



ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Е.П. Сафонов*, В.Я. Фролов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588> ,
safonov_ep@spbstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ: Рассмотреть проблемы эксплуатации генераторных выключателей, в частности проблемы больших аperiodических составляющих токов КЗ и длительных задержек нуля тока. Провести анализ и предложить методы решения этих проблем. На основании анализа разработать схему замещения электростанции, которая должна продемонстрировать упомянутые проблемы и эффективность предложенных методов для решения этих проблем. МЕТОДЫ: Для моделирования переходных процессов в электрических цепях использовался программный пакет Matlab Simulink РЕЗУЛЬТАТЫ: Была предложена и разработана схема замещения электростанции позволяющая моделировать отключение токов подпитки короткого замыкания от синхронного генератора. Получены осциллограммы токов короткого замыкания, описывающие проблему большой аperiodической составляющей и задержки нуля токов. Предложено решение о шунтировании механических контактов генераторного выключателя шунтирующей тиристорно-позисторной приставки. В рамках схемы замещения была разработана модель позисторной приставки. Продемонстрированы осциллограммы токов короткого замыкания, демонстрирующие демпфирование аperiodической составляющей от позисторного эффекта ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Результаты моделирования показали, что эффект длительных задержек нуля тока (когда ток не переходит нуль при ближайшем его минимуме) не характерен для мощных синхронных генераторов. Данный эффект может возникать при работе синхронного генератора в режиме компенсатора реактивной мощности и если при это отсутствует какое-либо дополнительное демпфирующее сопротивление. Применение позисторного эффекта в контактно-тиристорном генераторном выключателе позволяет снизить энергию тока КЗ на ~25% и полностью обезопасить выключатель от пропуска нулей тока. Это позволит повысить надежность эксплуатации тиристорного шунта.

Ключевые слова: короткое замыкание, генераторный выключатель, позистор, аperiodическая составляющая, задержка нуля тока, тиристор.

Для цитирования: Сафонов Е.П., Фролов В.Я. Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С.105-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118.

FEATURES OF FAULT TRANSIENTS IN GENERATOR NETWORK OF POWERFUL ELECTRIC POWER STATIONS

EP. Safonov*, VYa Frolov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588> ,
safonov_ep@spbstu.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the problems of generator circuit breaker. To consider the problems of high degree of asymmetry of short-circuit current and long delayed current zeros

in detail. Propose methods for solving these problems. Develop the equivalent electrical circuit model of electric power station. This model should demonstrate the above-mentioned problems and effectiveness of the proposed solving problems methods. **METHODS.** The fault transient's simulations have been performed by means of the software package Matlab Simulink. **RESULTS.** The equivalent electrical circuit model of electric power station was proposed and developed. This model allows simulating the short circuit currents from a synchronous generator. Short-circuit current waveforms are obtained. These waveforms describe the problem of high degree of asymmetry and long delayed current zeros phenomenon. Proposed decision on using thyristor-based hybrid circuit breaker with PTC-thermistor-based current limiting device. For equivalent electrical circuit the PTC-thermistor model was developed. Short-circuit current waveforms when applying PTC-thermistor-based current limiting device are obtained. **CONCLUSION.** The simulation results showed that the effect of long delayed current zeros (when the current does not pass zero at its nearest minimum) is not typical for high-power synchronous generators ($P_{SG} > 300$ MW). This effect can occur when the synchronous generator is operating in the reactive power compensation mode. At the same time, there should be no additional electric resistance (for example a gas electric arc). The use of PTC-thermistor for thyristor-based hybrid circuit breaker will reduce energy of short circuit current on ~25% and it will completely protect the circuit breaker from does not pass zero current. This will increase reliability of thyristor device for hybrid generator circuit breaker.

Keywords: short circuit; generator circuit breaker; PTC thermistor; aperiodic component; delayed current zeros.

For citation: Safonov EP, Frolov VYa. Features of fault transient's in generator network of powerful electric power stations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):105-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118.

Введение

Мировая тенденция повышения эффективности передачи электроэнергии и введение большого объема генерации от зеленой энергетики требует повышения гибкости управления всего энергетического комплекса [1, 2]. Важным аспектом этих мероприятий является необходимость к повышению частоты ввода и вывода генераторных агрегатов в работу с энергосистемой (ЭС) [3, 4]. Данное обстоятельство требует разработки новых генераторных выключателей (ГВ) с повышенной коммутационной износостойкостью при больших номинальных токах - 10-20 кА. Данная проблема особенно ярко выражена для ГАЭС и АЭС. Первая характеризуется относительно других типов электростанций высокой частотой коммутации генераторов, а вторая требует повышенной надежности при максимально высоких номинальных токах из-за высокой мощности энергоблоков.

Помимо высоких номинальных токов, эксплуатация генераторного выключателя также характеризуется рядом других проблем:

- Значительная продолжительность аperiodической составляющей тока КЗ СГ из-за особенности взаимодействия обмоток статора и индуктора;
- Высокие уровни максимальных токов КЗ от внешней энергосистемы;
- Включение СГ в противофазу с внешней ЭС;
- Большая скорость переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) при отключении КЗ в генераторной сети;

Всё это требует усложнения конструкции выключателя - повышение числа ступеней коммутации, применение предвключаемых и шунтирующих резисторов и т.д. В свою очередь это приводит к усложнению конструкции, тем самым снижая надежность эксплуатации выключателя.

Рассмотрим подробнее причины возникновения этих особенностей.

Источником возникновения первой проблемы является условия работы генератора непосредственно перед возникновением КЗ, а именно как много он потреблял или генерировал реактивной мощности [5]. Особенность зависимости величины аperiodической составляющей от потребляемой генератором реактивной мощности заключается в продольной намагничивающей реакции якоря [6]. Чем больше генератор потребляет реактивной мощности – тем больше аperiodическая составляющая токов КЗ генератора.

Для пояснения механизма данного явления на время предположим, что сопротивление обмотки возбуждения, якоря и демпфирующей обмотки (роль демпфирующей обмотки СГ выполняет массивное тело ротора) равно нулю. Согласно

теореме о постоянстве потокосцеплений, потокосцепление между упомянутыми обмотками должно оставаться неизменным после возникновения КЗ на генераторе. Следовательно, для поддержания постоянства потокосцепления после КЗ, в фазах обмотки должны возникать постоянные (или апериодические, если сопротивление обмоток не равно нулю) токи. Одним из условий для сохранения постоянства потокосцеплений как раз является совпадение магнитных потоков ротора и статора при намагничивающей реакции якоря [6].

В свою очередь потребление и генерация реактивной мощности генератором зависит от условий загрузки высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и параметров нагрузки потребителей или, иными словами, от параметров энергосистемы. При недогруженной ЛЭП, она является источником реактивной мощности и чем длиннее эта линия, тем большее количество этой мощности она генерирует.

Проблема апериодических составляющих и задержки нуля тока для отключения токов КЗ от ЭС не характерна т.к. повышающий трансформатор эффективно подавляет апериодическую составляющую токов подпитки КЗ от соседних СГ на электростанции [7].

Причина второй особенности относительно проста. Главными источниками токов КЗ со стороны внешней ЭС являются расположенные на этой же электростанции другие СГ [8]. т.к. для экономии ресурсов на одной электростанции стараются расположить как можно больше генерирующих агрегатов, то токи от внешней ЭС будут являться максимально возможными для мощных электростанций. Именно эти токи должны определять электродинамическую устойчивость оборудования генераторного напряжения.

Причиной возникновения третьей проблемы является включение генератора в момент сдвига фаз напряжения относительно подключаемой ЭС на 180 градусов [9]. В результате между СГ и ЭС возникают значительные уравнивающие токи, вызывающие на валу генератора значительные усилия. Отметим, что ток отключения генератора в таком режиме также могут иметь длительные задержки нуля тока. Рассмотрения данного режима работы для ГВ не является актуальной задачей, т.к. современные мощные электростанции имеют высокую степень ответственности за повреждение эксплуатируемого оборудования и для предотвращения возможности возникновения данного режима применяются относительно несложные, не требующих больших материальных затрат методы - метод точной синхронизации (использования специального синхронизирующего оборудования) и метод самосинхронизации (включение СГ в сеть без возбуждения) [10].

Источником четвертой проблемы является высокая величина отключаемого тока КЗ и обмотка НН повышающего трансформатора [11]. Из-за небольшого количества витков напряжение на фазу НН может составлять всего ~3-5 нФ [12]. Наличие этой ёмкости и определяет высокую начальную скорость ПВН при отключении КЗ в генераторной сети.

Наиболее критической проблемой является первая – значительные апериодические составляющие увеличивают время задержки нуля тока, тем самым увеличивая время горения дуги на контактах ГВ. В совокупности с большими значениями токов КЗ это вызывает значительную дуговую эрозию контактов, приводящую к сокращению коммутационного ресурса выключателя [13]. Именно первой проблеме посвящен материал статьи.

Эффективным методом уменьшения времени горения дуги является шунтирование механических контактов полупроводниковыми тиристорными или транзисторными устройствами [14, 15]. При размыкании контактов загорается электрическая дуга, под действием напряжения которой ток переходит из дугогасительного устройства выключателя в тиристорную приставку за относительно небольшое время, за которое не должно происходить значительного разрушения контактов. Далее ток в тиристорах переходит через нуль. Произошло успешное срабатывание выключателя. Ключ из транзисторов будет работать аналогичным образом, за исключением того что ему не нужно дожидаться нуля тока. Однако использование обоих типов полупроводниковых устройств может столкнуться с проблемой излишней стоимости их сборок. Сборка мощного тиристорного ключа будет весьма дорогостоящей, где для подавления апериодической составляющей КЗ необходимо будет использовать дорогостоящие батареи противотока, в то время как сборка транзисторного ключа будет требовать больших затрат из-за всё еще относительно высокой стоимости самого транзистора.

Ранее рассмотренная особенность – большая апериодическая составляющая – требует дополнительных решений при использовании тиристорных. Дело в том, что сопротивление шунтирующего тиристорного ключа должно специально быть выбрано намного меньше чем сопротивление электрической дуги на контактах для обеспечения быстрого перехода тока в тиристоры с минимальным горением дуги на контактах. Относительно небольшое сопротивление тиристорных может значительно увеличить время

задержки нуля тока. Необходимо рассмотреть ввод дополнительного сопротивления в шунтирующую тиристорную ветвь ГВ.

Для этого в рамках данной работы предлагается использовать позисторное устройство, последовательно присоединенным к тиристорному ключу. Использование позисторного устройства позволит улучшить условия коммутации токов короткого замыкания для тиристорного ключа. Основой этого устройства является полупроводниковый материал с позисторным эффектом – несмотря на известный факт того, что полупроводники с повышением температуры уменьшают своё сопротивление, среди полупроводников находятся химические соединения с обратным эффектом, когда при повышении температуры сопротивление резко возрастает. В данном случае уместно говорить о фазовом переходе материала «металл-диэлектрик» [16]. Основания идея применения позисторов заключается в следующем – протекающие по тиристорно-позисторной ветви ГВ токи КЗ разогреют позисторную приставку, увеличивая ее сопротивление, тем самым демпфируя апериодическую составляющую тока КЗ.

Наиболее распространенным позисторным материалом является титанат бария (BaTiO_3), преимущественно используемый в электронике в качестве защиты электрических компонентов устройства от токов перегрузки. Однако данный материал не подходит для рассматриваемого применения из-за высокого удельного сопротивления до фазового перехода «металл-диэлектрик» - порядком 100 Ом/см. Для сборки такого позисторного устройства для выключателя, которые способно было бы обеспечивать хотя бы равное с электрической дугой сопротивление до фазового перехода, будет необходимо использовать очень большое количество материала с множеством параллельных соединений. В этом плане гораздо выгоднее использовать другой позисторный материал, такой как оксид ванадия 3 (V_2O_3). Удельное сопротивление данного материала гораздо меньше чем у BaTiO_3 и составляет порядком 0.001 Ом/см до фазового перехода, что дает большую выгоду по количеству используемого материала [17]. Также более плавная характеристика фазового перехода уменьшит риск перенапряжений на позисторном устройстве.

Одной из главных задач данной работы является разработка схемы замещения мощного генераторного блока электростанции, которая должна продемонстрировать проблему апериодической составляющей токов КЗ СГ, а также продемонстрировать эффективность предлагаемых технических решений.

Сначала необходимо выбрать топологию электростанции. Проблема отключения тока КЗ СГ является наиболее критичной, т.к. мощность и продолжительность горения дуги будут отвечать за коммутационный ресурс разрабатываемого ГВ. В наибольшей степени эти проблемы проявляются для генераторов высокой мощности – несколько сотен МВ. Для таких мощных агрегатов характерно блочное соединение генераторов с трансформаторами, как это показано на рис 1.

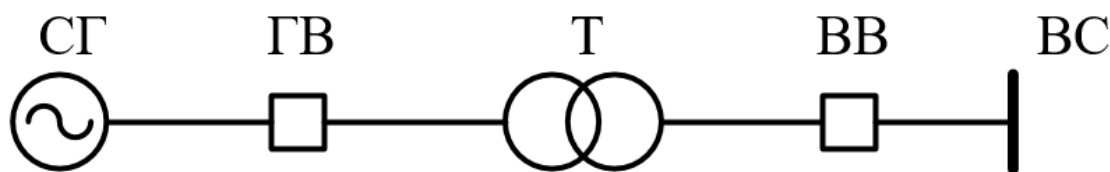


Рис 1. Блочное соединение генераторов с трансформаторами (СГ – синхронный генератор, ГВ – генераторный выключатель, Т – повышающий трансформатор, ВВ – высоковольтный выключатель, ВС – внешняя энергосистема)

Fig.1. Block connection of generators with transformers (SG-synchronous generator, GV-generator switch, T-step-up transformer, BB-high-voltage switch, VS-external power system)

До какого-то времени ГВ не использовались на ЭС, тем самым ранее функция защиты оборудования на ЭС от воздействия токов КЗ возлагалась на ВВ. Однако увеличение мощности применяемых СГ потребовало увеличить степень надежности эксплуатации генераторного оборудования. Прежде всего ГВ необходим для защиты повышающего трансформатора от токов КЗ. Дело в том, что в случае перекрытия обмотки НН или ВН повышающего трансформатора срабатывание ВВ не предотвращает аварию, т.к. КЗ будет подпитываться от СГ, отключение тока которого (в случае отсутствия ГВ) будет зависеть от времени срабатывания автомата гашения поля (АГП), что может происходить весьма длительно - в течении 2-10 с. За это время, с большой вероятностью, повышающий трансформатор может выйти из строя. В данной ситуации установка ГВ позволит быстро

отключить поврежденный трансформатор от СГ за время порядка 100 мс. Отметим, что быстрое отключение КЗ позволит предотвратить случаи развития КЗ - переход от однофазного КЗ к двухфазному и к трехфазному КЗ.

Помимо вышесказанного, применение ГВ позволит увеличить степень надежности питания собственных нужд СГ. В случае аварии на статорной обмотке СГ срабатывание ГВ не обесточит собственные нужды, которые будут продолжать питаться через повышающий трансформатор. Такая логика построения ЭС особенно характерна для АЭС, где надежность питания цепи собственных нужд имеет важное значение.

Исходя из анализа исследуемой проблемы, компонентов разрабатываемого ГВ и топологии мощных электростанций, в следующем разделе будет предложена и разработана схема замещения электростанции для изучения проблемы коммутации ГВ трехфазный токов КЗ СГ

Материалы и методы

В совокупности вышесказанного, общая схема замещения будет выглядеть следующим образом:

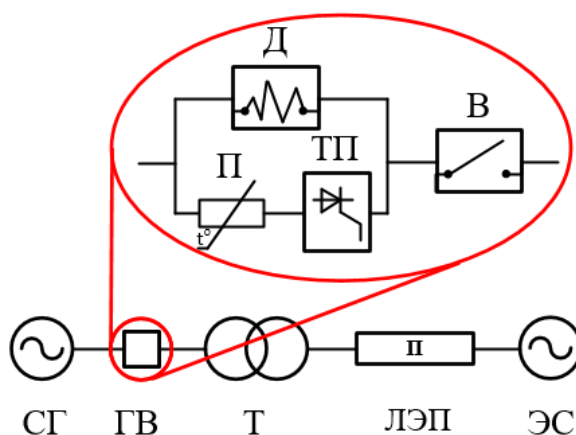


Рис 2. Схема замещения блока электростанции
Fig.2. Power plant block replacement scheme

На рис 2. Т – повышающий трансформатор энергоблока; ЛЭП – высоковольтная линия электропередач; ГВ состоит из следующих компонентов: Д – блок, моделирующий горение электрической дуги на разомкнутых контактах выключателя; П – позисторное устройство; ТП – тиристорная приставка со встречно-параллельным соединением ключей; В – последовательно присоединенный размыкатель.

В рамках данного примера будет моделироваться блок с СГ ТВВ-500-2У3. Повышающий трансформатор – ТЦ630000/500. Напряжение генераторной сети – 20 кВ. Напряжение высоковольтной сети – 500 кВ. ЛЭП моделируется в виде П-образной схемы замещения.

Параметры внешней ЭС и ЛЭП выбираются только исходя из получения нужного режима генерации/выдачи реактивной мощности для СГ. Потребление и генерация реактивной мощности генератором зависит от условий загрузки линий электропередач и параметров нагрузки потребителей или, иными словами, от параметров энергосистемы. При недогруженной ЛЭП, она является источником реактивной мощности и чем длиннее эта линия, тем большее количество этой мощности она генерирует. Одна часть этой мощности потребляется СГ, другая – энергосистемой. Здесь уже оказывает влияние соотношение реактивного сопротивления генерирующей подстанции и потребителя. Если реактивное сопротивление потребителей сильно ниже реактивного сопротивления генерирующей станции, то избыток реактивной мощности линий будет потребляться внешней энергосистемой, и наоборот.

Показанная на рис 2. схема замещения будет моделироваться в программном пакете Matlab Simulink.

Для моделирования СГ был использован функциональный блок «Synchronous Machine». Трансформатор ТЦ-630000/500 моделируются блоком «Three-Phase Transformer (Two Windings)». Энергосистема моделируется трехфазными источниками напряжения «Three-Phase Source». Нагрузка моделируется активным сопротивлением 5 Ом и

индуктивностью 300 мГн. ЛЭП 500 кВ моделируется блоками «PI Section Line». Длина линии – 400 км. Параметры для этих блоков были взяты из справочных материалов [18].

Для моделирования перехода тока с механических контактов в тиристорную приставку в модели используется модель дуги КЕМА. Основа блока, моделирующего напряжения на дуге между механическими контактами, является модель дуги КЕМА [19]:

$$\begin{cases} \frac{dG_i}{dt} = \frac{1}{\Pi_i T_i} G_i^\lambda U_i^2 - \frac{1}{T_i} G_i, & i=1,2 \\ G = \frac{I}{U} \\ U = \sum_{i=1}^3 U_i \end{cases} \quad (1)$$

Здесь I , G и U – ток, проводимость и напряжение электрической дуги соответственно. Остальные параметры и коэффициенты (Π , T , λ) являются экспериментальными значениями, зависящие от конструкции отдельного выключателя. Система уравнений и параметры для нее были взяты из [19]. В модели *Matlab Simulink* напряжение дуги моделируется источником напряжения «Controlled Voltage Source», управляемый системой уравнения (1). Взятые параметры обеспечивают напряжение на дуге величиной ~500 В. Пример получаемой формы напряжения на электрической дуге на контактах СГ показано на рис. 3.

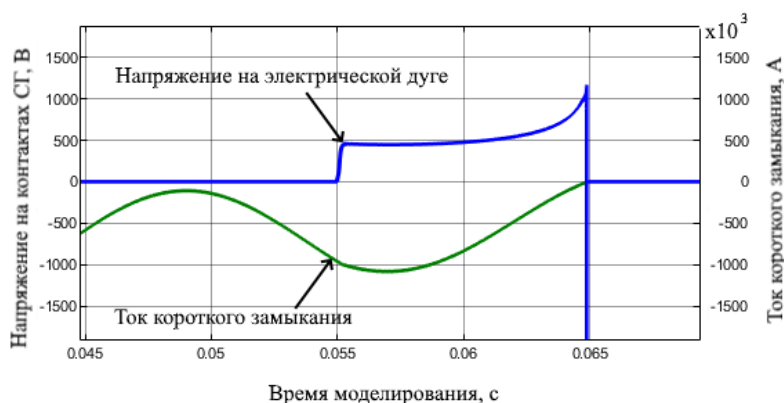


Рис. 3. Осциллограмма напряжения используемой в схеме замещения модели электрической дуги

Fig.3. Voltage waveform of the electric arc model used in the replacement circuit

Как и было указано ранее, для увеличения коммутационной способности ГВ необходимо ограничить время горения дуги. Наиболее выгодным решением данной проблемы является шунтирование механических контактов ГВ встречно-параллельными тиристорными ключами. Модель тириستоров максимально упрощена. Единственная ее функция – это размыкание фазы в момент перехода тока через нуль. Но сопротивление тиристорного ключа (1 колонка на 20 кВ) будет составлять примерно ~1 мОм что в 5-10 раз меньше сопротивления электрической дуги в газе. При таких обстоятельствах проблема апериодической составляющей всё еще актуальна и требует технического решения в виде позисторного устройства, последовательно присоединенной к тиристорному ключу.

Блок-схема реализованного в схеме замещения алгоритма изменения электрического сопротивления позисторного устройства продемонстрирована на рис 4. Позистор, как и модель дуги, реализован источником напряжения «Controlled Voltage Source».

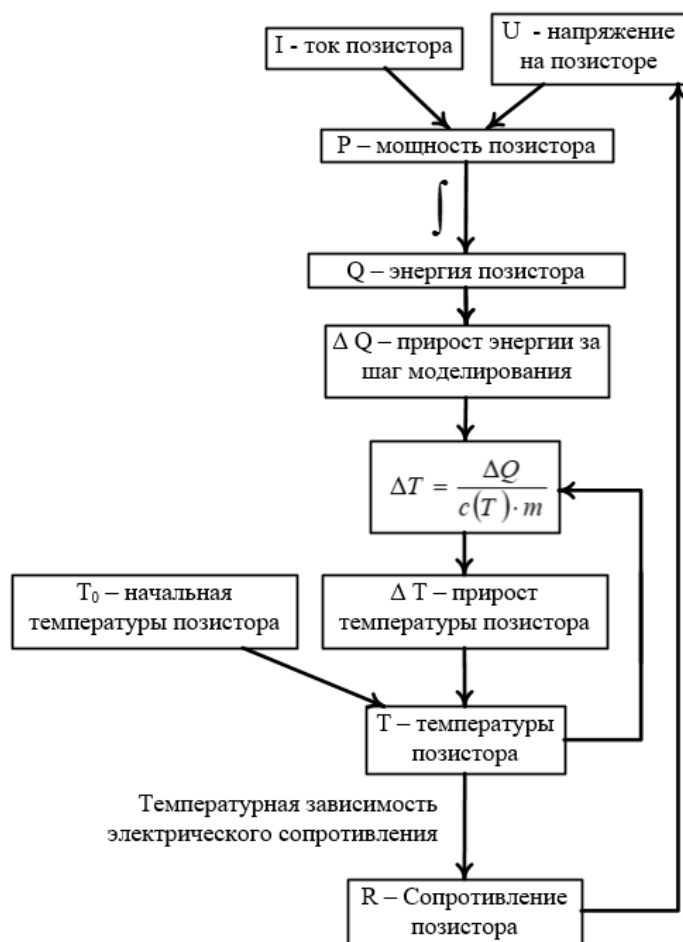


Рис 4. Блок-схема реализации позисторной приставки
Fig.4. Block diagram of the implementation of the posistor set-top box

Молярная теплоёмкость оксида ванадия (3) претерпевает некоторые изменения по мере фазового перехода и зависит от величины изменения энтропии, которая для оксида ванадия (3) равно $\Delta S = 7.5$ Дж/(моль·К) [20]. Используемая характеристика зависимости молярной теплоёмкости от температуры показана на рис. 5.

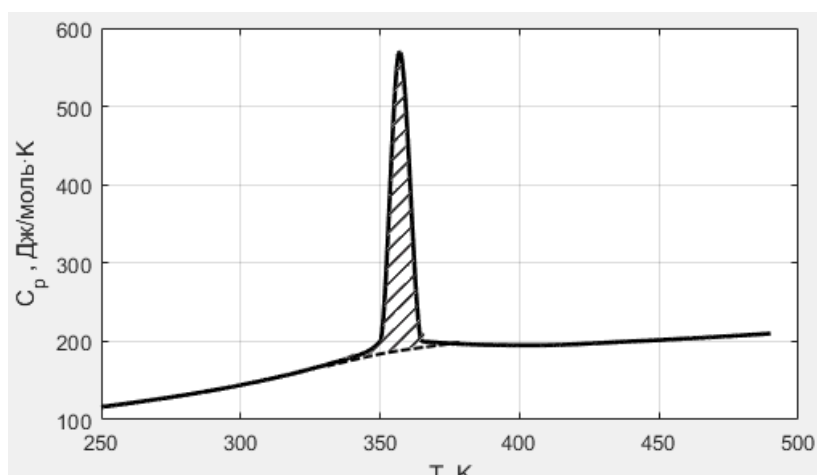


Рис. 5. Характеристика зависимости молярной теплоёмкости от температуры моделируемого образца позистора

Fig.5. Characteristic of the dependence of the molar heat capacity on the temperature of the modeled sample of the posistor

Расчёт заштрихованной области графика на рис.5. осуществлён следующим образом. Заштрихованная область по вертикали делится на небольшие участки шириной ΔT и ΔS рассчитывали как сумму приведенных значений теплоты $\sum (C_p \cdot \Delta T / T_i)$, где T_i – температура соответствующего интервала ΔT [20]. В данной работе для удобства сделано предположение синусоидальной огибающей зависимости $C_p(T)$ при фазовом переходе.

Характеристика зависимости удельного сопротивления оксида ванадия (3) от температуры была взята из работы и показана на рис.6 [21].

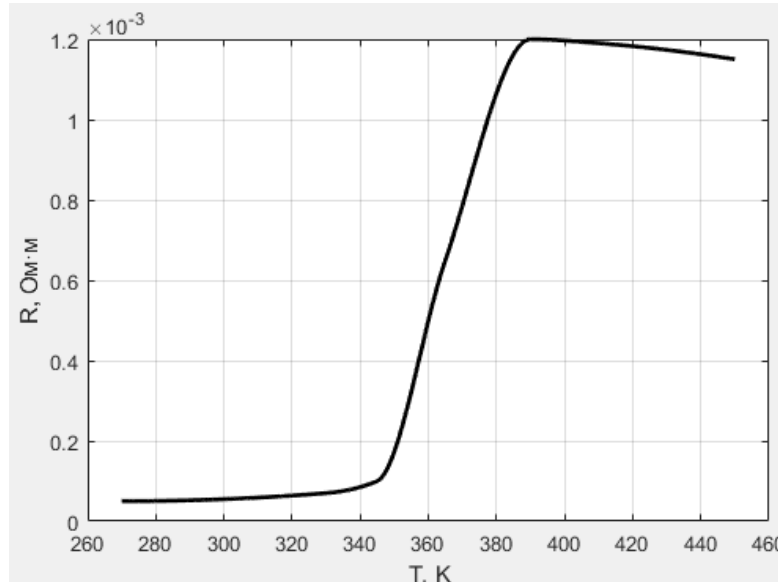


Рис. 6. Зависимость удельного сопротивления оксида ванадия (3) от температуры
Fig.6. Dependence of the specific resistance of vanadium oxide (3) on the temperature

На рис. 7. показана реализованная в Matlab Simulink схема замещения из рис. 2.

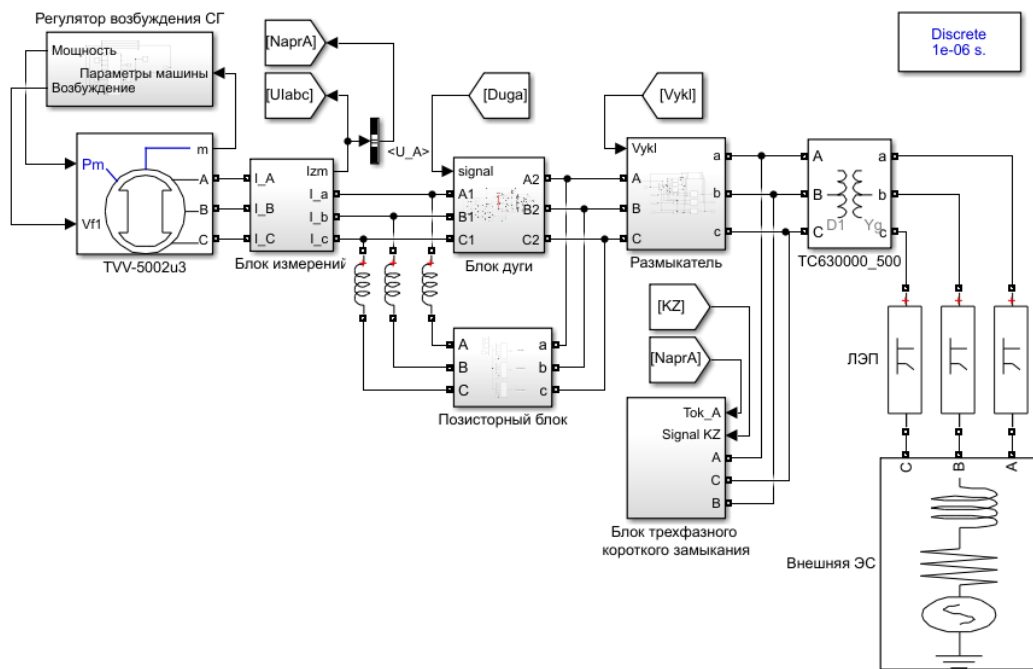


Рис 7. Исследуемая схема Matlab Simulink
Fig.7. The Matlab Simulink scheme under study

Сам процесс моделирования отключения ГВ токов трехфазного КЗ от СГ происходит следующим образом. «Блок трехфазного короткого замыкания» получает сигнал на

трехфазное замыкание и начинает ожидать нуля напряжения в фазе А, т.к. при этом в этой фазе будет наблюдаться максимальная апериодическая составляющая тока КЗ. Далее, после инициализации КЗ, спустя время в 40-60 мс (предполагаемое время задержки с момента сигнала релейной защиты до начала размыкания механических контактов) «Блок дуги» вводит в генераторную сеть напряжение дуги, под действием которой ток КЗ переходит в «Позисторный блок». Последовательно этому блоку пофазно установлены небольшие индуктивности в 5 нГн, моделирующие паразитные индуктивности шин и проводов. Далее позисторный блок под действием сверхтоков увеличивает своё сопротивление, тем самым условно улучшая условия коммутации для последовательно установленной тиристорной приставки. Последним срабатывает блок «Размыкатель», который моделирует работу тиристорной приставки. Установка этого блока последовательно, в отличие от схемы на рис. 2, не повлияет на результаты моделирования и лишь повышает удобство моделирования (как упоминалось ранее, тиристорный блок «размыкатель» предназначен только для окончательного размыкания генераторной цепи).

Результаты и обсуждение

Как можно увидеть из результатов моделирования (рис. 8 и рис. 9) длительные задержки нуля тока ($t_d > 15$ мс) на практике должны встречаться довольно редко. Дело в том, что режимы потребления реактивной мощности у СГ имеют строгие ограничения, связанные с дополнительным нагревом активной стали и конструктивных элементов торцевых зон статора, бандажных колец лобовых частей обмотки возбуждения, торцевых щитов корпуса генератора. Например, генераторы серии ТВВ могут вырабатывать до 80% реактивной мощности по отношению к активной, а потреблять только до 30-40% при ограничении активной мощности до 40%. Только в режиме работы СГ близких к режиму синхронного компенсатора (СГ не выдает в ЭС активной мощности) при КЗ могут возникать длительные задержки нуля тока с непересечением тока нуля (рис. 10). Однако, при присутствии сопротивления электрической дуги газовых дугогасительных устройств, ток достигнет нуля при ближайшем его минимуме. С другой стороны, при работе СГ в режиме генерации реактивной мощности, когда наблюдается размагничивающая реакция якоря, это не оказывает большого влияния на эффект задержки нуля тока.

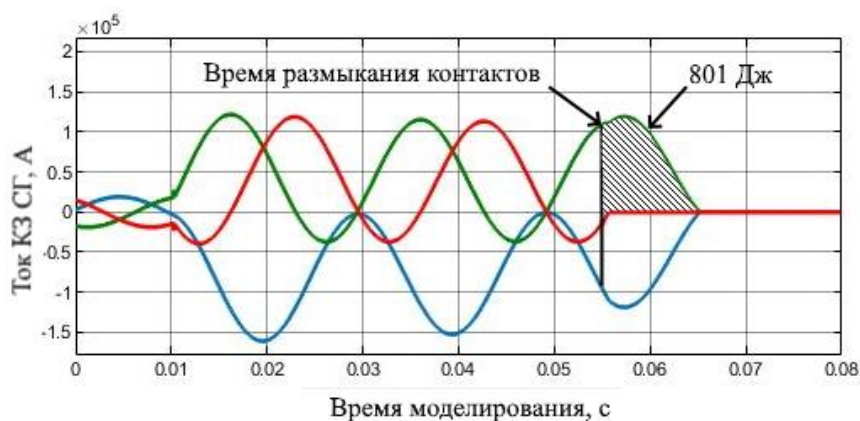


Рис 8. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ генерации реактивной мощности (без влияния дуги, $P = 450$ МВт, $Q = 300$ МВА)

Fig.8. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power generation (without arc effect, $P = 450$ MW, $Q = 300$ MVA)

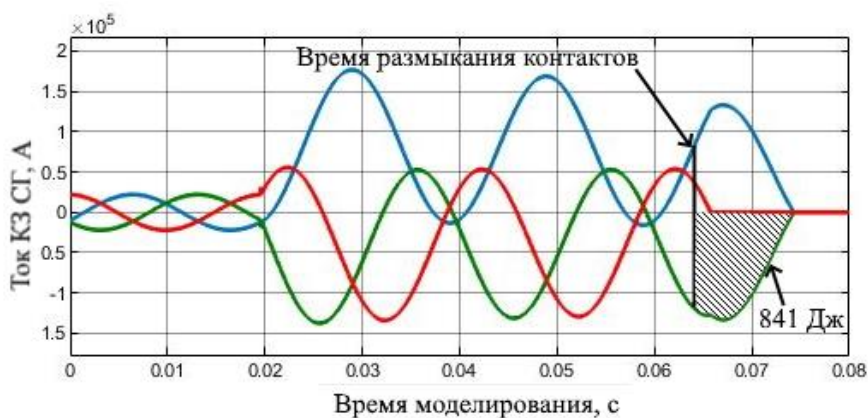


Рис 9. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ потребления реактивной мощности (без модели электрической дуги, $P = 450$ МВт, $Q = -100$ МВА)

Fig.9. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power consumption (without electric arc model, $P = 450$ MW, $Q = -100$ MVA)

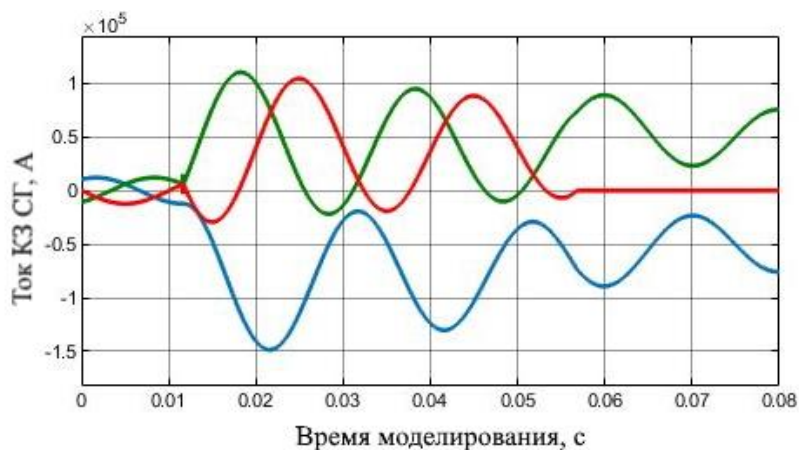


Рис 10. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ синхронный компенсатор (без модели электрической дуги, $P = 0$, $Q = -300$ МВА)

Fig.10. Three-phase short-circuit current waveforms in SG mode synchronous compensator (without electric arc model, $P = 0$, $Q = -300$ MVA)

Следующим этапом стало моделирование того же условного ГВ с модернизацией в виде дополнительных полупроводниковых устройств – тиристорного шунта электрической дуги и позисторный ограничитель аperiodической составляющей тока КЗ.

Для удобства проверки эффективности позисторного устройства, а также для проверки устойчивости тиристорного устройства к ударным токам, в работе будет использована величина энергии тока КЗ тиристора – $Q_{\text{кзт}}$. Например, для мощного тиристора максимально допустимый прямой ток I_{TSM} составит около 70 кА за 10 мс, т.е. $Q_{\text{кзт}}$ для такого тиристора составит 700 Дж. В модели эта величина будет рассчитана как интеграл от тока КЗ тиристорной приставки. Величина $Q_{\text{кзт}}$ указана на осциллограммах (рис. 7, рис. 8, рис. 10, и рис. 11). Необходимо ставить цель, что бы эта энергия при моделировании схемы замещения не превышала максимально допустимых значений для тиристора. Позисторное устройство должно уменьшить эту величину, тем это самым позволит использовать более дешевые тиристорные ключи и в меньшем объеме, а также избежать задержек нуля тока в тиристоре. Предполагаемое время горения дуги на контактах (время перехода тока с механических контактов в позисторную приставку) составляет примерно 100-200 мкс.

При сравнении соответствующих осциллограмм (рис.8 и рис.11, рис. 9 и рис. 12) можно увидеть влияние позисторной приставки при коммутации тока КЗ. Благодаря позисторному эффекту удалось уменьшить энергию тока КЗ тиристора для обоих случаев на ~25%.

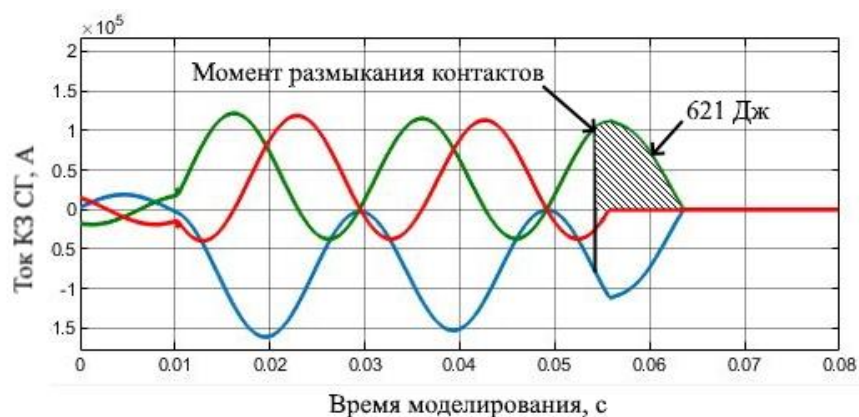


Рис 11. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ генерации реактивной мощности (присутствует модели электрической дуги и позистора, $P = 450$ МВт, $Q = 300$ МВА)

Fig.11. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power generation (there are models of an electric arc and a posistor, $P = 450$ MW, $Q = 300$ MVA)

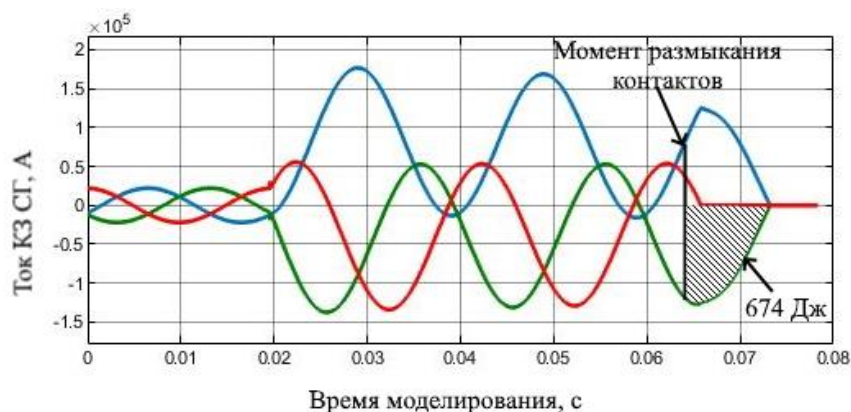


Рис 12. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ потребления реактивной мощности (присутствует модели электрической дуги и позистора, $P = 450$ МВт, $Q = -100$ МВА)

Fig.12. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power consumption (there are models of an electric arc and a posistor, $P = 450$ MW, $Q = -100$ MVA)

Закключение

В работе был проведен анализ проблемы коммутации СГ трехфазных токов КЗ при наличии длительных и больших по значению аperiodических составляющих. Источник данной проблемы - продольная намагничивающая реакция якоря синхронной машины, вызванная потреблением реактивной мощности. Большая аperiodическая составляющая тока КЗ увеличивает время горения дуги и тем самым увеличивая дуговую эрозию контактов ГВ. Для решения этой проблемы было предложено применение шунтирующего тиристорно-позисторного устройства, способного значительно сократить время горения дуги. Шунтирование контактной системы позволит уменьшить время горения дуги до времени перехода тока из дугогасительного устройства в шунтирующую тиристорную приставку. Для уменьшения воздействия токов КЗ на тиристорный ключ, было предложено соединять последовательно тиристорному ключу токоограничитель на основе позисторного эффекта оксида ванадия (III). Исходя из всего этого, была предложена и разработана схема замещения электростанции с СГ. Для СГ в работе были представлены модели, симулирующие напряжение электрической дуги на контактах выключателя, а также модель устройства с позисторным эффектом.

Результаты моделирования показали, что эффект длительных задержек нуля тока (когда ток не переходит нуль при ближайшем его минимуме) не характерен для мощных СГ. Предположительно данный эффект может возникнуть в случае, когда СГ эксплуатируется в режиме синхронного компенсатора [22][23], и при этом его КЗ коммутирует вакуумный выключатель (низкое напряжение дуги) или шунтирующая тиристорная приставка без дополнительного ограничения аperiodической составляющей. Для СГ, которые эксплуатируются в нормальных режимах потребления реактивной

мощности, шунтирующее позисторно-тиристорное устройство позволит увеличить коммутационный ресурс ГВ при относительно небольших капитальных затратах на сборку тиристорного ключа.

Применение в СГ позисторного эффекта показало ограничения энергии трехфазного КЗ $Q_{кзт}$ на ~25%. Такой эффект позволит использовать меньшее число параллельных тиристорных сборок или уменьшить мощность самих тириستоров.

Литература

1. Харисова А.З. Повышение конкурентоспособности РФ: в новый век с новой энергией // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. №. 3 (35).
2. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление затратами на электропотребление по показателям волатильности спроса // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. №. 1 (33).
3. Савина Н.В., Сцепуро К.И. Реконфигурация схемы электрических сетей как средство снижения потерь электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. №. 2 (42).
4. Смоленцев Н.И., Четошников Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №. 4.
5. Palazzo M., Braun D., Delfanti M. Investigation on the occurrence of delayed current zeros phenomena in power stations and related stress imposed on generator circuit-breakers // International Conference on Power Systems Transients IPST 2011. 2011.
6. Lim L.S., Smith I.R. Turbogenerator short circuits with delayed current zeros // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1977. Т. 124. №. 12. С. 1163-1169.
7. Urbanek H., Venna K.R., Anger N. Vacuum circuit breakers-Promising switching technology for pumped storage power plants up to 450 MVA // 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). IEEE, 2017. С. 107-112.
8. Зорин Л.М., Подъячев В.Н., Шлейфман И.Л. Генераторные выключатели в цепи мощных энергоблоков и требования, предъявляемые к ним // Электротехника. 2003. №. 11. С. 34-39.
9. Palazzo M., Delfanti M. New requirements for the application of generator circuit-breakers // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). 2013
10. Schaefer R. C. Art of generator synchronizing // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Т. 53. №. 1. С. 751-757.
11. Palazzo M. et al. Revision of TRV requirements for the application of generator circuit-breakers // Electric Power Systems Research. 2016. Т. 138. С. 66-71.
12. Гусев Ю.П., Омокеева А.А. Анализ коммутационных процессов в цепях генераторного напряжения малых ГЭС // Электрические станции. 2012. №. 12. С. 33-39.
13. Vajnar V., Vostracky Z. Reduced breaking capability of circuit breakers within operations with delayed current zeros // 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016. С. 1-5.
14. Кукеков Г.А., Фролов В.Я. Переходные процессы в контактно-тиристорных аппаратах. 1988.
15. Шульга Р.Н. и др. Исследование и разработка гибридного генераторного выключателя // Энергия единой сети. 2019. №. 3. С. 28-38. - ссылка при первом упоминании гибридного тиристорного выключателя
16. McWhan D.B. et al. Electronic specific heat of metallic Ti-doped V₂O₃ // Physical Review Letters. 1971. Т. 27. №. 14. С. 941.
17. Ковтуненко П. В., Беляков А. В., Фомин Н. Н. Материалы для позисторов. Формирование позисторного эффекта и нестехиометрия // Перспективные материалы. 2001. №. 2. С. 5-14.
18. Smeets R. P. P., Kertesz V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a new validated arc model // IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. 2000. Т. 147. №. 2. С. 121-125.
19. Лях О.В. и др. Структура, кинетические и теплофизические свойства чистого и легированного оксида ванадия (III) // Омский научный вестник. 2011. №. 3 (103).
20. Kokabi H.R. et al. Electrical characterization of PTC thermistor based on chromium doped vanadium sesquioxide // Materials Science and Engineering: B. 1996. Т. 38. №. 1-2. С. 80-89.

21. Шабад В.К., Саленик Д.В. Использование турбогенераторов в режиме потребления реактивной мощности // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. №. 4. С. 55-59.

23. Криволапов А. Ю., Мелешко Н. С., Степанова А. А. Использование генераторов в режиме синхронного компенсатора для регулирования уровней напряжения в энергосистеме // Электроэнергетика глазами молодежи-2019. 2019. С. 321-324.

Авторы публикации

Сафонов Евгений Павлович – аспирант, Высшая школа электроэнергетических систем, Институт энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. e-mail: Eugen.Safonov.95@yandex.ru.

Фролов Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, Высшая школа электроэнергетических систем, Институт энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. e-mail: frolov.eed@gmail.com.

References

1. Harisova AZ. Improving the competitiveness of the Russian Federation: into a new age with new energy. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;3:(35).
2. Solovyova IA, Dzyuba AP. Energy cost management based on demand volatility indicators. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;1:(33).
3. Savina NV, Scepuro KI. Reconfiguration of electrical networks to reduce energy losses. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019;11(2):(42).
4. Smolentsev NI, Chetoshnikova LM. Topology of the electrical network and the method of transmission of electrical energy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019;21(4).
5. Palazzo M, Braun D, Delfanti M. *Investigation on the occurrence of delayed current zeros phenomena in power stations and related stress imposed on generator circuit-breakers*. International Conference on Power Systems Transients IPST 2011.
6. Lim LS, Smith IR. *Turbogenerator short circuits with delayed current zeros*. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1977;124(12):1163-1169.
7. Urbanek H, Venna KR, Anger N. Vacuum circuit breakers-Promising switching technology for pumped storage power plants up to 450 MVA. 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). IEEE, 2017. pp. 107-112.
8. Zorin LM, Podyachev VN, Shleifman IL. Generator circuit breaker for powerful power units and requirements for them. *Elektrotehnika*. 2003;11:34-39.
9. Palazzo M, Delfanti M. *New requirements for the application of generator circuit-breakers*. International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). 2013.
10. Schaefer RC. *Art of generator synchronizing*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2016;53(1):751-757.
11. Palazzo M. et al. Revision of TRV requirements for the application of generator circuit-breakers. *Electric Power Systems Research*. 2016;138:66-71.
12. Gusev YuP, Omakeeva AA. Analysis of switching processes in generator voltage circuits of small hydroelectric power plants. *Elektricheskiye stantsii*. 2012;12:33-39.
13. Vajnar V, Vostracky Z. *Reduced breaking capability of circuit breakers within operations with delayed current zeros*. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016.1-5.
14. Kukekov GA, Frolov VYa. *Transient processes in hybrid circuit breaker*. 1988.
15. Shul'ga RN, Lavrinovich VA, Ivanov VP, et al. Research and development of hybrid generator circuit breaker. *Energiya yedinoi seti*. 2019;3:28-38
16. McWhan D. B. et al. Electronic specific heat of metallic Ti-doped V₂O₃. *Physical Review Letters*. 1971;279(14):941.
17. Kovtunenkov PV, Belyakov AV, Fomin N.N. Materials for PTC-thermistor. Formation of the PTC-thermistor effect and non-stoichiometry. *Perspektivnyye materialy*. 2001;2:5-14.
18. Karapetyan I, Faibisovich D, Shapiro I. *Reference Book for the Design of Electrical Networks*. Litres, 2018.

19. Smeets RP, Kertesz V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a new validated arc model. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. 2000;147(2):121-125.

20. Lyah OV, Prokudina NA, Surikov VadI, et al. Structure, kinetic and thermophysical properties of pure and doped vanadium (III) oxide. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2011;3(103).

21. Kokabi H. R. et al. *Electrical characterization of PTC thermistor based on chromium doped vanadium sesquioxide*. Materials Science and Engineering: B. 1996;38(1-2):80-89.

22. Shabad VK, Salenik DV. The use of turbo generators in the mode of reactive power consumption. *Energoberezhniye i vodopodgotovka*. 2004;4:55-59.

23. Krivolapov AYu, Meleshko NS, Stepanova AA. Using generators in synchronous compensator mode to regulate voltage levels in the power system. *Elektroenergetika glazami molodezhi*-2019. pp. 321-324.

Authors of the publication

Safonov Evgeniy Pavlovich – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation. e-mail: Eugen.Safonov.95@yandex.ru

Frolov Vladimir Yakovlevich – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Получено

14 января 2021г.

Отредактировано

11 февраля 2021г.

Принято

11 февраля 2021г.