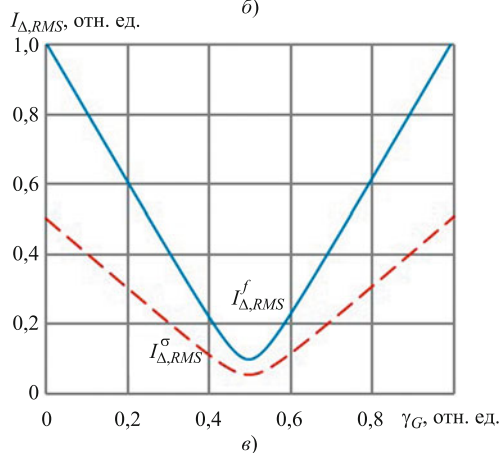
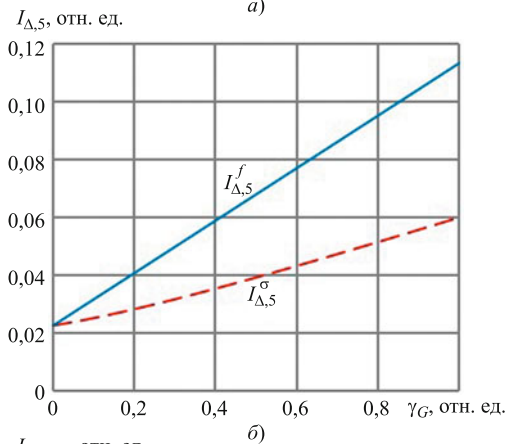
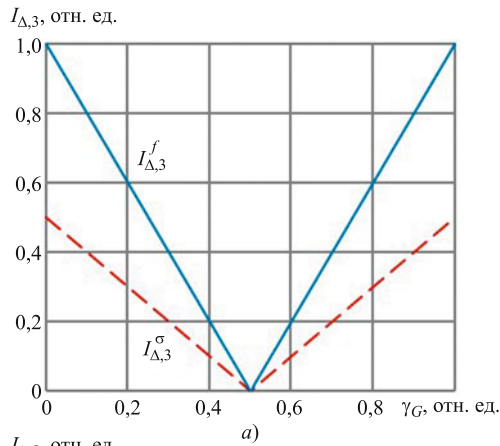


Рис. 3. Графики зависимости относительных уровней третьей (а), пятой (б) гармоник и действующего значения высших гармонических составляющих (в) дифференциального тока в повреждённой и неповреждённой фазах от места внутреннего ОЗЗ при отсутствии компенсации:

за базисное значение принят ток, определяемый по уравнению (8)

а порог срабатывания по уравнению (9) – гармониками одной из неповреждённых фаз

$$\zeta_{th} = K_r I_{\Delta,RMS}^\sigma$$

Таким образом, в режиме холостого хода генератора защита чувствительна ко всем внутренним ОЗЗ.

При подключении генератора к внешней сети общая ёмкость растёт, следовательно, увеличива-

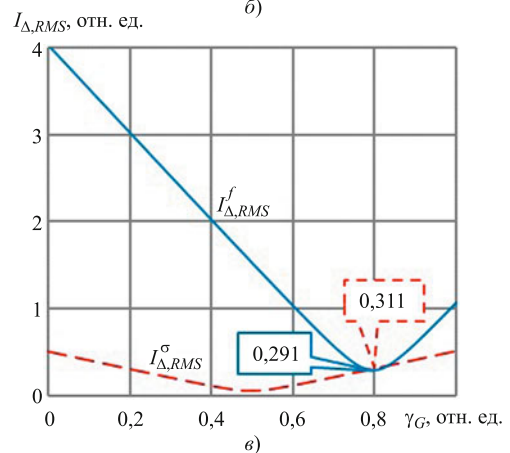
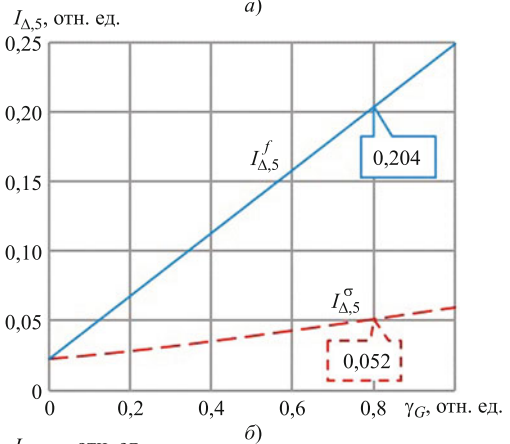
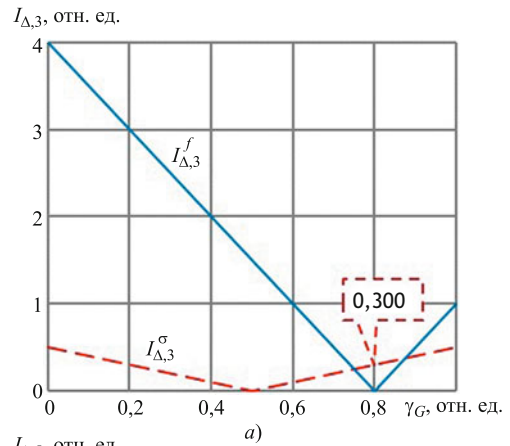


Рис. 4. Графики зависимости относительных уровней третьей (а), пятой (б) гармоник и действующего значения высших гармонических составляющих (в) дифференциального тока в повреждённой и неповреждённой фазах от места внутреннего ОЗЗ при подключении к внешней сети:

за базисное значение принят ток, определяемый по уравнению (8)

ются максимальные уровни гармоник [выражения (13) и (14)] дифференциального тока в повреждённой фазе при внутренних ОЗЗ. В то же время уровни гармоник [выражения (15) и (16)] неповреждённых фаз не зависят от ёмкости внешней сети, и потому характер их зависимости от места ОЗЗ остаётся одинаковым при любой ёмкости внешней сети.

Минимум кривой уровня третьей гармоники тока [выражение (13)] повреждённой фазы с рос-

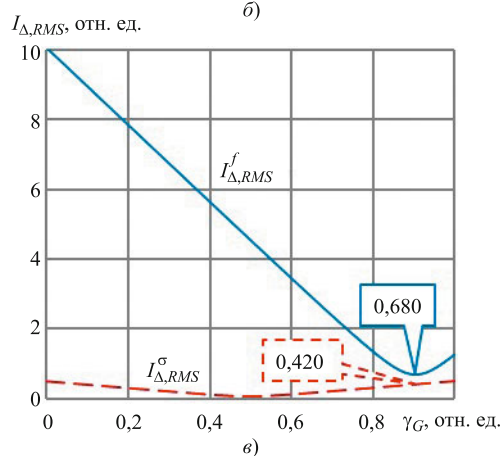
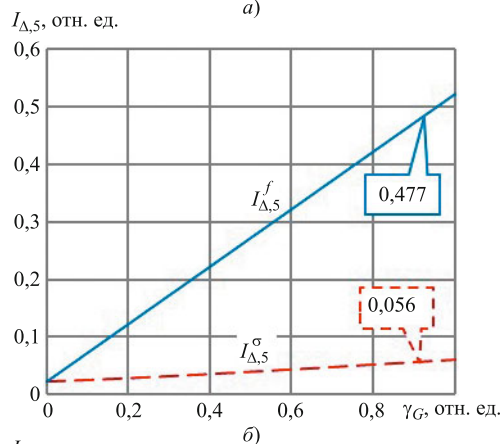
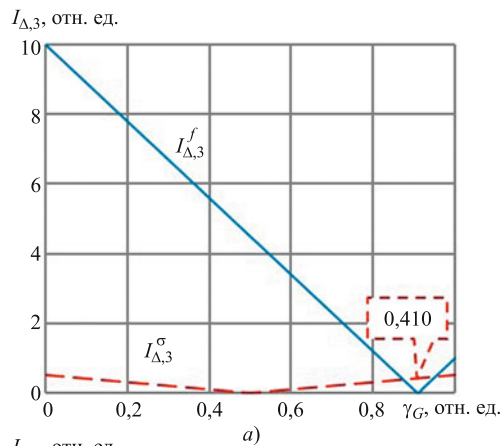
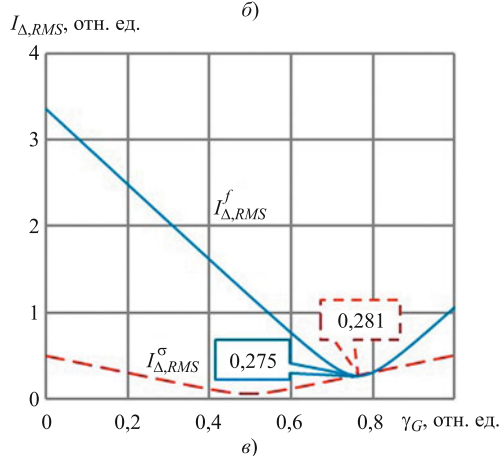
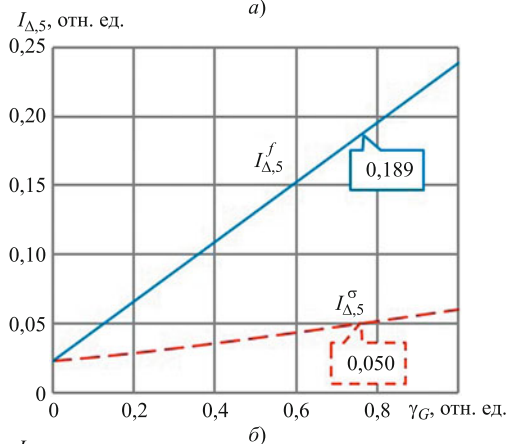
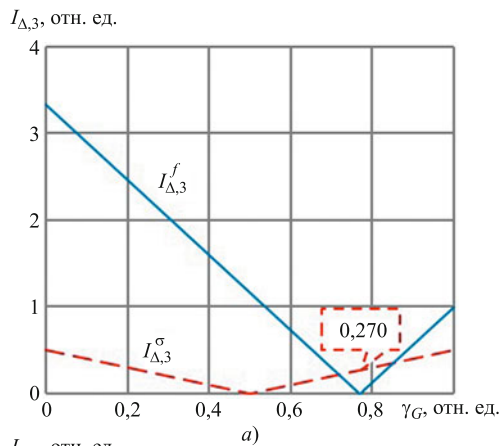


Рис. 5. Графики зависимости относительных уровней третьей (а), пятой (б) гармоник и действующего значения высшего гармонического составляющих (в) дифференциального тока в поврежденной и неповрежденной фазах от места внутреннего ОЗЗ при введении в сеть компенсации: за базисное значение принят ток, определяемый по уравнению (8)

Рис. 6. Графики зависимости относительных уровней третьей (а), пятой (б) гармоник и действующего значения высшего гармонического составляющих (в) дифференциального тока в поврежденной и неповрежденной фазах от места внутреннего ОЗЗ: за базисное значение принят ток, определяемый по уравнению (8)

том ёмкости внешней сети смещается вправо по оси γ_G , а неповрежденной фазы все так же остаётся в середине обмотки (рис. 4, а). При этом по уравнению (14) характер зависимости уровня пятой гармоники тока поврежденной фазы от места ОЗЗ и его значение при ОЗЗ в нейтрали не изменяются, однако растёт наклон характеристики (рис. 4, б). Поэтому по формуле (7) действующее значение тока поврежденной фазы при ОЗЗ в точке, где уровень третьей гармоники [выражение

(13)] снижается до нуля (рис. 4, а; $\gamma_G = 0,80$), будет определяться, в основном, гармониками первой (7-я, 13-я и т.д.) и второй (5-я, 11-я и т.д.) групп, а действующее значение тока неповрежденных фаз – уровнем гармоник нулевой группы (3-я, 9-я и т.д.). Из рис. 2 следует, что основную долю в действующем значении тока поврежденной фазы в этой точке составляют 5-я и 11-я гармоники, а в токах неповрежденных фаз – 3-я гармоника.

При определённых соотношениях ёмкостей элементов сети может сложиться ситуация (рис. 4, в; $\gamma_G = 0,80$), когда действующее значение всех высших гармонических составляющих дифференциального тока в неповреждённой фазе ($I_{\Delta,RMS}^{\sigma} = 0,311$) будет больше, чем в повреждённой ($I_{\Delta,RMS}^f = 0,291$). Другими словами, при ОЗЗ вблизи фазных вводов или нейтрали генератора появится зона нечувствительности, поскольку характеристическая величина по формуле (6) будет меньше порога срабатывания по выражению (9).

Компенсация ёмкости практически не влияет на чувствительность защиты (рис. 5) и приводит лишь к перемещению минимума уровня третьей гармоники [по формуле (13)] повреждённой фазы в зависимости от места ОЗЗ ($\gamma_G = 0,77$) к нейтрали и, как следствие, перемещению минимума действующего значения высших гармонических составляющих в зависимости от места ОЗЗ [выражение (7)] ($I_{\Delta,RMS}^f = 0,275$; $I_{\Delta,RMS}^{\sigma} = 0,281$) из-за незначительного снижения общего уровня высших гармоник в сети ($I_{\Delta,3}^{\sigma} = 0,270$; $I_{\Delta,5}^f = 0,189$; $I_{\Delta,5}^{\sigma} = 0,050$).

Только в сети со значительной внешней ёмкостью действующее значение тока по формуле (7) повреждённой фазы при внутреннем ОЗЗ в точке минимума третьей гармоники будет выше действующего значения высших гармонических составляющих дифференциального тока неповреждённой фазы (рис. 6, в; $\gamma_G = 0,91$; $I_{\Delta,RMS}^f = 0,680$; $I_{\Delta,RMS}^{\sigma} = 0,420$). В таких сетях защита не будет иметь зону нечувствительности.

Таким образом, защита, контролирующая наибольшее из действующих значений высших гармонических составляющих дифференциальных токов фаз, теряет чувствительность к ОЗЗ на части обмотки статора генератора в сети с малой ёмкостью, и в связи с этим не нашла широкого применения.

Выводы

1. Анализ информационных сигналов показывает, что наиболее перспективным направлением

развития алгоритмов защиты от ОЗЗ генератора, работающего на сборные шины, является использование высших гармоник.

2. Высшие гармоники, источником которых является ЭДС генератора, подразделяются на три группы, гармоники каждой из которых обладают свойством индивидуальности, проявляющимся в оригинальном характере зависимости их уровня от места ОЗС. Информационное содержание гармоник одной группы обогащает информационную ценность гармоник других групп, повышая чувствительность и селективность защиты.

Список литературы

1. Солдатов, А. В. Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины. Часть I. Универсальная модель сети [Текст] / А. В. Солдатов [и др.] // Электрические станции. – 2019. – № 1. – С. 45 – 51.
2. Солдатов, А. В. Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины. Часть II. Исследование информационных основ алгоритмов, в которых используются составляющие нулевой последовательности [Текст] / А. В. Солдатов [и др.] // Электрические станции. – 2019. – № 2. – С. 43 – 48.
3. Солдатов, А. В. Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших гармоник дифференциального тока [Текст] / А. В. Солдатов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 3(24). – С. 12 – 20.
4. Алексеев, В. Г. Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины [Текст] / В. Г. Алексеев // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 51 – 56.
5. Солдатов, А. В. Токи высших гармоник в генераторной сети при однофазных замыканиях на землю [Текст]: материалы 11-й всерос. науч.-техн. конф. “Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем” / А. В. Солдатов [и др.]. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2015. – С. 375 – 379.
6. Кискачи, В. М. Новые направления выполнения селективной защиты от однофазных замыканий на землю генераторов и сетей 6 – 35 кВ [Текст] / В. М. Кискачи // Электрические станции. – 1994. – № 10. – С. 10 – 15.