

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

О проблеме “котельнизации” России

Прогноз времени живучести для экспрессной оценки ресурсных характеристик металла деталей паропроводов из стали 10Х9МФБ-Ш

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Электромагнитная совместимость аппаратуры локационного мониторинга линий электропередачи с высокочастотной аппаратурой технологической связи

Расчёт теплоотдачи с поверхности неизолированных проводов нового поколения

По поводу статьи “О возможности снижения наведённого напряжения на месте проведения ремонтных работ”

ОБОРУДОВАНИЕ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Восстановительный ремонт рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин методом лазерной наплавки

ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА, РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины. Часть I. Универсальная модель сети

Инновационный адаптивный комплекс автоматики ликвидации асинхронного режима электроэнергетического объекта

ХРОНИКА

Кармановской ГРЭС – 50 лет

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний

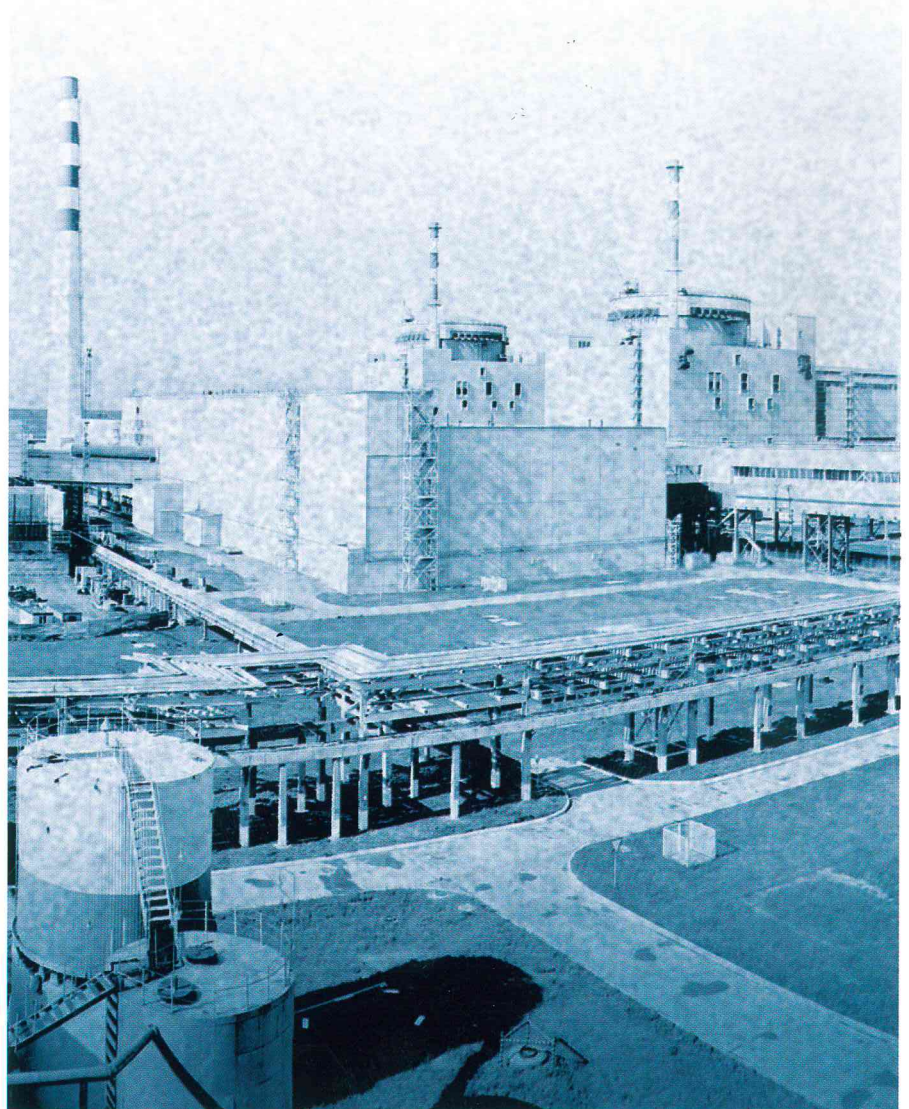
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2019 1



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., Кошечев 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 28.12.2018
Подписано в печать 22.01.2019
Дата выхода в свет 25.01.2019
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 1

Издаётся
с января 1930 г.
1050-й выпуск
с начала издания

С НОВЫМ ГОДОМ!

Содержание

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- Березинец П. А.** О проблеме “котельнизации” России 2
Гладштейн В. И., Троицкий А. И. Прогноз времени живучести для экспрессной оценки ресурсных характеристик металла деталей паропроводов из стали 10Х9МФБ-Ш 8

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

- Минуллин Р. Г.** Электромагнитная совместимость аппаратуры локационного мониторинга линий электропередачи с высокочастотной аппаратурой технологической связи 16
Шакиров Р. Г., Федоров Н. А. Расчёт теплоотдачи с поверхности неизолированных проводов нового поколения 28
Тигунцев С. Г., Ахмедов С. Б., Турдиев А. Т., Шеркунков М. А. По поводу статьи “О возможности снижения наведённого напряжения на месте проведения ремонтных работ” 33

ОБОРУДОВАНИЕ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

- Настека Д. В., Грачев О. Е., Силевич В. М., Лебедева А. И.** Восстановительный ремонт рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин методом лазерной наплавки 39

ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА, РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

- Солдатов А. В., Наумов В. А., Антонов В. И., Александрова М. И., Лифантьев А. В.** Информационные основы алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю генератора, работающего на сборные шины. Часть I. Универсальная модель сети 45
Илюшин П. В., Мокеев А. В., Наровлянский В. Г. Инновационный адаптивный комплекс автоматiki ликвидации асинхронного режима электроэнергетического объекта 52

ХРОНИКА

- Кармановской ГРЭС – 50 лет.** 59
Новости электротехнических и электроэнергетических компаний 60

- Ю. А. Радин** (К 70-летию со дня рождения) 15

- Content, Abstracts, Keywords** 71
Правила оформления рукописи статьи 72

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

Часть I. Универсальная модель сети

- **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.**¹, ООО “НПП “Экра”, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Лифантьев А. В.**, Казанская ТЭЦ-2 – филиал АО “Татэнерго”, Республика Татарстан, Казань

Изложена новая методика исследования информационных основ алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины. Основу методики составляет универсальная модель электрической сети, сохраняющая общность при анализе информационных сигналов защиты любой частоты. Это основополагающее свойство модели достигается за счёт представления параметров элементов сети и электрических величин в относительных единицах, выбирая за базисные значения ёмкостную проводимость и действующее значение ЭДС защищаемого генератора на частоте информационного сигнала. Анализ информационной ценности электрических величин и их компонентов в различных режимах работы защищаемого генератора и оценка эффективности их использования в защитах позволяют исследовать с единых позиций основные свойства алгоритмов защит.

Ключевые слова: информационные основы алгоритмов защит, информационные сигналы защит, однофазное замыкание на землю генератора, универсальная модель электрической сети.

Обеспечение селективности защиты от однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) обмотки статора генератора, работающего на сборные шины, представляет сложную задачу, поскольку на сборные шины станции работают несколько генераторов, и существует гальваническая связь с электрической сетью потребителей. Одновременно с этим защита должна быть чувствительна к ОЗЗ в любой точке обмотки статора генератора, в том числе и вблизи нейтрали. Правда, высокого быстродействия при этом не требуется: отключение повреждённого генератора от сборных шин осуществляется за время порядка 0,5 с [1].

Исследованию защит от ОЗЗ статора генератора посвящено множество работ [2 – 9], однако единый подход к анализу алгоритмов защит не сложился. Это препятствует определению стратегии развития защит от ОЗЗ статора генератора, работающего на сборные шины. В связи с этим существует настоятельная необходимость анализа алго-

ритмов защит от ОЗЗ генератора с единых позиций.

Целью настоящей работы является исследование информационных основ алгоритмов защит от ОЗЗ генераторов и выявление наиболее перспективных алгоритмов для применения в новых поколениях адаптивных защит от ОЗЗ статора генератора, работающего на сборные шины.

Для целей статьи под адаптивными защитами понимаются функции релейной защиты, способные изменять характеристики и алгоритмы своего функционирования в зависимости от состояния сети и, как правило, реализованные в интеллектуальных электронных устройствах. Под информационными основами подразумевается совокупность информационных сигналов, принципов их выделения и использования в защитах. Понятие информационного сигнала используется для определения слагаемой первичной электрической величины, преобразуемой в защите определённым образом в характеристическую величину. Контролируя характеристическую величину, защита распознаёт режим работы электрической сети.

¹ Александрова Марина Ивановна: alexandrova_mi@ekra.ru

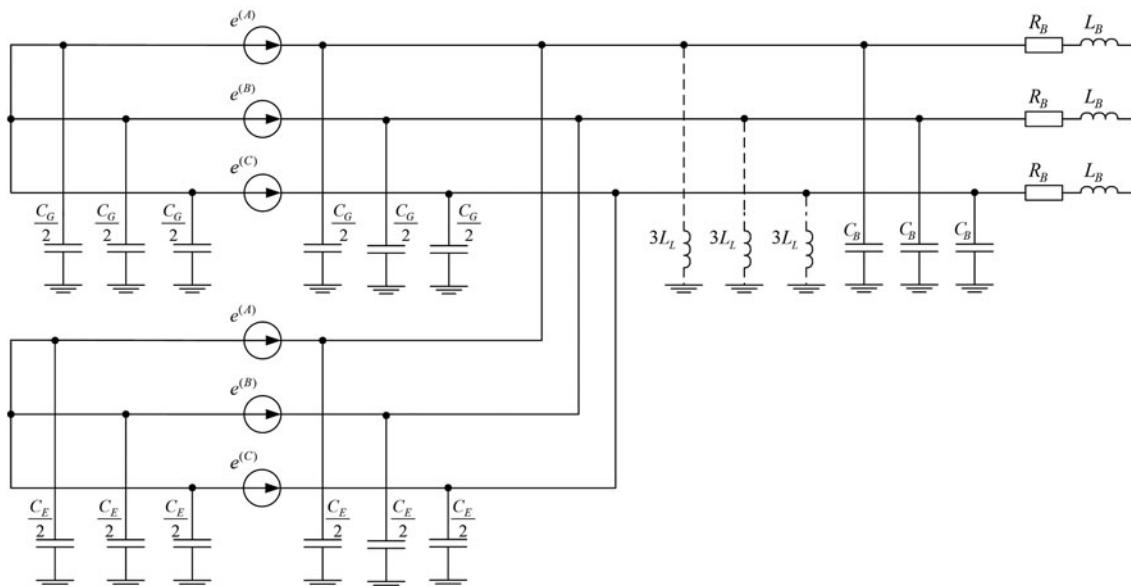


Рис. 1. Схема замещения электрической сети

Исследование информационных основ алгоритмов защит включает в себя анализ информационных сигналов с точки зрения распознавания режимов сети и анализ принципов выделения и использования их для оценки основных свойств защит (чувствительности, селективности, быстродействия).

При анализе чувствительности защиты от ОЗЗ генератора оценивается предельная ширина зоны выявления повреждения обмотки статора защищаемого генератора во всём возможном диапазоне изменения параметров сети. В качестве меры чувствительности защиты принимается коэффициент чувствительности K_S , определяемый, как минимальное значение отношения характеристической величины ζ к порогу срабатывания ζ_{th} защиты:

$$K_S = \min \left| \frac{\zeta}{\zeta_{th}} \right|.$$

При анализе селективности защиты проверяется её отстройка от излишнего срабатывания в нормальном режиме и при внешних ОЗЗ в расчётном диапазоне изменения параметров элементов сети.

Поскольку требования к времени срабатывания защит от ОЗЗ генератора не предъявляются, то быстродействие защит в данной работе не оценивается.

В работе рассматриваются только металлические ОЗЗ. Дуговые замыкания не обсуждаются, поскольку поведение электрической сети при этом виде повреждения в корне отличается от поведения при металлических ОЗЗ и требует отдельных исследований.

Статья состоит из трёх частей. В первой части рассматривается универсальная модель сети, во второй части исследуются информационные основы алгоритмов, использующих составляющие ну-

левой последовательности, а в третьей – алгоритмов, использующих высшие гармоники тока.

Схема замещения электрической сети. При формировании схемы замещения генераторная сеть со сборными шинами эквивалентруется относительно выводов защищаемого генератора (рис. 1). Полагается, что система полностью симметрична.

Источниками высших гармоник в сети с генераторами, работающими на сборные шины, являются сами генераторы и нагрузка. Появление гармоник от обоих видов источников обусловлено нелинейностью их характеристик. Схема замещения сети для каждой из гармоник будет состоять только из линейных элементов, поскольку нелинейный элемент сети, порождающий эту гармонику, – будь то генератор или нагрузка – будет учтён соответствующим источником этой гармоники, включённым вместо нелинейного элемента, с учётом его линеаризованных характеристик.

Принимается, что сеть высшего напряжения не является источником высших гармоник и генерирует лишь основную гармонику.

В защитах от ОЗЗ генератора, работающего на сборные шины, напряжения и токи измеряются в нейтральных и фазных выводах защищаемого генератора. При внешних ОЗЗ информационные сигналы, например, высшие гармоники тока нулевой последовательности, главным образом обусловлены ЭДС источников гармоник самого защищаемого генератора и определяются в основном собственными ёмкостными токами защищаемого генератора и практически не зависят от места ОЗЗ и источников гармоник в сети. В случае внутреннего ОЗЗ токи от ёмкостных проводимостей всей сети текут в защищаемый генератор, и уровень информационных сигналов в месте измерения опре-

деляется практически значениями ёмкостных токов внешней сети. Однако по критерию чувствительности защиты расчётным будет режим, когда уровень ёмкостных токов внешней сети будет минимальным, т.е. внешние источники гармоник отсутствуют. Поэтому при анализе информационных основ алгоритмов защит источники гармоник внешней сети обычно не учитываются.

Все источники гармоник, действующие в сети, в схеме замещения представляются в виде двух генераторов: защищаемого и эквивалентного.

Защищаемый и эквивалентный генераторы учитываются П-образной схемой замещения. Поперечные ветви генераторов в схеме замещения представляются соответствующими ёмкостями $C_G/2$ и $C_E/2$, а продольные – индуктивностями рассеяния L_G и L_E . Поскольку энергия источников гармоник в основном сосредоточена в низкочастотной области, предполагается, что индуктивные сопротивления продольных ветвей не оказывают существенного влияния на уровень токов в месте ОЗЗ. Однако соотношение между сопротивлениями продольных ветвей оказывает влияние на распределение токов между генераторами, что учитывается при расчётах коэффициентом распределения

$$k_D = \frac{L_G}{L_E}. \quad (1)$$

ЭДС защищаемого и эквивалентного генераторов принимаются одинаковыми и представляются источниками трёхфазного полигармонического сигнала [10]

$$\begin{cases} e^{(A)}(t) \\ e^{(B)}(t) \\ e^{(C)}(t) \end{cases} = \sum_{v=1,3,5,\dots} E_v \begin{cases} \sin(v\omega_1 t) \\ \sin\left[v\left(\omega_1 t + \frac{4}{3}\pi\right)\right] \\ \sin\left[v\left(\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi\right)\right] \end{cases}, \quad (2)$$

где ω_1 – угловая частота основной гармоники; E_v – амплитуда ЭДС гармоники. Элементы сети (токоограничивающие реакторы, индуктивности линий электропередачи), значения продольных сопротивлений которых растут в схемах для высших гармоник, учитываются в эквивалентной нагрузке. Эквивалентная нагрузка представлена Г-образной схемой с активным сопротивлением R_B и индуктивностью L_B продольной ветви и ёмкостью C_B относительно земли.

Удобно все ёмкости схемы электрической сети выразить через поперечную ёмкость фазы защищаемого генератора. Тогда ёмкости эквивалентного генератора

$$C_E = k_E C_G, \quad (3)$$

эквивалентной нагрузки

$$C_B = k_B C_G \quad (4)$$

и суммарная фазная ёмкость всей сети может быть выражена через ёмкость защищаемого генератора

$$C_\Sigma = C_G(1 + k_E + k_B), \quad (5)$$

где k_E и k_B – относительные величины ёмкостей эквивалентного генератора и поперечных ветвей эквивалентной нагрузки.

Режим нейтрали в генераторной сети со сборными шинами определяется дугогасящими реакторами, подключёнными к шинам через нейтралеобразующие трансформаторы. Дугогасящие реакторы работают только в схемах замещения гармоник нулевой последовательности и не учитываются в работе схем прямой и обратной последовательностей. Индуктивности рассеяния нейтралеобразующих трансформаторов в расчётах учитываются в индуктивности эквивалентного дугогасящего реактора.

В трёхфазной схеме замещения (рис. 1) дугогасящий реактор условно включён в каждую фазу и изображён пунктирной линией в виде индуктивности. Она зависит от суммарной ёмкости фазы сети (5) и коэффициента компенсации k_R ёмкостных токов на частоте ω_1 основной гармоники и равна

$$L_L = \frac{1}{3k_R\omega_1^2 C_\Sigma}. \quad (6)$$

В сетях с изолированной нейтралью дугогасящие реакторы отсутствуют, и $k_R = 0$. В сетях с компенсированной нейтралью индуктивная проводимость дугогасящего реактора на частоте основной гармоники теоретически должна быть равна суммарной ёмкостной проводимости всей сети, т.е. $k_R = 1$. Однако в реальности всегда присутствует расстройка компенсации, и $k_R \neq 1$. Величина допустимой расстройки определяется ПУЭ [1] и зависит от класса напряжения сети.

Параметры элементов схем замещения удобно представлять в относительных единицах, принимая для каждой v -й гармоники за базисные значения вектор ЭДС особой фазы f

$$\underline{U}_{base,v} = \underline{E}_v^{(f)} \quad (7)$$

и суммарную проводимость поперечных ветвей фазы защищаемого генератора

$$\underline{Y}_{base,v} = jv\omega_1 C_G \quad (8)$$

на соответствующей гармонике. Поэтому базисное значение тока для v -й гармоники

$$\underline{I}_{base,v} = \underline{Y}_{base,v} \underline{U}_{base,v} = jv\omega_1 C_G \underline{E}_v^{(f)}. \quad (9)$$

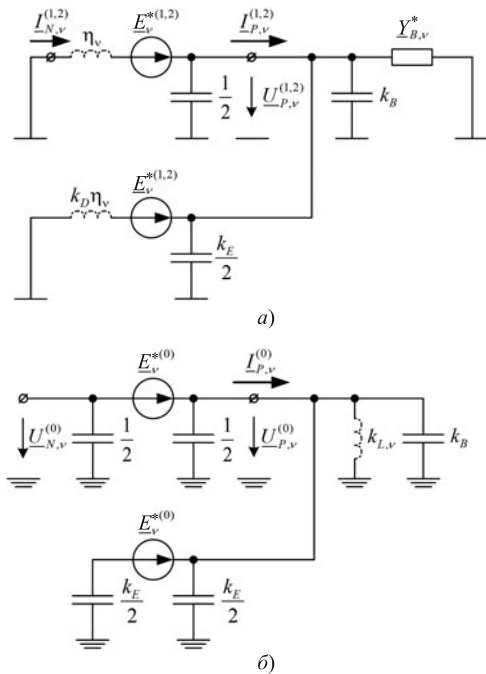


Рис. 2. Схема замещения электрической сети с параметрами в относительных единицах в нормальном режиме для гармоник прямой и обратной последовательностей (а) и для гармоник нулевой последовательности (б)

За особую фазу в нормальном режиме принимается фаза А, в режиме ОЗЗ – повреждённая фаза.

Из выражений (2) и (7) следует, что фазные ЭДС на v -й гармонике в относительных единицах будут равны

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_v^{*(f)} \\ \underline{E}_v^{*(f-1)} \\ \underline{E}_v^{*(f+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^{2v} \\ a^v \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – комплексный оператор поворота; (f) , $(f-1)$ и $(f+1)$ – обозначение особой, отстающей и опережающей фазы соответственно в трёхфазном чередовании А, В, С. Следовательно, комплексные значения ЭДС гармоник для прямой, обратной и нулевой последовательностей будут определяться через фазные ЭДС (10) как

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_v^{*(1)} \\ \underline{E}_v^{*(2)} \\ \underline{E}_v^{*(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{E}_v^{*(f)} \\ \underline{E}_v^{*(f-1)} \\ \underline{E}_v^{*(f+1)} \end{bmatrix}.$$

Влияние эквивалентного дугогасящего реактора на каждую из фаз сети характеризует относительная проводимость

$$k_{L,v} = \frac{Y_{L,v}}{Y_{base,v}} = -\frac{1}{3(v\omega_1)^2 C_G L_L}, \quad (11)$$

которая с учётом выражений (5) и (6) может быть вычислена через относительные ёмкостные проводимости других элементов фазы сети

$$k_{L,v} = -\frac{k_R C_\Sigma}{v^2 C_G} = -k_{R,v}(1 + k_E + k_B), \quad (12)$$

где

$$k_{R,v} = \frac{k_R}{v^2} \quad (13)$$

– коэффициент компенсации ёмкостного тока сети на v -й гармонике.

От номера гармоники зависит и проводимость эквивалентной нагрузки

$$\underline{Y}_{B,v}^* = \frac{Y_{B,v}}{Y_{base,v}}.$$

С учётом формулы (8) можно определить относительную продольную проводимость защищаемого генератора

$$\eta_v = -\frac{1}{(v\omega_1)^2 L_G C_G},$$

а с учётом выражения (1) – эквивалентного генератора

$$\eta_{E,v} = -\frac{1}{(v\omega_1)^2 L_E C_G} = k_D \eta_v.$$

Как уже говорилось ранее, эти проводимости определяют распределение токов между генераторами.

Представляя элементы сети в базисе проводимости (8) и расчётные значения напряжений и токов в относительных единицах с учётом базисных значений (7) и (9), получим схемы замещения для расчёта информационных сигналов защит от ОЗЗ в нормальном режиме (рис. 2) и при ОЗЗ (рис. 3). В схемах замещения все параметры ёмкостных элементов уже не зависят от частоты, т.е. эти схемы замещения становятся универсальными моделями сети.

Аргументы гармоник фазных ЭДС зависят от их номера, в связи с чем гармоники ЭДС образуют прямую ($v = 1, 7, 13, \dots$), обратную ($v = 5, 11, 17, \dots$) и нулевую ($v = 3, 9, 15, \dots$) последовательности. Поэтому для расчёта токов и напряжений отдельных гармоник нормального режима используются однолинейные схемы замещения соответствующих последовательностей (рис. 2). Например, ЭДС 3-й гармоники, будучи источником нулевой последовательности, работает только в схеме нулевой последовательности, а ЭДС 5-й (7-й) гармоники как источник обратной (прямой) последовательности – только в схеме обратной (прямой) последовательности.

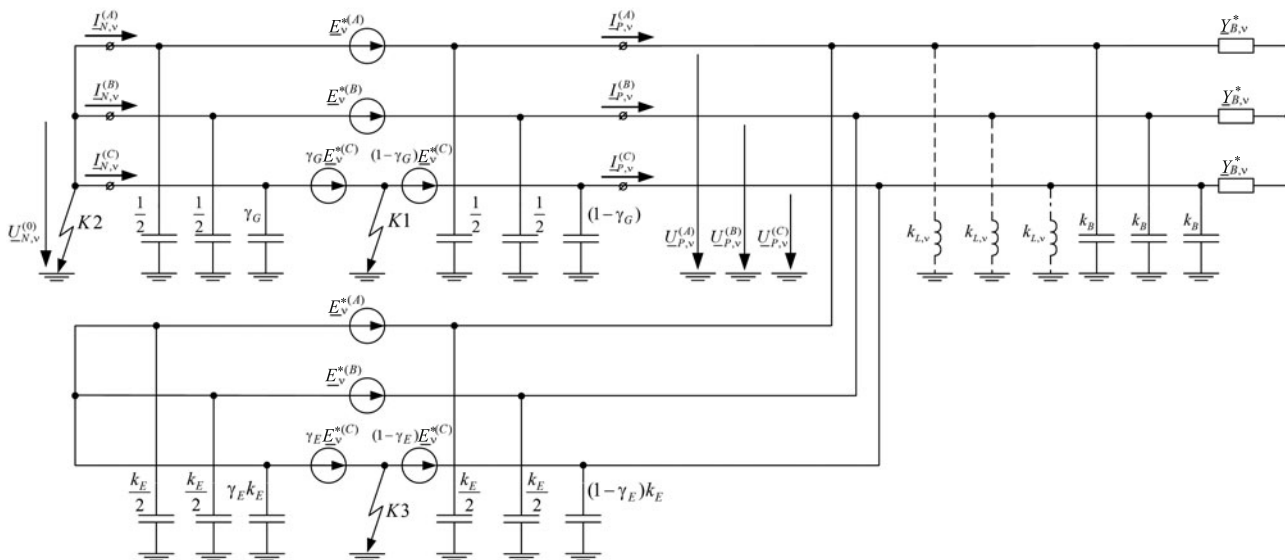


Рис. 3. Схема замещения электрической сети с параметрами в относительных единицах при различных ОЗЗ: внутреннем ($K1$), в нейтрали защищаемого генератора ($K2$) и внешнем ($K3$)

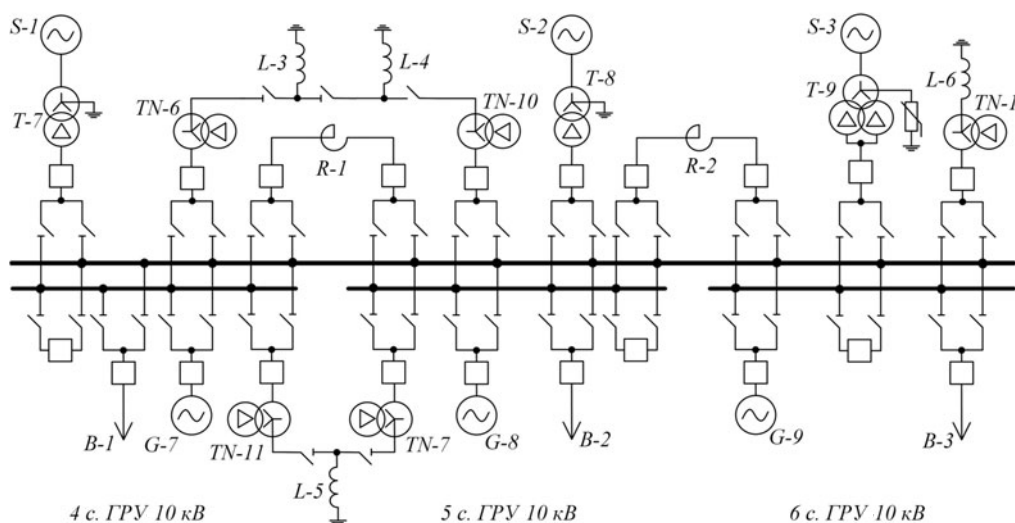


Рис. 4. Схема сборных шин 4-й, 5-й и 6-й секций Казанской ТЭЦ-2:

$G-7 - G-9$ – генераторы; $T-7 - T-9$ – силовые трансформаторы; $TN-1, TN-6, TN-7, TN-10, TN-11$ – нейтралеобразующие трансформаторы; $R-1, R-2$ – токоограничивающие реакторы; $L-3 - L-6$ – дугогасящие реакторы; $B-1, B-2, B-3$ – эквивалентированная нагрузка 4-й, 5-й, и 6-й секции соответственно; $S-1 - S-3$ – источники внешней электрической сети

В режиме ОЗЗ сеть несимметрична, и расчёт гармоник токов и напряжений по однолинейным схемам последовательностей усложняется. Поэтому расчёт удобно проводить на основе трёхфазной схемы замещения сети (рис. 3). Расположения ОЗЗ в защищаемом и эквивалентном генераторах задаются относительными электрическими расстояниями γ_G и γ_E соответственно, отсчитываемыми от нейтрали генераторов. Замыкания в сети потребителя воспринимаются защитами как разновидность ОЗЗ в обмотке эквивалентного генератора и отдельно не рассматриваются.

Пример расчёта параметров схемы замещения. Приведём пример построения универсальной

модели для Казанской ТЭЦ-2 (рис. 4), параметры оборудования 4-й, 5-й и 6-й секций которой сведены в табл. 1 – 5.

Эквивалентная индуктивность всех включённых дугогасящих катушек в режиме работы с одним генератором $G-7$ минимальна, когда ёмкость эквивалентной нагрузки сети максимальна. Из табл. 3 следует, что $L_{\Sigma \min} = 0,0608$ Гн. Тогда ёмкость сети

$$C_{B \max} = C_{\Sigma} - C_G = \frac{1}{3\omega_1^2 L_{\Sigma \min}} - C_G = 55,3 \text{ мкФ.}$$

Согласно (4) максимальное значение относительной проводимости k_B равно

Таблица 1

Параметры генераторов

Обозначение	Марка	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	$U_{\text{ном}}$, кВ	R , мОм	X_d , отн. ед.	L_d , мГн	C , мкФ	q	α , град	β
<i>G-7</i>	ТВФ-63-2	78,75	10,5	2,19	2,2	9,804	0,2	12	27,45	0,833
<i>G-8, G-9</i>	ТВФ-60-2	75	10,5	4,34	1,7	7,955	0,21	12	27,45	0,833

Примечание: $S_{\text{ном}}$ – номинальная полная мощность; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение; R – активное сопротивление; X_d (L_d) – синхронное индуктивное сопротивление (индуктивность) по продольной оси; C – ёмкость на фазу; q – число пазов на полюс и фазу; α – половина угловой длины, на которой располагается обмотка возбуждения; β – относительный шаг обмотки по отношению к полюсному делению.

Таблица 2

Параметры силовых трансформаторов

Обозначение	Марка	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	$U_{\text{ном. нн}}$, кВ	ΔP_k , кВт	U_k , %	R_t , мОм	L_t , мГн
<i>T-7, T-9</i>	ТРДН-63000	63	10,5	245	10	6,806	0,557
<i>T-8</i>	ТРДН-63000	63	10,5	275,38	10,87	7,649	0,605

Примечание: $S_{\text{ном}}$ – номинальная полная мощность; $U_{\text{ном. нн}}$ – номинальное напряжение стороны низшего напряжения; ΔP_k – потери активной мощности короткого замыкания; U_k – напряжение короткого замыкания; R_t – активное сопротивление; L_t – индуктивность.

Таблица 3

Параметры дугогасящих реакторов

Обозначение	Марка	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	$U_{\text{ном}}$, кВ	$I_{\text{комп}}$, А	L , Гн
<i>L-3</i>	ЗРОМ-300/10	300	10	25 – 50	0,3676 – 0,7351
<i>L-4</i>	ЗРОМ-500/10	500	10	50 – 100	0,1838 – 0,3676
<i>L-5, L-6</i>	РДМР-485/10	485	10,5	10 – 80	0,2412 – 1,9297

Примечание: $S_{\text{ном}}$ – номинальная полная мощность; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение; $I_{\text{комп}}$ – максимальный ток компенсации; L – индуктивность.

Таблица 4

Параметры нейтрализирующих трансформаторов

Обозначение	Марка	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	$U_{\text{ном}}$, кВ	ΔP_k , кВт	U_k , %	R_t , Ом	L_t , мГн
<i>TN-1</i>	ТМПС-250/10	0,25	10,5	2,84	4,5	5,010	63,169
<i>TN-6</i>	ТМ-5600/35	5,6	10,5	41	8	0,144	5,013
<i>TN-7</i>	ТДНС-16000/20000	16	10,5	81	12	0,035	2,632
<i>TN-10, TN-11</i>	ТД-10000/35	10	10,5	93,6	10	0,103	3,509

Примечание: $S_{\text{ном}}$ – номинальная полная мощность; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение стороны низшего напряжения; ΔP_k – потери активной мощности короткого замыкания; U_k – напряжение короткого замыкания; R_t – активное сопротивление; L_t – индуктивность.

Таблица 5

Параметры токоограничивающих реакторов

Обозначение	Марка	$Q_{\text{ном}}$, Мвар	$U_{\text{ном}}$, кВ	L , мГн
<i>R-1</i>	РТСТ-10	50	10	6,366
<i>R-2</i>	РТСТ-10	42	10	7,579

Примечание: $Q_{\text{ном}}$ – номинальная реактивная мощность; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение; L – индуктивность.

Таблица 6

Параметры схемы замещения при различном числе генераторов

Работающие на сборные шины генераторы	k_D	k_E	k_B	k_R
G-7	0	0	0 – 276,8	1
G-7 и G-8	1,23	1,05		
G-7, G-8 и G-9	2,47	2,1		

$$k_{B \max} = \frac{C_{B \max}}{C_G} = 276,8.$$

Значение коэффициентов k_D и k_E рассчитываются по выражениям (1) и (3) в зависимости от числа работающих генераторов.

Значения параметров схемы замещения сведены в табл. 6.

Расчёт уровня гармоник ЭДС приведён в [11], результаты расчёта – относительный уровень ЭДС гармоник генераторов – представлены далее.

v	$E_{G,v}^*$
1	1,0
3	0,116883
5	0,003181
7	0,000362
9	0,004116
11	0,001437
13	0,000057
15	0,000794

Выводы

Для анализа информационных основ защит от ОЗЗ в генераторе предлагается новая модель сети с генераторами, работающими на сборные шины, использующая представление параметров элементов сети и электрических величин в относительных единицах. Модель является универсальной и позволяет анализировать информационные сигналы любой частоты. Это основополагающее свой-

ство универсальной модели достигается за счёт выбора за базисные значения ёмкостной проводимости и действующего значения ЭДС защищаемого генератора на частоте информационного сигнала.

Список литературы

1. *Правила устройства электроустановок* [Текст]: 7-е изд. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2008. – 701 с.
2. *Шуин, В. А.* Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ [Текст] / В. А. Шуин, А. В. Гусенков // Библиотечка электротехника. – 2001. – № 11 (35). – 103 с.
3. *Сирота, И. М.* Защита от замыканий на землю в электрических системах [Текст] / И. М. Сирота. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 209 с.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *Blázquez, F. R.* On-line stator ground-fault location method for synchronous generators based on 100% stator low-frequency injection protection [Text] / F. R. Blázquez [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2015. – № 125. – P. 34 – 44.
9. *Романов, Ю. В.* Цифровая защита от замыканий на землю в обмотке статора синхронного генератора, работающего на сборные шины [Текст] / Ю. В. Романов // Релейщик. – 2014. – № 4. – С. 4 – 7.
10. *Солдатов, А. В.* Высшие гармоники тока синхронного генератора как информационные сигналы релейной защиты [Текст]: матер. 11-й Всерос. науч.-техн. конф. “Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем” / А. В. Солдатов [и др.]. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 380 – 385.
11. *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.