

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2019 2

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Разработка алгоритма оценки затрат при переходе на наилучшие доступные технологии энергетической отрасли

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Некоторые технические характеристики ПГУ-800 Пермской ГРЭС

Оптимизация восстановительной термической обработки корпусов турбин из низколегированной стали

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Качество оценки состояния электроэнергетической системы и его численное измерение

Оценка потенциала повышения эффективности использования СТК для симметрирования напряжения на примере НПС-21 Сковородино

Реализация системных функций АРВ сильного действия синхронных генераторов

Метод идентификации несанкционированного потребления электроэнергии в распределенной сети по данным АСКУЭ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

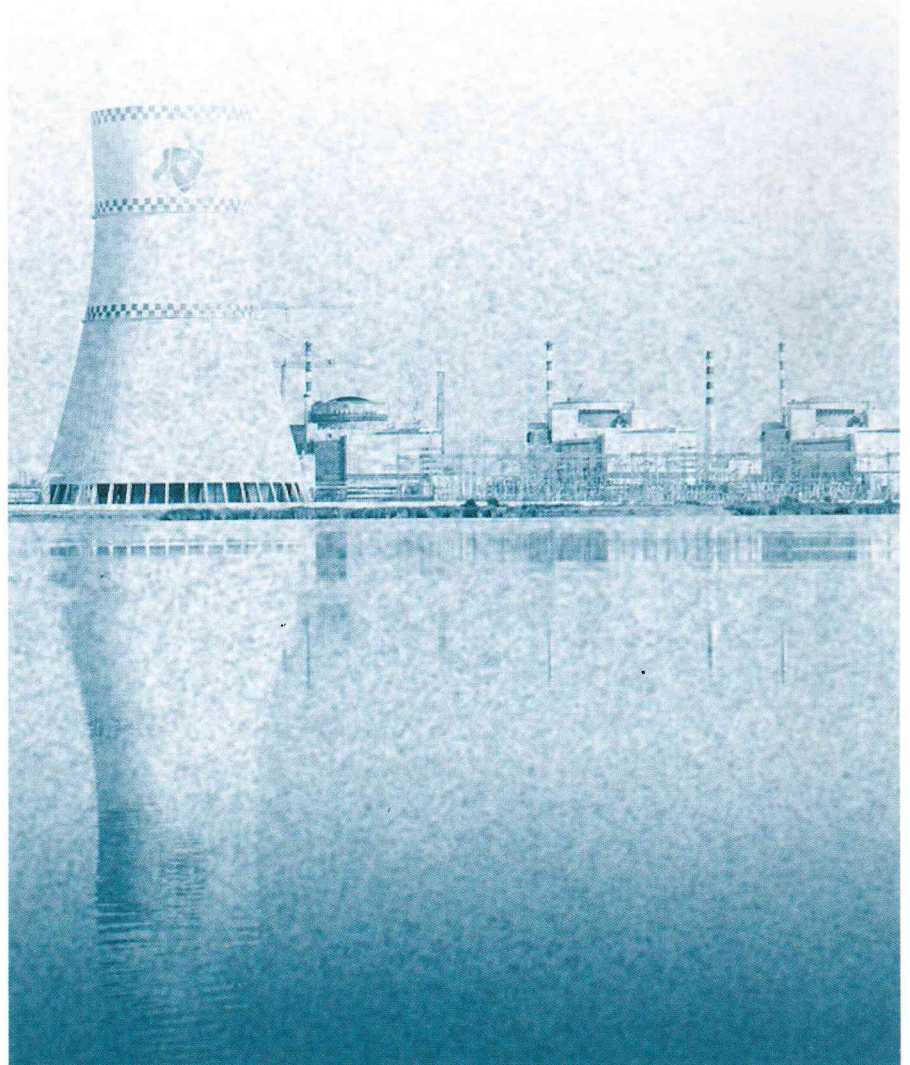
Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины.

Часть II. Исследование информационных основ алгоритмов, в которых используются составляющие нулевой последовательности

Влияние помех на локационный мониторинг воздушных линий электропередачи

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,
Воротницкий В.Э., доктор техн. наук,
Денисов В.И., доктор эконом. наук,
Долматов И.А., канд. эконом. наук,
Зорченко Н.В., канд. техн. наук, Касьянов Л.Н.,
Корниенко А.Г., Коцевев 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,
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 28.01.2019

Подписано в печать 18.02.2019

Дата выхода в свет 25.02.2019

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 2

Издаётся
с января 1930 г.
1051-й выпуск
с начала издания

Содержание

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Кондратьева О. Е., Росляков П. В., Скобелев Д. О., Локтионов О. А. Разработка алгоритма оценки затрат при переходе на наилучшие доступные технологии энергетической отрасли 2

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Таганов А. Е., Залешин М. В., Радин Ю. А., Гришин И. А. Некоторые технические характеристики ПГУ-800 Пермской ГРЭС 7

Гладштейн В. И., Любимов А. А. Оптимизация восстановительной термической обработки корпусов турбин из низколегированной стали 12

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Мотовилов С. И. Качество оценки состояния электроэнергетической системы и его численное измерение 20

Матинян А. М. Оценка потенциала повышения эффективности использования СТК для симметрирования напряжения на примере НПС-21 Сковородино 25

Комков А. Л., Попов Е. Н., Филимонов Н. Ю., Юрганов А. А., Бурмистров А. А. Реализация системных функций АРВ сильного действия синхронных генераторов 33

Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Койбагаров Т. Д., Осмонова Р. Ч. Метод идентификации несанкционированного потребления электроэнергии в распределенной сети по данным АСКУЭ 37

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 II. Исследование информационных основ алгоритмов, в которых используются составляющие нулевой последовательности 43

Мишулин Р. Г. Влияние помех на локационный мониторинг воздушных линий электропередачи 49

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний 60

Content, Abstracts, Keywords 69

Правила оформления рукописи статьи 71

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

Часть II. Исследование информационных основ алгоритмов, в которых используются составляющие нулевой последовательности

- **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 статора генератора, работающего на сборные шины. Краеугольным камнем анализа является использование универсальной модели сети, рассмотренной в части I статьи (“Электрические станции”, 2019, № 1). Исследуются информационные основы алгоритмов, в которых используются основная гармоника тока, основная и третья гармоники напряжения нулевой последовательности, низкочастотная гармоника, инжектируемая в сеть. Обосновывается эффективность существующего алгоритма, основанного на контроле гармоники, инжектируемой в сеть. Однако применение этих защит требует установки в сеть дополнительного оборудования и сопряжено с ухудшением качества электроэнергии и характеристик других устройств РЗА.

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

В работе исследуются информационные основы алгоритмов защит генератора от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), в которых используются следующие информационные сигналы:

- а) основная гармоника тока;
- б) основная и третья гармоники напряжения нулевой последовательности;
- в) низкочастотная гармоника, инжектируемая в сеть.

Целью исследований является оценка предельных возможностей алгоритмов защит от ОЗЗ с точки зрения чувствительности и селективности. Поэтому способы выделения информационных сигналов, а также влияние погрешностей измерительных трансформаторов не рассматриваются, полагая, что эти исследования представляют собой отдельную задачу, возникающую при конкрет-

ной реализации того или иного алгоритма в устройстве.

На практике обеспечению расчётной чувствительности и селективности защит препятствуют несовершенство трактов измерения и погрешности цифровой обработки информационных сигналов [1]. Сложность задачи заключается прежде всего в том, что в электрических величинах присутствует основная гармоника, уровень которой может превышать уровень высших гармоник на несколько порядков. Например, в защитах, контролирующих высшие гармоники тока или гармонику, инжектируемую в сеть, отношение сигнал/шум может быть ниже тысячных долей. Вследствие этого традиционные цифровые устройства релейной защиты, имеющие относительно небольшой динамический диапазон измерения электрических величин и, кроме того, смещённый в сторону больших кратностей, не способны распознавать слабые информационные сигналы на фоне преобладающего шума [2].

¹ Часть I. “Электрические станции”, 2019, № 1, с. 45 – 51.

² Александрова Марина Ивановна: alexandrova_mi@ekra.ru

Для выделения высших гармоник в защитах генераторов от ОЗЗ обычно применяются специальные тракты аналого-цифрового преобразования (АЦП), содержащие аналоговые фильтры заграждения основной гармоники высокого порядка. Поскольку частота в генераторной сети в различных режимах работы изменяется в широких пределах (от 40 до 60 Гц) [3 – 5], то такие тракты АЦП в этих условиях теряют эффективность, приводя к потере чувствительности и селективности защиты.

По мнению авторов, одним из приоритетных направлений развития защит от ОЗЗ статора генератора, работающего на сборные шины, является использование при выделении информационных сигналов инструментов адаптивного структурного анализа [6, 7], в частности, активно-адаптивное распознавание слабых гармонических составляющих сигнала [8, 9].

Защита, контролирующая основную гармонику тока. Уровень аварийных составляющих основной гармоники токов ОЗЗ определяется, в основном, значением ёмкостной проводимости элементов сети относительно земли, он на несколько порядков меньше токов нагрузки и сопоставим с уровнем шумов, вызванных несовершенством трактов измерения защит. Поэтому использование основной гармоники фазных токов [10] для выявления ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью технически сложно. Однако токи фаз могут использоваться для блокировки защиты от ОЗЗ при междуфазных коротких замыканиях.

В то же время основная гармоника тока нулевой последовательности обладает большей информационной ценностью для защит от ОЗЗ [11], и объясняется это тем, что в нормальном режиме она практически отсутствует

$$(I_{P,1}^{(0)})_{\text{norm}} \approx 0.$$

В общем случае уровень основной гармоники тока нулевой последовательности зависит от места ОЗЗ и при внутреннем ОЗЗ определяется режимом нейтрали и ёмкостной проводимостью сети:

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

а при внешнем ОЗЗ – собственным ёмкостным током защищаемого генератора:

$$(I_{P,1}^{(0)})_{\text{ext}} = \gamma_E. \quad (2)$$

Здесь и далее индексом *norm*, *int* и *ext* обозначается величина соответственно в нормальном режиме, при внутреннем и внешнем ОЗЗ; γ_G и γ_E – отсчитываемые от нейтрали генераторов относительные электрические расстояния до места ОЗЗ в защищаемом и эквивалентном генераторах соответственно; k_E и k_B – относительные величины

ёмкостей эквивалентного генератора и поперечных ветвей эквивалентной нагрузки; k_R – степень компенсации ёмкостных токов на частоте основной гармоники.

В сети с компенсированной нейтралью ($k_R = 1$) основная гармоника тока нулевой последовательности при внутреннем ОЗЗ равна собственному ёмкостному току защищаемого генератора

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

как и при внешнем ОЗЗ по выражению (2). Поэтому защита от ОЗЗ генератора, работающего на сборные шины, использующая основную гармонику тока нулевой последовательности в качестве информационного сигнала, в сети с компенсированной нейтралью теряет селективность.

В случае сети с изолированной нейтралью ($k_R = 0$) основная гармоника тока нулевой последовательности будет определяться суммарными ёмкостными токами внешней сети, и как следует из формулы (1)

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

Уставка ζ_{th} защиты, использующей действующее значение основной гармоники тока нулевой последовательности в качестве характеристической величины

$$\zeta = |I_{P,1}^{(0)}|, \quad (4)$$

отстраивается от максимального значения тока при внешних ОЗЗ и будет равна

$$\zeta_{th} = K_r \max[(I_{P,1}^{(0)})_{\text{ext}}],$$

где K_r – коэффициент отстройки.

Как следует из выражения (2), максимального значения

$$\max_{\gamma_E=1} [(I_{P,1}^{(0)})_{\text{ext}}] = 1$$

ток $I_{P,1}^{(0)}$ достигает при ОЗЗ на выводах эквивалентного генератора, поэтому $\zeta_{th} = K_r$. Тогда условие срабатывания защиты будет определяться выражением

$$\zeta > K_r. \quad (5)$$

Ширина зоны нечувствительности со стороны нейтрали

$$\gamma_\zeta = \frac{K_r}{k_E + k_B},$$

как это следует из формул (3), (4) и (5), будет зависеть от соотношения ёмкостной проводимости защищаемого генератора и суммарной ёмкостной проводимости эквивалентного генератора и на-

грузки (рис. 1). Поэтому при малой ёмкости внешней сети $(k_E + k_B) < 2$ уже при коэффициенте отстройки $K_r = 2$ защита нечувствительна к внутренним замыканиям.

Из выражений (2) и (3) следует, что зону действия защиты можно расширить, придав ей направленность за счёт использования в качестве характеристической величины вещественной части вектора основной гармоники тока нулевой последовательности

$$\zeta = \text{Re}(I_{P,1}^{(0)}).$$

Условие срабатывания защиты будет определяться неравенством

$$\zeta < 0,$$

и теоретически защита охватит всю обмотку статора, однако на практике зона действия будет ограничена из-за необходимости отстройки от токов небаланса.

Таким образом, защита от ОЗЗ генератора, работающего на сборные шины, использующая основную гармонику тока нулевой последовательности, при работе в сети с изолированной нейтралью не удовлетворяет требованию чувствительности, а в сети с компенсированной нейтралью – ещё и требованию селективности.

Защита, контролирующая основную и третью гармонику напряжения нулевой последовательности. Основная и третья гармоники напряжения нулевой последовательности широко используются в качестве информационных сигналов 100%-ной защиты от ОЗЗ блока генератор – трансформатор, не имеющего гальванической связи с потребителем и другими источниками [12]. Однако эти информационные сигналы не нашли применения в защитах от ОЗЗ генератора, работающего на сборные шины. Поясним это обстоятельство.

Основная гармоника напряжения нулевой последовательности на фазных выводах защищаемого генератора $\underline{U}_{P,1}^{(0)}$ в нормальном режиме практически отсутствует, а в аварийных режимах изменяется в широких пределах в зависимости от места ОЗЗ. Её комплексное значение

$$(\underline{U}_{P,1}^{(0)})_{\text{int(ext)}} = \gamma, \quad (6)$$

где $\gamma = \gamma_G$ или $\gamma = \gamma_E$ в случае внутреннего (int) или внешнего (ext) ОЗЗ соответственно.

Защита, использующая в качестве характеристической величины основную гармонику напряжения нулевой последовательности, выявляет ОЗЗ на большей части обмотки статора генератора, за исключением зоны вблизи нейтрали. Ширина зоны нечувствительности определяется уровнем небаланса и точностью измерения основной гармоники напряжения нулевой последовательности,

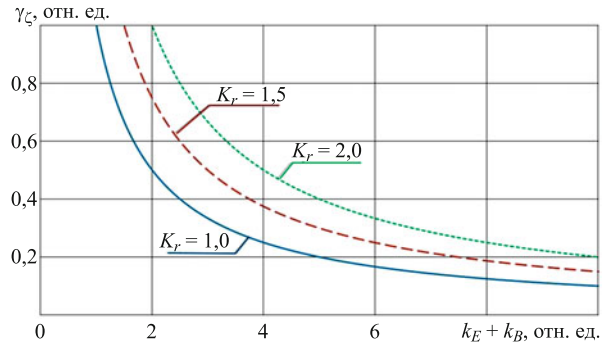


Рис. 1. Графики зависимости ширины зоны нечувствительности защиты, контролирующей основную гармонику тока нулевой последовательности, от относительной суммарной проводимости внешней сети и коэффициента отстройки

и в современных защитах составляет менее 15% обмотки статора генератора [13].

Для защиты части обмотки статора генератора, расположенной в зоне нечувствительности защиты по основной гармонике, дополнительно используют третью гармонику напряжения нулевой последовательности.

В нормальном режиме она присутствует как на фазных выводах генератора

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

так и в его нейтрали

$$(\underline{U}_{N,3}^{(0)})_{\text{ном}} = (\underline{U}_{P,3}^{(0)})_{\text{ном}} - 1.$$

Уровни напряжений третьей гармоники на фазных выводах и в нейтрали зависят от соотношения поперечных проводимостей генераторов и нагрузок и режима нейтрали.

Наиболее неблагоприятные условия работы защиты складываются в сети с компенсированной нейтралью. В этом случае $k_R = 1$, а степень компенсации ёмкостных токов на частоте третьей гармоники $k_{R,3} = 0,111$, и при любом соотношении параметров сети напряжение $(\underline{U}_{N,3}^{(0)})_{\text{ном}}$ всегда выше 0,4, а напряжение $(\underline{U}_{P,3}^{(0)})_{\text{ном}} -$ ниже 0,6 (рис. 2).

По мере приближения места ОЗЗ к нейтрали ($\gamma \rightarrow 0$) уровень третьей гармоники напряжения нулевой последовательности на фазных выводах

$$(\underline{U}_{P,3}^{(0)})_{\text{int(ext)}} = 1 - \gamma \quad (7)$$

увеличивается, а со стороны нейтрали

$$(\underline{U}_{N,3}^{(0)})_{\text{int(ext)}} = -\gamma \quad (8)$$

уменьшается. Напряжения в выражениях (7) и (8) не зависят от параметров сети и одинаковы при ОЗЗ как в защищаемом (int: $\gamma = \gamma_G$), так и в эквивалентном генераторе (ext: $\gamma = \gamma_E$).

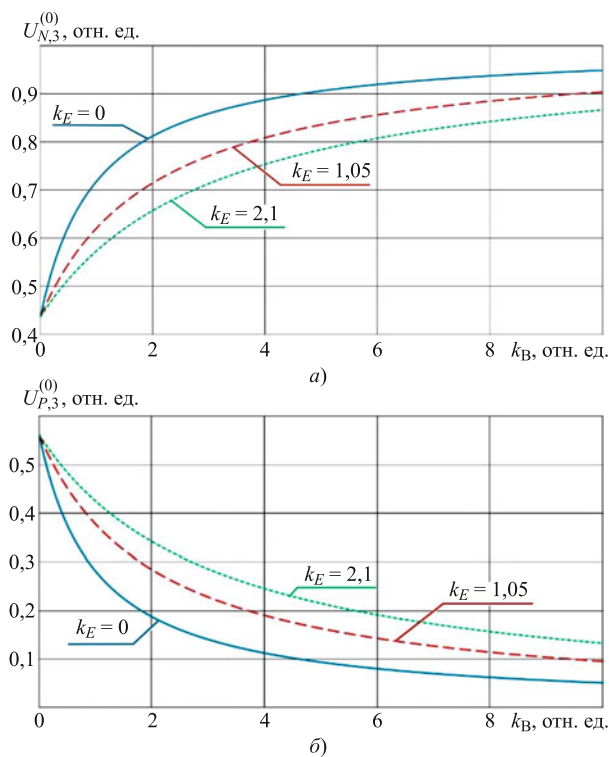


Рис. 2. Относительный уровень третьей гармоники напряжения нулевой последовательности в нейтрали (а) и на фазных выводах (б) генератора в нормальном режиме в зависимости от ёмкостных проводимостей

Если в компенсированной сети $\gamma > 0,4$, то напряжения в формулах (7) и (8) находятся в области значений напряжений нормального режима. Это означает, что при использовании в качестве характеристической величины действующего значения третьей гармоники напряжения нулевой последовательности ОЗЗ можно выявлять теоретически только на 40% обмотки статора генератора в зоне нейтрали.

Правила устройства электроустановок [14] регламентируют, что коэффициент чувствительности защиты, реагирующей на третью гармонику напряжения нулевой последовательности, должен быть не менее 2. Это требование сокращает зону действия защиты до 20% обмотки вблизи нейтрали. На практике чувствительность защиты ещё больше снижается из-за несимметрии параметров оборудования и погрешностей трактов АЦП, и использование характеристических величин по формулам (7) и (8) становится нецелесообразным.

Повышение чувствительности защиты к ОЗЗ вблизи нейтрали генератора возможно при использовании характеристической величины [12, 15]

$$\zeta = \left| \frac{U_{N,3}^{(0)} + U_{P,3}^{(0)}}{U_{N,3}^{(0)}} \right|. \quad (9)$$

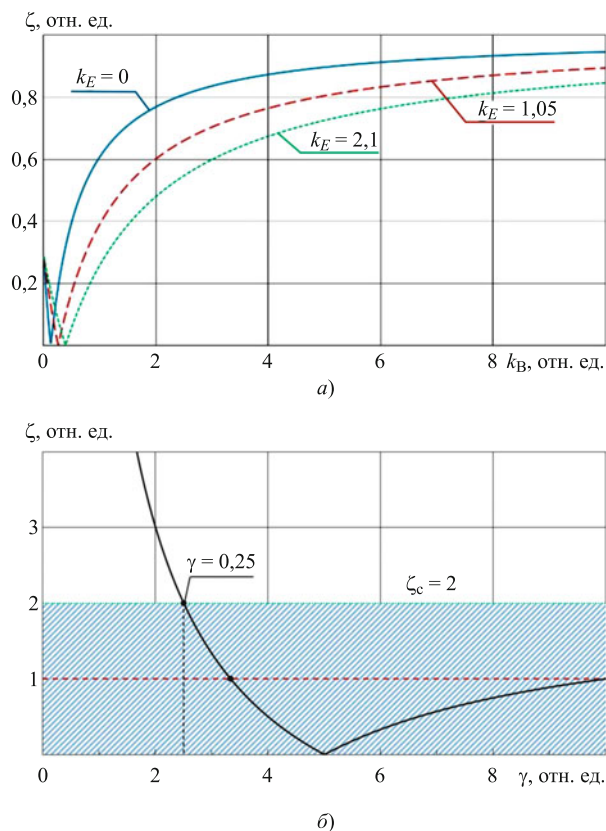


Рис. 3. Уровень характеристической величины, определяемой по выражению (9), в нормальном режиме (а) и при ОЗЗ (б)

При ОЗЗ вблизи нейтрали характеристическая величина, определяемая по выражению (9), значительно возрастает (рис. 3, б).

В нормальном режиме максимальное значение характеристической величины, соответствующей выражению (9), во всём диапазоне изменения параметров сети не превышает 1 (рис. 3, а). Поскольку чувствительность защиты, согласно ПУЭ, должна быть не менее 2, то, как видно из рис. 3, зона защиты будет составлять не более 25% обмотки статора генератора со стороны нейтрали.

Таким образом, совместное использование основной и третьей гармоник напряжения нулевой последовательности позволяет выявлять ОЗЗ в любой точке статора защищаемого генератора. Однако, как видно из формул (6) – (8), характер изменения напряжений $U_{P,1}^{(0)}$ и $U_{P,3}^{(0)}$ идентичен при ОЗЗ как в защищаемом, так и в эквивалентном генераторах. Следовательно, разграничение режимов внутреннего и внешнего ОЗЗ на основе составляющих напряжения нулевой последовательности невозможно. Поэтому защита от ОЗЗ генератора, работающего на сборные шины, использующая в качестве информационных сигналов основную и третью гармоники напряжения нулевой последовательности, не будет удовлетворять требованиям селективности.

Защита, контролирующая низкочастотную гармонику, инжектируемую в сеть. Из-за технического несовершенства защит, контролирующих естественные гармоники, генерируемые сетью, было предложено инжектировать в сеть искусственно созданные низкочастотные гармонические сигналы (в России, как правило, гармоники частоты 25 Гц) [16, 17]. Источник гармоники включают последовательно с дугогасящей катушкой (рис. 4), а в качестве характеристической величины

$$\zeta = I_{P,v}^{(0)} \quad (v = 0,5)$$

используется действующее значение инжектируемой гармоники частоты 25 Гц тока нулевой последовательности, измеренное на фазных выводах защищаемого генератора.

За базисное значение напряжения принимается ЭДС источника тока частоты 25 Гц

$$\underline{U}_{\text{base},v} = \underline{E}_s, \quad (10)$$

а базисное значение проводимости рассчитывается по формуле (8) [18] для $v = 0,5$

$$\underline{Y}_{\text{base},v} = j0,5\omega_1 C_G.$$

Тогда базисное значение тока

$$\underline{I}_{\text{base},v} = \underline{Y}_{\text{base},v} \underline{U}_{\text{base},v} = j0,5\omega_1 C_G \underline{E}_s.$$

С учётом выражения (10) ЭДС источника в схемах рис. 4

$$\underline{E}_s^* = 1.$$

Относительные поперечные проводимости эквивалентного генератора k_E и внешней сети k_B будут определяться согласно выражениям (2) и (3) в [18], а дугогасящей катушки $k_{L,v}$ – по выражению (11) в [18] с учётом $v = 0,5$.

Инжектируемая гармоника тока на фазных выводах с учётом связи (12) в [18] между проводимостью дугогасящей катушки $k_{L,v}$ и суммарной проводимостью сети $(1 + k_E + k_B)$ в нормальном режиме (рис. 4, а) равна

$$(I_{P,v}^{(0)})_{\text{norm}} = -\frac{k_{L,v}}{1 + k_E + k_B + k_{L,v}} = \frac{k_{R,v}}{1 - k_{R,v}}, \quad (11)$$

при внутреннем ОЗЗ (рис. 4, б) –

$$(I_{P,v}^{(0)})_{\text{int}} = -k_{L,v} = (1 + k_E + k_B)k_{R,v}, \quad (12)$$

при внешнем ОЗЗ (рис. 4, в) –

$$(I_{P,v}^{(0)})_{\text{ext}} = 0.$$

При условии полной компенсации ёмкостного тока на основной гармонике ($k_R = 1$) с учётом формулы (13) в [18] получим выражения для токов (11) и (12) в нормальном режиме

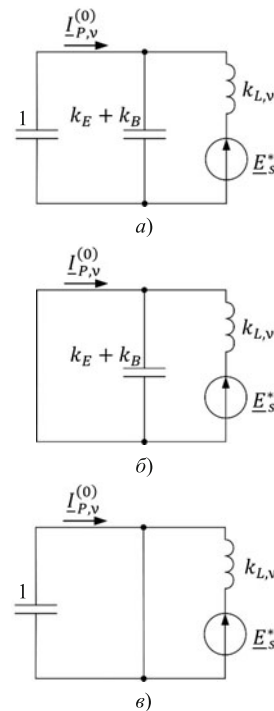


Рис. 4. Схема замещения электрической сети при действии только источника инжектируемой гармоники в нормальном режиме (а), при внутреннем (б) и внешнем (в) ОЗЗ

$$(I_{P,v}^{(0)})_{\text{norm}} = -\frac{4}{3}$$

и при внутреннем ОЗЗ

$$(I_{P,v}^{(0)})_{\text{int}} = 4(1 + k_E + k_B).$$

Отсюда видно, что защита обеспечивает селективность и чувствительность во всем диапазоне изменения параметров.

Таким образом, защиты, контролирующие гармонику тока непромышленной частоты [16, 17], обеспечивают необходимую чувствительность и селективность, но требуют установки дополнительного дорогостоящего источника гармоники, влияющего на качество электрической энергии и характеристики точности других устройств РЗА.

Выводы

1. Исследования информационных основ алгоритмов защит от ОЗЗ статора генератора, работающего на сборные шины, показывают, что наиболее эффективен алгоритм, основанный на контроле гармоники, инжектируемой в сеть. Однако применение этих защит требует установки в сеть дополнительного оборудования и приводит к ухудшению качества электроэнергии и характеристик других устройств РЗА.

2. Всё информационное богатство высших гармоник может быть реализовано в полной мере за

щитами генератора от ОЗЗ, обладающими способностью оценивать уровень гармоник на фоне существенно преобладающей основной гармоники в режимах сети с широким диапазоном изменения частоты.

Список литературы

1. Антонов, В. И. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих [Текст] / В. И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1 (22). – С. 17 – 26.
2. Антонов, В. И. Оценка гармоник электрической величины на фоне преобладающего гармонического спектра шума [Текст] / В. И. Антонов [и др.] // Электричество. – 2014. – № 5. – С. 29 – 33.
3. Солдатов, А. В. Особенности реализации защит от замыканий на землю в электрической сети с широким диапазоном изменения частоты [Текст]: материалы 9-й Всерос. научн.-техн. конф. “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике” / А. В. Солдатов [и др.]. – Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 2014. – С. 242 – 245.
4. Иванов, Н. Г. Оценка частоты сети в цифровых системах РЗА по переходу через нуль: характеристики точности [Текст] / Н. Г. Иванов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 4. – С. 22 – 25.
5. Антонов, В. И. Фильтры симметричных составляющих с широким рабочим диапазоном частот для цифровой релейной защиты [Текст]: материалы 12-й Всерос. научн.-техн. конф. “Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем” / В. И. Антонов [и др.]. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 388 – 391.
6. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики [Текст] / В. И. Антонов [и др.] // Электротехника. – 2015. – № 7. – С. 28 – 35.
7. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и её приложения в интеллектуальной электроэнергетике [Текст] / В. И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 334 с.
8. Антонов, В. И. Распознавание слабых гармонических составляющих сигналов в защите генератора от однофазного замыкания на землю [Текст] / В. И. Антонов [и др.] // Электрические станции. – 2018. – № 1. – С. 52 – 55.
9. Антонов, В. И. Адаптивное распознавание неразличимой информационной слагаемой на фоне преобладающих составляющих сигнала [Текст]: материалы 10-й Всерос. научн.-техн. конф. “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике” / В. И. Антонов [и др.]. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 241 – 243.
10. Дмитренко, А. М. О расчёте токов небаланса дифференциальных защит трансформаторов с использованием обобщённых параметров трансформаторов тока [Текст]: материалы 8-й междунар. научн.-техн. конф. “Электроэнергетика глазами молодежи – 2017” / А. М. Дмитренко [и др.]. – Самара, 02 – 06 окт. 2017. – Т. 1. – С. 397 – 400.
11. Сирота, И. М. Защита от замыканий на землю в электрических системах [Текст] / И. М. Сирота. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 209 с.
12. Schlake, R. L. Performance of third harmonic ground fault protection schemes for generator stator windings [Text] / R. L. Schlake, G. W. Buckley, G. McPherson // IEEE Transactions on PAS. – 1981. – Vol. 100. – No. 7. – P. 3195 – 3202.
13. Глазырин, В. Е. Расчёт уставок микропроцессорной релейной защиты блока генератор-трансформатор [Текст]: учеб. пособие / В. Е. Глазырин, А. И. Шалин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 130 с.
14. Правила устройства электроустановок [Текст]: 7-е издание. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2008. – 701 с.
15. Кискачи, В. М. Использование гармоник э.д.с. генераторов энергоблоков при выполнении защиты от замыканий на землю [Текст] / В. М. Кискачи // Электричество. – 1974. – № 2. – С. 24 – 29.
16. Вайнштейн, Р. А. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири [Текст] / Р. А. Вайнштейн [и др.] // Электрические станции. – 2009. – № 12. – С. 26 – 30.
17. Blánquez, F. R. On-line stator ground-fault location method for synchronous generators based on 100% stator low-frequency injection protection [Text] / F. R. Blánquez [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2015. – № 125. – P. 34 – 44.
18. Солдатов, А. В. Информационные основы алгоритмов защиты 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.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

С начала 2016 г. редакция журнала «Электрические станции» принимает статьи только через сайт журнала: www.elst.energy-journals.ru (статьи в журнал «Энергохозяйство за рубежом» – через сайт: www.ehz.energy-journals.ru). Пожалуйста, зарегистрируйтесь как автор на сайте и передайте статью, следуя пошаговой инструкции. Если что-то не будет получаться, обращайтесь в редакцию.

Передав статью через сайт, вы будете наблюдать весь путь прохождения своей статьи – от рецензии до вёрстки! Вы сможете внести правки после редактирования, посмотреть вёрстку и сделать свои замечания, предложения и др.

Редакция