

Анализ характеристик дуговых печей как объектов управления

МИРОНОВ Ю.М., МИРОНОВА А.Н.

Проведен анализ в «малом» режимов дуговых сталеплавильных печей (ДСП) при влиянии на них основных управляющих и возмущающих воздействий. Исследовано влияние на коэффициенты передачи по мощности нелинейности токоподвода для различных периодов плавки. При рассмотрении регулировочных характеристик печи показано, что коэффициенты передачи по мощности при перемещении электродов имеют знакопеременный характер с переходом через ноль в режиме максимальной мощности, что определяет неэффективность такого управляющего воздействия в этом режиме. Нелинейность токоподвода слабо влияет на значение тока в режиме максимальной мощности, но снижает напряжение и длину дуги. Сравнимые значения коэффициентов передачи мощности по длине дуги и току в рабочем диапазоне режимов свидетельствуют о равнозначности с точки зрения точности регулирования мощности дуги регуляторами со стабилизацией тока или длины дуги (напряжения дуги). Показано, что коэффициент передачи по току в период расплавления достигает значительных величин что и является причиной ярко выраженного изменения режима печи и появление фликкера. Установлено, что для снижения негативного влияния помехи по питающему напряжению рациональнее использовать токовые регуляторы.

Ключевые слова: дуговая печь, анализ в «малом», коэффициенты передачи, нелинейность токоподвода.

The analysis of the "small" regimes of electric arc furnaces (EAF), with major implications for managers and revolting influences Explored the impact on transmission coefficients on non-linearity power lift for different periods. When considering adjusting the oven characteristics shows that the coefficients of the power transfer when you move electrodes have alternating nature of transition through zero at the maximum power that defines the ineffectiveness of such a control action in this mode. Nonlinearity Busbar weakly affects the value of the current at maximum power, but reduces the voltage and ARC length. Comparable values of coefficients of power transmission along the length of the arc and current within the operating range of the modes indicate equivalence in terms of precision power regulation arc regulators with stabilization current and ARC length (ARC voltage). It is shown that the current transfer ratio between meltdown reaches considerable values that is pronounced change furnace and the appearance of flicker. Found that to reduce the negative impact of interference on

the supply voltage, it is more rational to use current regulators.

Key words: arc furnace, the analysis in the "small", the transfer coefficients, nonlinearity compatmode.

Электротехника, №7-2017, стр. 7-10

**Математическое моделирование электромагнитной системы
сверхминиатюрного магнитоэлектрического двигателя**

НЕСТЕРИН В.А., ГЕНИН В.С., РОМАНОВ Р.А., ТОКМАКОВ Д.А.

Статья посвящена моделированию вентильного электродвигателя с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов. Особенность конструкции рассматриваемого двигателя заключается в том, что статор изготовлен с использованием поликапиллярной стекловолоконной технологии. Проводники распределённой обмотки статора размещены в отверстиях стенки трубки. Цилиндрический двухполюсный ротор изготовлен из материала типа железо – неодим – бор. Допущения, принятые в работе при решении уравнения Лапласа, позволили получить аналитические решения для магнитного потока, ЭДС, тока, электромагнитного момента и электромагнитной мощности.

Ключевые слова: сверхминиатюрный двигатель, вентильный двигатель, редкоземельные магниты, электромагнитный расчёт.

The article is devoted to the modeling a valve electric engine with excitation from high-energy permanent magnets based on rare-earth materials. A peculiarity of the design of the considered engine is that the stator is made using polycapillary glass fiber technology. The conductors of the distributed stator winding are located in the holes of the tube wall. The cylindrical bipolar rotor is made of an iron-neodymium-boron material. A mathematical simulation of the magnetic system of a super-miniature valve engine of an original design is performed. Assumptions made in the work in solving the Laplace equation made it possible to obtain analytical solutions for magnetic flux, EMF, electromagnetic moment current and electromagnetic power.

Key words: superminiature engine, valve engine, rare earth magnet, electromagnetic calculation.

Электротехника, №7-2017, стр. 11-14

Магнитная проводимость модулятора магнитного редуктора

АФАНАСЬЕВ А.А., ДМИТРЕНКО А.М., ЕФИМОВ В.В.

Рассматриваются сквозные магнитные проводимости модулятора для магнитных потоков, создаваемых обмоткой статора и магнитами ротора в точках наблюдения, расположенных, соответственно, на наружной поверхности магнитов и поверхности расточки статора. Численный расчёт показывает, что эти проводимости, существенно отличающиеся друг от друга, формируются основной гармоникой. Вклад высших гармоник в эти проводимости пренебрежимо мал. Аналитический расчёт сквозной магнитной проводимости модулятора (на основе классических подходов в электрических машинах для расчёта магнитных полей в воздушных зазорах с односторонней зубчатостью) приводит к существенной погрешности. Оценено влияние магнитного насыщения стержней модулятора, выполненных из шихтованных листов электротехнической стали, на его сквозные магнитные проводимости.

Ключевые слова: численные и аналитические расчёты; основная и высшие гармоники; точки наблюдения; магнитное насыщение.

Considered through the magnetic conduction of the modulator, first, for the magnetic fluxes generated by stator windings and, secondly, the magnets of the rotor in the observation points located respectively on the outer surface of the magnets and the surface of the bore of the stator. Numerical calculations show that the values of these conductances significantly different from each other, formed the fundamental harmonic. The contribution of higher harmonics in these values is negligible. Through analytical calculation of the magnetic conductance of the modulator (based on the classic approaches to electrical machines for the calculation of magnetic fields in air gaps with double-sided serration) leads to a significant error. The influence of magnetic saturation of the cores of the modulator, is made of laminated electrical steel sheets, the through its magnetic conductivity.

Key words: numerical and analytical calculations; basic and higher harmonics; observation point; magnetic saturation.

Электротехника, №7-2017, стр. 15-19

Методика структурного синтеза релейного регулятора тока транзисторного электропривода

ОХОТКИН Г.П., УГАРИН С.В., ГАЛАНИНА Н.А.

С единой методологической позиции разработана методика структурного синтеза релейного регулятора системы автоматического регулирования тока для различных законов коммутации ключей вентильного преобразователя. Методика состоит из этапа составления временных диаграмм импульсов управления транзисторами мостовой схемы вентильного преобразователя вентильного преобразователя, этапа определения моментов отпираания и запираания транзисторов моста, этапа определения статических характеристик релейных элементов, этапа минимизация числа релейных элементов регулятора тока и составлении структуры регулятора. Временные диаграммы импульсов управления транзисторами строятся на основе временных диаграмм слежения тока якоря двигателей постоянного тока за задающим воздействием и напряжения якоря электродвигателя во всех режимах работы электропривода и зависят от используемого закона коммутации ключей мостовой схемы вентильного преобразователя. Моменты отпираания и запираания транзисторов моста преобразователя определяются с помощью релейных элементов с регулировочной характеристикой типа разрывная функция вида скачка при знакопеременном гладком сигнале на входе релейного элемента, представляющем собой сигнал рассогласования системы автоматического регулирования тока. Методика позволяет составить аналитические выражения статических характеристик релейных элементов, определяющих моменты включения и выключения транзисторов моста, и минимизировать число релейных элементов регулятора. Синтезированные релейные регуляторы тока, содержащие минимальное количество релейных элементов, обеспечивают высокую точность воспроизведения тока якоря двигателя постоянного тока во всех режимах работы электропривода.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, регулируемый электропривод, импульсный преобразователь напряжения, законы коммутации ключей преобразователя, синтез динамических систем, релейный регулятор тока.

In this work from a single methodological position, a technique has been developed for the structural synthesis of the relay current controller for various switching laws of the keys of the bridge circuit. The technique consists of the stage of drawing up timing diagrams of control pulses of bridge transistors, the stage of determining the moments of unlocking and locking the transistors of the bridge, the stage of determining the static

characteristics of the relay elements, the step of minimizing the number of relay elements of the current controller and constructing the structure of the regulator. The time diagrams of the transistor control pulses are constructed on the basis of the time diagrams of tracking the armature current of the DC motor for the setpoint and the armature voltage of DC motor in all modes of operation depending on switching laws of the keys of the bridge circuit. The moments of unlocking and locking the transistors of the bridge are determined by relay elements with an adjustment characteristic of the discontinuous type. The technique allows to compose analytical expressions of static characteristics of relay elements determining the moments of switching on and off transistors of the bridge and to minimize the number of relay elements of the regulator. Synthesized relay current regulators, containing a minimum number of relay elements, provide high accuracy of the armature current of the DC motor in all operating modes of the electric drive.

Keywords: automatic control system, controlled electric drive, pulse voltage converter, the switching laws of converter keys, synthesis of dynamic systems, relay current controller.

Электротехника, №7-2017, стр. 20-24

Моделирование переходных режимов узла нагрузки с трехобмоточным трансформатором на разных уровнях напряжения

СЛАВУТСКИЙ А.Л., ПРЯНИКОВ В.С., СЛАВУТСКИЙ Л.А.

Выполнено моделирование переходных процессов в узле нагрузки энергосистемы, содержащем мощные асинхронные двигатели и трехобмоточные трансформаторы. Переходные процессы в электрических цепях рассчитываются методом синтетических схем (алгоритм Доммеля). Используются модели асинхронного двигателя в фазных координатах и силового трехобмоточного трансформатора на основе индуктивно связанных ветвей, учитывающие преобразование уровней напряжения. Показана возможность исследовать взаимное влияние сетей разного уровня напряжения в базисе фазных координат, в составе одной модели и в рамках единого процесса моделирования. В качестве примера моделируются режимы узла нагрузки 110/35/10 кВ, который на стороне среднего напряжения содержит линии электропередач, а на стороне низкого напряжения - асинхронный двигатель, статическую нагрузку, устройство компенсации реактивной мощности в виде батареи конденсаторов. Алгоритм Доммеля не накладывает ограничений на гармонический состав сигналов и

позволяет учесть разные виды нелинейности элементов системы. Параметры схемы могут меняться во времени в процессе моделирования, что позволяет расширить спектр исследуемых режимов. Использование базиса фазных координат облегчает моделирование несимметричных режимов и сложных повреждений. Динамические режимы работы рассчитываются с использованием гибкой модели асинхронного двигателя.

Ключевые слова: узел нагрузки, переходные процессы, асинхронный двигатель, фазные координаты, трехобмоточный трансформатор, метод синтетических схем.

The transient processes in the load node of the power system, which contains powerful induction motors and triple-wound transformers are simulated. The technique of transients calculations using the direct current synthetic schemes of in electric circuits is presented (Dommel's algorithm). A dynamic model of an induction motor in phase domain and a model of a triple-wound transformer based on inductively coupled branches are used, taking into account the transformation of voltage levels. It is shown a possibility to investigate the mutual influence of different voltage levels of the circuits in the basis of phase domain, as part of one model and within the framework of one modeling process. As the example, the load node 110/35/10 kV, containing an induction motor, a static load, a reactive power compensation device in the form of a capacitor on the low voltage side, and power transition lines on the medium voltage side is considered. The application of Dommel's algorithm makes it possible to study various types of nonlinear elements in systems and not imposes restrictions on the shape and harmonic composition of signals in the model. The algorithm allows to change the parameters and configuration of the timing constraints, which increases the range of modes considered. When considering the load node in this area, various types of asymmetry and complex faults may be used. The model of the induction motor is highly flexible and gives good results when calculating dynamic modes.

Key words: load node, transients, induction motor, phase domain, triple-wound transformer.

Электротехника, №7-2017, стр. 24-27

Синтез минимизированного по массе активных материалов форсированного броневоегo электромагнита постоянного напряжения, питаемого по схеме с балластным резистором

АФАНАСЬЕВ В.В., ЗАЙЦЕВ Ю.М., НИКИТИНА О.А., РУССОВА Н.В., СВИНЦОВ

Г.П.

Массогабаритные показатели и потребляемая мощность во многом определяют характеристики электротехнических изделий. Для электромагнитной коммутационной аппаратуры существенное улучшение этих показателей могут быть достигнуты за счет форсированного и импульсного управления приводами. Поэтому разработка эффективной методики проектирования форсированных приводных электромагнитов с использованием уточненных математических моделей, определение их электромагнитных и тепловых характеристик с учетом современных требований к функционированию коммутационной аппаратуры является актуальной задачей. В статье предложена методика проектирования форсированного втяжного броневое электромагнита в схеме с балластным резистором, минимизирующая суммарную массу электротехнической стали и обмоточной меди, затрачиваемой на изготовление электромагнита. Получены расчетные выражения основных соразмерностей электромагнита, минимизирующие его суммарную массу.

Ключевые слова: оптимальный электромагнит, масса активных материалов, вычислительный эксперимент, проектный расчет.

Weight, overall dimensions and power consumption largely determine the characteristics of electrical equipment. For electromagnetic switching devices, a significant improvement in these indicators can be achieved through forced and impulse control drives. Therefore, the development of an effective methodology for the design of the forced driving of the electromagnets using refined mathematical models, determination of their electromagnetic and thermal characteristics to meet modern operating requirements of the switching equipment is an urgent task. The paper proposed the design method of the accelerated retractable armor of the electromagnet in circuit with the ballast resistor, minimizing the total mass of electrical steel and winding copper required for the manufacture of the electromagnet. The expression of the basic proportionality of the electromagnet, minimizing its total weight.

Key words: the optimal electromagnet, mass of the active materials, computing experiment, design calculation.

Электротехника, №7-2017, стр. 27-30

Система управления приводом вентилятора на основе доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока

ЯДАРОВА О.Н., ОХОТКИН Г.П., СЛАВУТСКИЙ Л.А.

Предложена система управления приводом вентилятора на основе контроля интегральной (средней по сечению) скорости генерируемого потока воздуха.

Для этого скорость потока (расхода) измеряется доплеровским ультразвуковым прибором. Результаты лабораторных экспериментов при одновременном контактном и дистанционном контроле потока и скорости вращения вентилятора в стационарных и переходных режимах показывают возможность интегрирования ультразвукового прибора в систему управления. Проведена идентификация соответствующих звеньев и их передаточных функций для системы автоматического управления (САУ) вентиляторной установки. Дана оценка устойчивости и приведены результаты имитационного моделирования работы замкнутой САУ, где в качестве регулируемой переменной величины принята интегральная скорость потока воздуха. Управление приводом вентиляторной установки должно осуществляться с учетом изменения аэродинамических характеристик системы: положения штор, жалюзи, заслонок и т.д.

Предлагаемый подход позволяет бесконтактно контролировать открытый воздушный поток на выходе системы вне зависимости от типа привода и самого вентилятора, вносить соответствующие поправки в традиционные алгоритмы автоматизированного управления приводом вентиляторов, штор, заслонок.

Ключевые слова: вентилятор, система автоматического управления, воздушный поток, доплеровский ультразвуковой контроль.

The fan drive control system based on the testing of integral velocity of the generated airflow is proposed. For the flow velocity (flow rate) measurements the Doppler ultrasonic device is used. The results of complex laboratory measurements, using the contact and the remote control of the flow rate and fan speed in stationary and transient regimes, show the possibility of integrating an ultrasonic device in the control system. The units and their transfer functions for the fan automatic control system (ACS) are identified. The assessment of the sustainability and the simulation of the closed-loop ACS, where the controlled parameter is the integral airflow rate are presented. The fan drive control should take into account the changes in the aerodynamic characteristics of the system: the position of valves, shutters, etc. The proposed approach allows to carry out the non-contact control of airflow on the system output, regardless of the type of

drive and fan, make appropriate amendments to the traditional algorithms for automatic drive control of fans, valves.

Key words: fan, automatic control system, airflow, Doppler ultrasonic sensing.

Электротехника, №7-2017, стр. 30-36

Диагностирование и алгоритм работы быстродействующих регуляторов напряжения под нагрузкой

МИХЕЕВ Г.М., ИВАНОВА Т.Г., КОНСТАНТИНОВ Д.И., ТУРДИЕВ А.Х.

Рассмотрены методы диагностирования быстродействующих переключающих устройств однофазного и трёхфазного исполнения, таких как серии РС и РНОА, установленные на силовых трансформаторах напряжением 35-330 кВ.

Диагностирование осуществляется с помощью многоканального цифрового осциллографа без вскрытия бака контактора и слива из него диэлектрической жидкости. Приведены алгоритмы автоматизированного определения работоспособности переключающих устройств. Показано, что предложенные алгоритмы позволяют сократить время для подготовки и получения осциллограмм токов, автоматической обработки измеряемых величин, автоматизировать определение работоспособности переключающих устройств, протоколировать результаты диагностирования с выводом на печать, создать базу данных в электронном виде.

Ключевые слова: регулятор напряжения под нагрузкой, переключающее устройство, диагностирование, осциллографирование, работоспособность.

Diagnosis methods of single-phase and three-phase high-speed switching unit such as PC series and on-load voltage regulators made by Ukraine respectively mounted on 35-330 kV power transformers. The diagnostic process is carried out using multichannel digital oscilloscope without opening the contactor tank and draining the dielectric liquid out of it. The algorithms for automated determination of the operability of the above-mentioned devices are given. It is shown that the developed algorithms allow reducing time for preparing, carrying out the process of the currents oscillograms measuring, automatically processing of the measured values, as well as automating the determination of the operability of the switching unit, recording the diagnosing results with printing, creating a database in digital form.

Key words: on-load voltage regulator, switching unit, diagnostic, oscillographic testing, working capacity.

Электротехника, №7-2017, стр. 37-44

Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю и в автоматике управления дугогасящими реакторами

БУЛЫЧЕВ А. В., ДЕМЕНТИЙ Ю.А., ПРЯНИКОВ В.С.

Выполнен анализ работы трансформатора тока нулевой последовательности как инерционного звена, в том числе выведена передаточная функция по схеме замещения трансформатора тока. Приведены осциллограммы реальных токов нулевой последовательности и представлено их математическое описание во временной и частотной области, показаны спектральные характеристики математических моделей сигналов в зависимости от формы и длительности наблюдения сигнала. Исследовано прохождение сигналов через измерительный трансформатор в переходном режиме. Получены математические выражения во временной и частотной областях, описывающие выходные сигналы и ошибки преобразования трансформатора тока нулевой последовательности при различных входных воздействиях. Представлены результаты экспериментов, в частности - осциллограммы реальных переходных процессов для различных трансформаторов, которые подтверждают достоверность составленных математических моделей. Найдены соотношения параметров, влияющие на ошибку преобразования при работе трансформатора в динамическом режиме. Проанализирована пригодность существующих трансформаторов тока нулевой последовательности для целей релейной защиты. Сформулированы требования к новым трансформаторам тока нулевой последовательности с учетом особенностей современных цифровых устройств релейной защиты и автоматики.

Ключевые слова: трансформатор тока, сигнал, анализ, точность преобразования, релейная защита и автоматика.

The behavior of the zero-sequence current transformer as an inertial element is analyzed, including the transfer function according to the current transformer equivalent circuit. In this article the oscillograms of real zero-sequence currents and their mathematical description in the time and frequency domain are presented, the spectral characteristics of mathematical models of signals depending on the form and duration of the signal observation are shown. A results of the research of the signal passing through measurement transformer in transient mode are shown. Mathematical expressions in the time and frequency domains that describe the output signals and

errors of transformation of the zero-sequence current transformer for various input actions are obtained. Also, the article presents the results of experiments, in particular - oscillograms of real transients for various transformers, which confirm the reliability of the used mathematical models. The ratio of the parameters that influence the transformation error during the operation of the transformer in dynamic mode is found. A suitability to use an existing current transformers for power protection purposes are evaluated. The requirements to new zero-sequence current transformers are formulated by reference to specific features of modern digital power-system protection devices.

Key words: Current transformer, signal, analysis, transform accuracy, power-system protection.

Электротехника, №7-2017, стр. 44-50

Преобразователь постоянного напряжения с последовательным резонансным инвертором и несимметричным управлением силовыми транзисторами

БЕЛОВ Г.А., СЕРЕБРЯННИКОВ А.В., ГАЛАНИНА Н.А.

Интерес к преобразователям постоянного напряжения (ППН) с последовательным резонансным инвертором (резонансным преобразователем) обусловлен тем, что в них легко реализуются переключения полупроводниковых приборов при нулевом токе и нулевом напряжении на приборе. Это позволяет существенно уменьшить потери мощности на переключения полупроводниковых приборов, реализовать работу ППН на более высоких частотах при высоком КПД. В литературе рассмотрены различные схемы резонансных преобразователей, приведены результаты экспериментальных исследований. Однако теория подобных преобразователей развита недостаточно, теоретические исследования проводятся приближёнными методами, например методом основной гармоники. В статье описан принцип работы силовой части преобразователя постоянного напряжения с последовательным резонансным инвертором и несимметричным управлением в режиме прерывистого тока, когда частота переключений меньше резонансной частоты LC-контура. Описаны особенности симметричного и несимметричного управления силовыми транзисторами инвертора, когда формируются двухполярные импульсы тока на половине периода переключений. Предложен алгоритм несимметричного управления транзисторами, представлена схема реализации этого алгоритма на дискретных компонентах в виде виртуальной модели в среде Matlab-Simulink. Приведены результаты моделирования

переходного процесса и установившегося режима, другие зависимости.

Выполнено сравнение полученных характеристик с теоретическими, построенными по аналитическим соотношениям.

Ключевые слова: преобразователь постоянного напряжения, последовательный резонансный инвертор, виртуальное моделирование, переходные процессы, установившийся режим, внешние характеристики, КПД.

Interest in DC converters with a series resonant inverter (resonant converters) is due to the fact that they easily realize switching of semiconductor devices at zero current value and zero voltage value on the device. This makes it possible to significantly reduce the power loss during switching semiconductor devices, to realize the work of DC-DC converter at higher frequencies with high efficiency. In the foreign literature many circuits of resonant converters are described, many results of their experimental studies are given. However, the theory of such converters is not sufficiently developed, theoretical studies are conducted by approximate methods, for example, by the fundamental harmonic method. The article describes the operating principle of the power part of DC-DC converter with a series resonant inverter with asymmetrical control in the discontinuous conduction mode (DCM), when the switching frequency is less than the resonant frequency of the LC circuit. The features of symmetrical and asymmetrical control of inverter's power transistors are described, when bipolar current pulses are formed in half of the switching period. An algorithm for asymmetrical control of transistors is proposed, a scheme for implementing this algorithm on discrete components in the form of a virtual model in the Matlab-Simulink environment is presented. The results of modelling (transient and steady-state conditions, external characteristics and other dependencies), as well as the results of comparison of the taken and theoretical (constructed from analytical relationships) characteristics are presented.

Key words: DC converter, series resonant inverter, virtual simulation, transient, steady state, external characteristics, efficiency.

Электротехника, №7-2017, стр. 50-54

Применение статистических методов для анализа потребления электроэнергии бюджетными учреждениями

АФАНАСЬЕВ В.В., КОВАЛЕВ В.Г., ТАРАСОВА В.В., ТАРАСОВ В.А.

Рассмотрены возможности применения статистических методов для анализа потребления электроэнергии бюджетными организациями и управления

энергетической эффективностью. Для учета влияния времени года и климатических условий на потребление электрической энергии применены статистические методы, которые позволили создать имитационную модель потребления электроэнергии на освещение и другие нужды по данным приборов, учитывающих только суммарное потребление электроэнергии всеми группами потребителей. Изменение в течение года месячного расхода электроэнергии является стохастической величиной, зависящей от продолжительности светового дня и других факторов. Определены статистические характеристики месячного потребления электроэнергии отдельными корпусами Чувашского государственного университета. Дисперсионный анализ показал, что распределение значений месячных расходов электроэнергии по большинству корпусов соответствует нормальному закону. Корреляция между месячным расходом электроэнергии и продолжительностью светового дня позволила провести регрессионный анализ и определить фактическую среднюю мощность системы освещения и фактическую среднюю мощность остального электропотребления каждого объекта. Результаты статистического анализа позволяют составлять баланс потребления электроэнергии, прогнозировать расход электроэнергии различными группами потребителей, проводить оценку эффективности мероприятий по энергосбережению и получать данные, необходимые для заполнения энергетических деклараций и энергетических паспортов.

Ключевые слова: потребление электроэнергии, бюджетные учреждения, статистические методы, корреляционный анализ, регрессионный анализ, имитационная модель.

A study was made of the possibilities of using statistical methods for analyzing the consumption of electricity by budget organizations and managing energy efficiency. To take into account the influence of climatic conditions on the consumption of electric energy, statistical methods have been applied that have made it possible to create a simulation model of electricity consumption for lighting and other electrical equipment according to instruments that take into account only the total consumption of electricity by all groups of consumers. Monthly electricity consumption is a stochastic value, depending on the duration of daylight and other factors. The statistical characteristics of the monthly consumption of electricity by individual buildings of the Chuvash State University are determined. Dispersion analysis showed that the distribution of the values

of monthly electricity consumption for most buildings corresponds to the normal law. Correlation between the monthly electricity consumption and the duration of the daylight allowed regression analysis, the results of which allow determining the actual average power of the lighting system and the actual average power of the rest of the electrical equipment of each object. The results of the statistical analysis make it possible to compile a balance of electricity consumption, to forecast the consumption of electricity by various groups of consumers, to assess the effectiveness of energy saving measures and to obtain the data necessary to fill out energy declarations and energy passports.

Key words: electricity consumption, budget institutions, statistical methods, correlation analysis, regression analysis, simulation model.

Электротехника, №7-2017, стр. 55-59

Регулируемый магнитный редуктор

АФАНАСЬЕВ А.А., ГЕНИН В.С., ИСЛОМОВ И.И., КАЛИНИН А.Г., ТОКМАКОВ Д.А.

Рассматривается математическое описание совмещённого электромеханического устройства, обладающего свойствами синхронной машины, подключённой к преобразователю частоты, и магнитного редуктора с переменным коэффициентом редукции. Обмотка статора синхронной машины является сосредоточенной (зубцовой), пространственный период которой охватывает все z зубцов.

Получено выражение для частотной характеристики МДС зубцовой обмотки. В рассматриваемом варианте ($z = 36$) основной гармоникой магнитного поля, задающей число пар полюсов статора, является $\nu = p = 17$. Магнитодвижущая сила магнитов внутреннего ротора представлена также в виде ряда Фурье.

Предложены формулы, позволяющие рассчитать методом удельной магнитной проводимости магнитные поля в двух воздушных зазорах магнитного редуктора, вызванные током статора и магнитами быстроходного ротора. Электромагнитные моменты валов редуктора определяются методом натяжений. Электромагнитный момент, вызванный обмоткой статора, находится на основе вычисления мгновенных значений ЭДС вращения и трансформации каждой катушки обмотки без использования обмоточных коэффициентов. Получена система дифференциальных уравнений для описания переходных процессов в трех каналах ветроэлектрической установки: двух механических и одном электрическом. Предложена замкнутая система с ПИД-регулятором, позволяющая стабилизировать частоту вращения электрогенератора ветроэнергетической

установки при переменной скорости ветра.

Ключевые слова: синхронная машина с постоянными магнитами, модулятор, магнитные поля в воздушных зазорах, преобразователь частоты, ветроколесо, электрогенератор, обратная связь, регулятор, переходные процессы, моделирование.

A mathematical interpretation of a combined electromechanical device similar synchronously to a machine connected to a frequency converter and a magnetic reducer (MR) with a variable reduction factor is given. The winding of the stator of the synchronous machine is concentrated (tooth winding), its spatial period covers all “z” teeth. An expression is given for the frequency response of the Magnetomotive force (MMF) of the tooth winding. In this case ($z = 36$) is the primary harmonic of the magnetic field, which determines the number of pole pairs of stator, is $\nu = p = 17$. MMF rotor magnet is represented as a Fourier series. There are given formulas for calculating magnetic fields in two air gaps MR, caused by stator current and magnets of high-speed rotor (using the method of specific magnetic conductivity). The electromagnetic torque of the gear shafts are calculated using the stretch-method. The electromagnetic torque (stator winding) is calculated from instantaneous values of the rotation EMF and the transformation of each coil of the winding without use of winding coefficients. A system of differential equations for calculating transients in three channels of a wind power plant is given: in two mechanical channel and in one electrical channels. A closed-system with a PID-regulator is proposed. In a wind power plant with a variable wind speed, it is possible to stabilize the rotational speed of the generator.

Key words: synchronous machine with steady magnets, modulator, Magnetic fields in air gaps, Frequency converter, Wind wheel, Power generator, Feedback, Regulator, Transient processes, math modeling.

Электротехника, №7-2017, стр. 60-65

Модель неповреждённого энергообъекта как индикатор повреждения

ЛЯМЕЦ Ю.Я., ВОРОНОВ П.И., МАРТЫНОВ М.В., АТНИШКИН А.Б., ШИРОКИН М.Ю.

Рассмотрен общий подход к распознаванию аварийных режимов наблюдаемого энергообъекта. Отмечено важное свойство модели неповреждённого объекта – способность проводить селекцию режимов электрической системы, в состав которой входит защищаемый объект. Всё множество режимов разделено на

подмножества α и β . В α -режимах защищаемый объект повреждён, в β -режимах – исправен. Селективность релейной защиты обеспечивается полной отстройкой от β -режимов. Модель, адекватная неповреждённому энергообъекту, справляется с такой задачей. При повреждении объекта, когда адекватность модели нарушается, создаются необходимые предпосылки для обеспечения приемлемых параметров чувствительности и быстродействия релейной защиты. В качестве примера рассмотрены два энергообъекта: линия электропередачи с односторонним наблюдением и трёхфазный трансформатор с соединением обмоток по схеме «звезда с нулём и треугольник». Для линии электропередачи β -режимами являются замыкания вне зоны защиты, для трансформатора – броски намагничивающего тока.

Ключевые слова: энергообъект, аварийные режимы, распознавание, модель, линия электропередачи, трансформатор.

This paper presents general approach to the detection of observed power system element fault conditions. An important property of the intact object model is noted. It is capable to select the modes of the electrical system, which includes the protected object. The entire set of modes is divided into two subsets; they are assigned the indices α and β . In α -modes the protected object is damaged, in β -modes – it is working. The selectivity of the relay protection is provided by a complete separation from the β -modes. Adequate to an undamaged power system element model copes with this task. In case of damaged object, when the adequacy of the model is violated, the necessary prerequisites are created to provide acceptable sensitivity and speed of relay protection. As an example, two power objects are considered: power transmission line with one-sided observation and a three-phase transformer with a winding connection type DYN. For the power transmission line, the β -modes are faults outside the protection zone, and for the transformer - the magnetizing current inrush.

Key words: power facility, emergency modes, recognition, model, power line, transformer.

Электротехника, №7-2017, стр. 67-72

Повышение эффективности совместной работы солнечной электростанции с промышленной сетью переменного тока

КРЮКОВ К.В., БАРАНОВ Н.Н., АНТОНОВ Б.М.

Применение модулей фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) со встроенными регуляторами постоянного тока в работающих совместно с промышленной сетью системах электроснабжения малой и средней мощности позволяет увеличить выработку генерируемой модулями ФЭП энергии за счет работы всех модулей в режиме генерации максимальной мощности. При снижении интенсивности солнечного излучения нескольких из цепочки последовательно включенных модулей ФЭП, одновременная работа всех модулей цепочки в режиме отбора максимальной мощности может привести к появлению перенапряжений на элементах регуляторов постоянного тока, встроенных в модули. В статье предложено решение для управления цепочкой из последовательно соединенных модулей ФЭП со встроенными регуляторами постоянного тока. Рассмотрен алгоритм управления регуляторами постоянного тока, позволяющий выровнять напряжения на выходе последовательно включенных регуляторов при резко неравномерной освещенности модулей ФЭП. Рассмотрены компьютерные модели и приведены результаты моделирования в программном комплексе Matlab/Simulink.

Ключевые слова: сети переменного тока, солнечные электростанции, совместная работа, эффективность.

Application of PV modules with integrated DC-DC converters (smart PV modules) in small-scale grid connected power supply systems makes it possible to increase the amount of energy generated by the PV modules. It is possible due to simultaneous operation of all the PV modules in the MPPT. However, simultaneous operation of the all the modules in the MPPT can cause overvoltages on the elements of the integrated DC-DC converters in the case of non-uniform insolation of a series-connected smart PV modules. This paper provides a solution for the efficiency enhancement of series-connected smart PV modules. Paper also considered control algorithm for the voltage regulation of the module integrated dc-dc converters under non-uniform insolation of the PV modules. Matlab models of the control system and simulation results presented in this paper.

Key words: AC power, solar power, joint work, efficiency.

Электротехника, №7-2017, стр. 72-78

Построение комбинированных моделей свойств объемных высокотемпературных сверхпроводящих материалов

КУЛАЕВ Ю.В., КУРБАТОВ П.А., КУРБАТОВА Е.П.

Приведены результаты исследований, направленных на совершенствование моделей свойств объемных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов, которые необходимы для численного анализа электромагнитных полей в электротехнических устройствах, содержащих ВТСП элементы.

Рассматриваются аппроксимирующие комбинированные модели для совокупности транспортных и связанных токов, определенные соответственно резистивной моделью для токов и нелинейной гистерезисной моделью для намагниченности. Модель транспортных токов построена на известных разновидностях модели критического состояния. Модель намагниченности материала составлена для совокупности магнитных моментов элементарных сверхпроводящих цилиндров с диаметрами, много меньшими их длины, которые ориентированы по направлению основной оси анизотропии материала.

Приближение к реальным условиям реализовано статистическими характеристиками, задающими возможные изменения критической плотности токов, критической напряженности поля и пространственной ориентации осей элементарных цилиндров. Приведены результаты лабораторных исследований макета, состоящего из цилиндрического ВТСП элемента и кольцевого постоянного магнита, которые сопоставлены с данными расчетов электромагнитного поля по предложенным моделям свойств.

Ключевые слова: объемный высокотемпературный сверхпроводящий материал, транспортный ток, намагниченность, расчет электромагнитного поля, экспериментальные исследования.

The article contains the results of research aimed at improving the models of properties of bulk high-temperature superconducting materials (HTS), which are necessary for the numerical analysis of electromagnetic fields in electrical devices, containing elements of high-temperature superconductors. We consider the approximation combined model for the set of transport and related currents, defined respectively by resistive model for the current and hysteresis nonlinear model for the magnetization. Model of the transport currents based on known types of the critical state model. Model of the magnetization of the material is built for the set of the magnetic moments of elementary superconducting cylinders with diameters much smaller than their length, which are oriented in the direction of the principal anisotropy axis of the material. The approximation to the real conditions is realized by the statistical characteristics that specify the possible changes

in the critical current density, the critical field strength and spatial orientation of the basic axes of the cylinders. The results of experimental study of laboratory model, consisting of cylindrical HTS element and the annular permanent magnet are presented and compared with the results of electromagnetic field calculations with the proposed model of properties.

Key words: bulk high-temperature superconducting material, the transport current, magnetization, calculation of electromagnetic field, experimental studies.

Электротехника, №7-2017, стр. 78-82

Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи

ПАНФИЛОВ Д.И., ШАКАРЯН Ю.Г., АСТАШЕВ М.Г., РАШИТОВ П.А., АНТОНОВ А.В.

Технология малогабаритных устройств продольной компенсации (МУПК) для воздушных линий электропередачи в настоящее время получила активное развитие в США и России. Эти устройства могут быть использованы для решения широкого спектра задач, в частности, перераспределения потоков мощности между отдельными параллельно работающими линиями или сечениями; симметрирования фаз; повышения пропускной способности, устойчивости и надежности работы электрической сети; уменьшения потерь энергии. В статье рассмотрен принцип функционирования малогабаритных устройств продольной компенсации, приведена обобщённая аналитическая модель, поясняющая принцип регулирования реактивного сопротивления, вносимого устройством в линию электропередачи. Подробно описана структура разработанного ОАО «ЭНИН» совместно с АО «НТЦ ФСК ЕЭС» индуктивно-ёмкостного МУПК с двумя конденсаторами. Приведены основные характеристики и параметры опытных образцов устройства. Рассмотрены основные режимы работы опытных образцов МУПК, реализуемость которых подтверждена в ходе опытно-промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: гибкие системы электропередачи переменного тока, воздушная линия электропередачи, малогабаритное устройство продольной компенсации, перераспределение потоков мощности, регулируемое реактивное сопротивление.

The distributed series impedance (DSI) technology for overhead power lines currently being actively developed in USA and Russia. DSI can be used for wide range of tasks, for example for redistribution of the power flows in parallel lines and cross-sections;

phase balancing; increasing of power transfer capability, stability and reliability of electric power network functioning; decreasing of the power losses. The paper considers the working principles of the DSI and proposes generalized analytical model, which illustrates the regulation principles of the reactance, that is entered by the device into the transmission line. The detailed structure of the inductive-capacitive DSI with two capacitors made by JSC "ENIN" together with JSC "NTC FGS UES" has been described. The paper gives the general characteristics and parameters of the device. The main working modes of the developed DSI prototypes have been presented. The feasibility of the devices has been confirmed during the trial operation.

Key words: flexible AC transmission systems (FACTS), overhead power line, distributed series impedance (DSI), power flows distribution, regulated reactance, smart wire.