

Характеристики резонансного преобразователя постоянного напряжения с фазовым регулированием методом основной гармоники

БЕЛОВ Г.А., СЕМЕНОВ Ю.М.

На основе линейной эквивалентной схемы преобразователя постоянного напряжения (ППН), построенную в предположении синусоидальности тока в последовательном LC-контуре, методом основной гармоники получены приближенные выражения для расчета нагрузочных и регулировочных характеристик ППН. Сравнение нагрузочных характеристик, построенных по ранее обоснованной точной методике, основанной на методе припасовывания, и по полученным в приближенных формулам, показывает, что метод основной гармоники может быть использован для расчётов статических характеристик при фазовом регулировании в режиме непрерывного тока с приемлемой для практики точностью. В режиме прерывистого тока метод даёт завышенные значения выходного напряжения за исключением режима, близкого к холостому ходу, где занижает значения напряжения. Погрешность метода основной гармоники возрастает с уменьшением относительной длительности импульсов на выходе инверторного моста.

Ключевые слова: резонансный преобразователь постоянного напряжения, фазовое регулирование, анализ характеристик, метод основной гармоники.

On the base of the linear equivalent circuit of the DC-DC converter, justified under the assumption of sinusoidal character of the current in the serial LC circuit, approximate expressions for the calculation of the load and control characteristics of the DC-DC converter were obtained by the fundamental harmonic method. Comparison of the load characteristics constructed using a previously grounded exact method based on the fitting method and the approximate formulas obtained in this paper shows that the fundamental harmonic method can be used to calculate the static characteristics for phase control in the continuous current mode (CCM) with an acceptable for practice accuracy. In the discontinuous current mode (DCM), the method gives an overestimated output voltage, with the exception of a mode close to idling, where the voltage values are underestimated. The error of the basic harmonic method increases with the decrease in the relative duration of the pulses at the output of the inverter bridge.

Key words: resonant DC-DC converter, phase control, characteristics analysis, basic harmonic method.

Управление режимом компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю по измеряемым параметрам контура нулевой последовательности сети

БУЛЫЧЕВ А.В., КОЗЛОВ В.Н., САЛМИН Н.О., СОЛОВЬЁВ И.В.

Рассмотрено управление режимом компенсации емкостных токов, возникающих в месте однофазного замыкания на землю, по измеряемым параметрам контура нулевой последовательности распределительной электрической сети. Приведена краткая характеристика распределительных сетей с компенсацией емкостного тока. Отмечены недостатки существующих методов и средств автоматической настройки дугогасящих реакторов. Обоснована необходимость разработки способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети, лишенного недостатков известных методик настройки компенсации. Описан способ оценки параметров контура нулевой последовательности сети. Проведено исследование предложенного способа на модели контура и в условиях действующей распределительной сети. Результаты исследования подтверждают реализуемость предлагаемого способа оценки и его удовлетворительные метрологические характеристики.

Ключевые слова: распределительные сети среднего напряжения, однофазные замыкания на землю, компенсация емкостных токов, автоматика дугогасящего реактора, контур нулевой последовательности.

The control of the mode of compensation of capacitive currents arising in the place of a single-phase earth fault on the measured parameters of the circuit of the zero sequence of the distribution electric network is considered. A brief description of distribution networks with compensation of capacitive current is given. The drawbacks of existing methods and means of automatic adjustment of arc-extinguishing reactors are noted. The necessity of developing a method for estimating the parameters of the zero sequence circuit network devoid of shortcomings of known methods of compensation adjustment is substantiated. The method of estimation of parameters of a contour of zero sequence of a network is described. The study of the proposed method on the contour model and under the conditions of the current distribution network. The results of the study confirm the feasibility of the proposed method of evaluation and its satisfactory metrological characteristics.

Keywords: medium-voltage distribution networks, single-phase earth fault, compensation of capacitive currents, automation of arc-extinguishing reactor, zero-sequence circuit.

Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания

ЕГОРОВ Е.Г., ИВАНОВА С.П., ЛУИЯ Н.Ю., АФАНАСЬЕВ А.В., ПЕТРОВ А.А.

Рассмотрены процессы гашения дуги в автоматических выключателях переменного тока с деионной решеткой. Отмечено, что дугогасительная система автоматического выключателя должна быть работоспособна при отключении токов короткого замыкания, которые могут достигать более 100 кА, и токов от номинальных до критических значений в несколько десятков ампер. Одним из основных параметров дугогасительной системы является число пластин дугогасительной решетки, которое определяет габариты и отключающую способность автоматического выключателя. Предложена методика расчета числа промежутков, обеспечивающего надежное гашение дуги. Выявлено наиболее оптимальная конструкция дугогасительной камеры. Работоспособность автоматических выключателей должна подтверждаться прямыми коммутационными испытаниями, однако из-за большой коммутируемой мощности отключаемой цепи, которая предусмотрена нормативно-технической документацией, рекомендовано контролировать проверку работоспособности автоматических выключателей по результатам предварительных испытаний в синтетической схеме.

Ключевые слова: автоматический выключатель, отключающая способность, короткое замыкание, дугогасительная камера.

Arc quenching processes in automatic current circuit breakers with a deionic lattice are considered. It is noted that the arc-extinguishing system of the circuit-breaker must be operable by switching off short-circuit currents that can reach more than 100 kA and currents from nominal values to critical currents of several tens of amperes. One of the main parameters of the arcing system is the number of plates of the arc interrupter, which determines the dimensions and breaking capacity of the circuit breaker. A technique for calculating the number of gaps is proposed, which ensures reliable extinction of the arc in the arc chute chamber. Based on the analysis of the results of research on automatic circuit breakers, the most optimal design of an arc chute was revealed. The operability of the circuit breakers must be confirmed by direct switching tests. However, in connection with the large switched power of the disconnected

circuit, which is provided for in the regulatory and technical documentation, it is recommended to monitor the operation of the circuit breakers according to the results of preliminary tests in a synthetic circuit.

Key words: automatic circuit breaker, breaking capacity, short circuit, arcing system.

Электротехника, №8-2018, стр.15-19

Расчет клапанной магнитной системы максимального расцепителя тока автоматического выключателя

ЗАЙЦЕВ Н.Ю., ПЕТРОВ В.Н., СВИНЦОВ Г.П., СОРОКИН Н.Н.

Автоматические выключатели являются одним из наиболее широко распространенных электрических аппаратов в системах управления и распределения потоками электрической энергии, обеспечивающих защиту от коротких замыканий и токовых перегрузок. В первом случае автоматические выключатели должны обеспечить высокое быстродействие при отключении, которое может быть достигнуто при малой массе и значительных электромагнитных силах. Для приближенного определения размеров магнитной системы автоматических выключателей применяются методы теории цепей. При этом может быть существенно упрощена модель структуры магнитного поля. Проводимость воздушных промежутков между ферромагнитными элементами магнитной системы может быть описана модифицированным методом вероятных путей магнитного потока, сопротивление ферромагнитных элементов (падение магнитного потенциала) учтено математически выраженной кривой намагничивания (для стали марки 10895).

Ключевые слова: автоматический выключатель, магнитная система, максимальный расцепитель тока, короткое замыкание, нагрузочная характеристика, токоведущие шины, модифицированный метод Ротерса.

Circuit breakers are one of the most widely distributed electrical apparatus in control and distribution systems by electric energy flow, providing protection against short circuits, current overloads. In the first case, the circuit breakers must ensure a high speed at shutdown. High speed can be achieved with low mass and significant electromagnetic forces. For an approximate determination of the dimensions of the magnetic system, the methods of the theory of chains are used. In this case, the model of the structure of the magnetic field can be substantially simplified. The conductivity of air gaps between the ferromagnetic elements of the magnetic system can be

described by a modified method of probable magnetic flux paths, resistance of ferromagnetic elements (magnetic potential drop) is taken into account by using a mathematically described magnetization curve (for steel grade 10895).

Key words: circuit breaker, magnetic systems, maximal current release, short circuit, load characteristic, current-driving buses, modified Roters method.

Электротехника, №8-2018, стр.20-23

Расчет термобиметаллических расцепителей автоматических выключателей с косвенным нагревом на токи от 63 до 250 А

ЗАЙЦЕВ Н.Ю., ЗАЙЦЕВ Ю.М., НИКОЛАЕВ Н.Н., ПЕТРОВ В.Н.

Тепловые расцепители на основе термобиметаллических элементов (ТБЭ) формируют зависимую от тока часть защитной характеристики автоматического выключателя. В статье проанализированы устройство механизма свободного расцепления и характеристики термобиметаллического элемента. Сформулировано условие срабатывания теплового расцепителя на основе сопоставления механической характеристики исполнительного механизма и термомеханической характеристики ТБЭ. Выполнены экспериментальные исследования термобиметаллических расцепителей – аналогов разрабатываемых выключателей. С учетом результатов этих экспериментов разработана методика расчета термобиметаллического расцепителя, которая применима при всех видах нагрева ТБЭ (непосредственный, косвенный, комбинированный). Методика позволяет определить размеры ТБЭ, способы его нагрева, а также температуру срабатывания расцепителя в зависимости от номинального тока выключателя. Установлено, что для обеспечения возможности настройки тока срабатывания, а также надежной работы автоматических выключателей в условиях вибрации и ударов, необходимо предусматривать при их конструировании свободный ход ТБЭ. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало приемлемую для практических расчетов точность методики.

Ключевые слова: автоматический выключатель, термобиметаллический элемент, тепловой расцепитель, термомеханическая характеристика, исполнительный механизм, температура срабатывания, защитная характеристика.

Thermal releases based on thermobimetallic elements (TBE) form the current-dependent part of the protective characteristic of the circuit breaker. In work the device of the mechanism of free uncoupling and characteristics of a thermobimetallic element is analyzed. The condition for triggering a thermal release based on the comparison of the mechanical characteristics of the actuator and the thermomechanical characteristic of the TBE is formulated. Experimental studies of thermobimetallic releases have been carried out, analogues of the switches being developed. Taking into account the results of these experiments, a technique for calculating the thermobimetallic release has been developed, which is applicable for all types of heating of the sensitive element – TBE (direct, indirect, combined). The method allows to determine the geometrical dimensions of the TBE, its heating methods, as well as the trip temperature of the release, depending on the rated current of the switch. It is established that in order to ensure the possibility of adjusting the operating current, as well as reliable operation of the circuit breakers under vibration and shock conditions, it is necessary to provide for the free running of TBEs during their design. Comparison of the calculated and experimental data showed the accuracy of the method, acceptable for practical calculations.

Key words: circuit breaker, thermobimetallic element, thermal release, thermomechanical characteristic, actuator, operating temperature, protective characteristic.

Электротехника, №8-2018, стр.24-28

Повышение эффективности электропривода станка-качалки нефти

АФАНАСЬЕВ А.А., НЕСТЕРИН В.А., ГЕНИН В.С., МАТЮНИН А.Н., РОМАНОВ Р.А.

Рассмотрены вопросы энергоэффективности нефтедобывающих штанговых насосных установок с новыми альтернативными электроприводами на основе вентильных электродвигателей взамен существующих асинхронных. Приведены методика выбора главных размеров и электромагнитный расчет вентильных электродвигателей с использованием обычно применяющихся магнитных материалов. Сделан вывод, что в приводах станков-качалок нефти, оснащенных преобразователями частоты для регулирования скорости качаний, целесообразно применение вентильных электродвигателей взамен асинхронных. Это должно позволить уменьшить потребление электроэнергии приводом этих станков на 10–12%.

Ключевые слова: станок-качалка нефти, вентильный двигатель, электромагнитный расчёт, редкоземельные магниты.

The issues of energy efficiency of oil-producing rod pump units with new alternative electric drives based on gate electric motors are replaced in place of existing asynchronous ones. The procedure for selecting the main dimensions, electromagnetic calculation of the valve motors using commonly used magnetic materials is shown. It is concluded that in the drives of machine tools – oil shakers equipped with frequency converters for adjusting the speed of oscillation, it is advisable to use the valve motors instead of asynchronous ones. This should allow reducing the power consumption of the SKN drive by 10-12%.

Key words: oil rocking machine, valve motor, electromagnetic calculation, rare earth magnet.

Электротехника, №8-2018, стр.28-31

Проектирование минимизированного втяжного броневго электромагнита постоянного напряжения

ЗАЙЦЕВ Ю.М., КАДЫШЕВ Е.Н., ПЕТРОВ В.Н., РУССОВА Н.В., СВИНЦОВ Г.П.

Снижение массы материалов, используемых при создании электромагнитных аппаратов, уменьшение их габаритных размеров существенно повышает эксплуатационную привлекательность коммутационных аппаратов низкого напряжения, таких как реле, контакторы, пускатели. Решение этих задач возможно за счет форсированного управления их приводными электромагнитами и разработки методики минимизации массогабаритных показателей. Эти задачи решались при использовании в качестве привода втяжного броневго электромагнита постоянного напряжения. Для предпочтительной области факторного пространства исходных данных проектирования был выполнен вычислительный эксперимент в соответствии с ортогональным центрально-композиционным планом второго порядка для восьми переменных. Получены полиномиальные модели для оптимальных относительных размеров: рабочего воздушного зазора, высоты и толщины обмотки, высоты внешнего воротничка в долях оптимального диаметра сердечника, а также высоты стопа в долях обмотки. Рассмотрены примеры расчета оптимальных размеров электромагнита, минимизирующих его габаритный объем.

Ключевые слова: броневой электромагнит, габаритный объем, балластный резистор, минимизация.

Reducing the weight of the materials used in the creation of electromagnetic devices, reducing overall size of the latter greatly increases the attractiveness of operational switchgear low voltage such as relays, contactors, motor starters. Achieving selected indicators mainly possible due to the forced control of the driving electromagnets and the development of techniques to minimize the weight and size of their indexes. Identified problems are solved by using as a drive retractable armored electromagnet DC. For the preferred region of the factor space of initial design data was performed computer experiment in accordance with orthogonal central composite second order for up to 8 variables. Obtained polynomial models for optimal proportionality relative: working air gap, height and thickness of the winding, the height of the outer collar in fractions of optimal diameter of the core, as well as the height of the foot in the winding parts. Examples of the calculation of the optimal size of the electromagnet, minimizing its overall volume.

Key words: armored electromagnet, dimensional volume, minimization.

Электротехника, №8-2018, стр.33-35

Регистрация излучения в ближнем УФ-диапазоне для определения начального напряжения зажигания поверхностного разряда в воздухе

МАЛАХОВ Ю.И., ВОЕВОДИН В.В., СОКОЛОВА М.В.

Изложен метод регистрации излучения в ближнем ультрафиолетовом диапазоне, возникающего при поверхностном электрическом разряде. В эксперименте использовалась двухэлектродная система с медными плоскими электродами и барьером из органического стекла. На электроды однократно подавался прямоугольный импульс положительной полярности, параметры которого можно было регулировать в широких пределах: амплитуду от 1 до 10 кВ, а длительность – в диапазоне (1–10) мкс. Начальное напряжение разряда обычно измеряется для момента появления разрядного тока.

Возникающее при пробое излучение регистрировалось фотоэлектронным умножителем на длине волны 337 нм. Применение фотоэлектронного умножителя и осциллографа с высоким временным разрешением позволило установить соответствие между моментом появления разрядного тока и моментом возникновения излучения. Установлено, что эти два процесса начинаются одновременно. Это является важным обстоятельством, позволяющим более надёжно определить начальное напряжение возникновения разряда.

Ключевые слова: поверхностный барьерный разряд, импульсное высокое напряжение, напряжение зажигания разряда, излучение разряда.

The method of radiation registration in the near ultraviolet range, which occurs during a surface electric discharge, is described. In the experiment, a two-electrode system with two copper plane electrodes and a Plexiglas barrier was used powered by a single rectangular voltage pulse of positive polarity. The voltage impulse amplitude could be from 1 to 10 kV its duration being from 1 to 10 μ s. The initial voltage of the discharge appearance is usually measured for the moment of the discharge current appearance. The light emission that appeared with the discharge ignition was measured by means of a photomultiplier on wavelength equal to 337 nm. An application of a photo multiplier and an oscilloscope with high time resolution made it possible to establish an accurate correspondence between the moment of the discharge current appearance and the moment of the accompanied radiation appearance, which is it important for reliable definition of the initial voltage of the discharge.

Key words: surface barrier discharge, impulse high voltage, discharge ignition voltage, discharge radiation.

Электротехника, №8-2018, стр.36-39

К определению начального напряжения зажигания поверхностного разряда в воздухе

ВОЕВОДИН В.В., СОКОЛОВА М.В., РЕБРОВ И.Е.

Экспериментально получены значения начального напряжения зажигания поверхностного разряда в атмосферном воздухе в плоскопараллельной электродной системе с барьером из органического стекла различной толщины. К электродам прикладывались однократные импульсы напряжения с наносекундным фронтом, при этом осевший ранее на барьер заряд перед подачей импульсов напряжения тщательно удалялся. Получена характерная эмпирическая степенная зависимость начального напряжения от толщины барьера.

Приведены результаты расчета распределения электрического поля и значений напряжения зажигания разряда для измеренных геометрических параметров электродной системы с помощью программы BETAfields по предложенной ранее упрощенной методике, в которой критерием возникновения разряда является выполнение условия Таунсенда, без учета вторичных процессов на высоковольтном электроде и барьере. Сравнение полученных данных показывает, что использованная методика позволяет получить расчетную зависимость начального напряжения поверхностного разряда от толщины барьера, совпадающую с экспериментальными данными.

Ключевые слова: поверхностный барьерный разряд, импульсное высокое напряжение, напряжение зажигания разряда.

Experimental values of ignition voltage of a surface barrier discharge in atmospheric air in a plane-parallel electrode system with a barrier of Plexiglas of different thickness are presented. Single voltage pulses with nanosecond impulse fronts were applied. The charge on the dielectric barrier surface which earlier could appear was beforehand carefully neutralized. An empirical typical degree dependence of the ignition voltage of the discharge on the barrier thickness is received. The results of calculations of electric field distribution and of the values of ignition voltage of the surface discharge for the used geometrical parameters of the electrode system are presented. The calculations are done on base of the program BETAfields using an earlier developed simplified procedure in which the criterion of the discharge appearance is the realization of the Townsend condition and the secondary processes at the electrode and barrier surface are not taken into account. It is shown that calculations of the ignition voltage based on the simplified procedure makes it possible to obtain a calculated dependence of the initial discharge voltage of surface discharge on the thickness of the Plexiglas barrier, which coincides with the experimental data.

Key words: surface barrier discharge, impulse high voltage, discharge ignition voltage.

Электротехника, №8-2018, стр.39-45

Искусственное инициирование молнии в грозовых облаках группами модельных гидрометеоров

ТЕМНИКОВ А.Г., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., ОРЛОВ А.В., ЛЫСОВ Н.Ю., БЕЛОВА О.С.,
ЖУРАВКОВА Д.С., КИВШАР Т.К.

Сформулированы основные положения научных и инженерных основ способов искусственного инициирования внутриоблачной молнии и молнии «облако–земля» массивами модельных гидрометеоров. Установлено ключевое влияние размеров и формы модельных гидрометеоров на вероятность искусственного инициирования нисходящей или внутриоблачной молнии. Для этих целей подходят объемные гидрометеоры сантиметрового диапазона размеров. Предложено подразделение модельных гидрометеоров на пять классов, отличающихся коэффициентом усиления электрического

поля. Для искусственного инициирования молнии наиболее оптимальны модельные гидрометеоры, имеющие коэффициент усиления поля в диапазоне от 5 до 19. Найдено, что требования к типоразмерам и параметрам семейств модельных гидрометеоров и местам их введения в грозовое облако во многом будут определяться эффектом раннего возникновения на гидрометеорах лавинной короны, которая разряжает ближайшие области грозовых ячеек, приводя к локальному снижению напряженности поля, вероятности инициирования стримерной короны и ее перехода в объемный лидер. Определено, что объединение модельных гидрометеоров в группу диэлектрической леской или лентой и одновременное введение в грозовое облако нескольких массивов гидрометеоров существенно повысит вероятность искусственного инициирования внутриоблачной молнии и молнии «облако–земля» и успешной разрядки грозового облака. При этом минимальные линейные размеры отдельных групп гидрометеоров должны быть не менее нескольких десятков сантиметров. Предложено несколько вариантов мест размещения групп модельных гидрометеоров в грозовом облаке (вблизи нижней границы облака, внутри грозовой ячейки, в пространстве между грозowymi ячейками), при которых обеспечиваются наиболее оптимальные условия для инициирования внутриоблачной молнии и молнии «облако–земля».

Ключевые слова: нисходящая и внутриоблачная молнии, грозовое облако, грозковая ячейка, искусственное инициирование, группы модельных гидрометеоров, стримерная корона, объемный лидер, коэффициент усиления поля.

Basic provisions of the scientific and engineering fundamentals of the methods of a artificial initiation of the downward lightning and intracloud lightning by the model hydrometeor arrays have been formulated. Key influence of the model hydrometeor size and form on the probability of an artificial initiation of the downward lightning and intracloud lightning has been established. Volume hydrometeors of the centimeter size are fitted to these aims. Dividing of the model hydrometeors on the five classes differing on the electric field amplification coefficient has been proposed. Model hydrometeors with the amplification coefficient from 5 to 19 will be the most optimal for an artificial lightning initiation. It was found that the requirements to the sizes and parameters of the model hydrometeor families and to the places of their introduction in thundercloud will be determined in most by the effect of the earlier appearance of the avalanche corona on the hydrometeors. It discharges the nearest parts of the thunderstorm cells leading to the local decreasing of the field strength, probability of the streamer corona initiation, and its transition into the volume leader. It was determined that the combining of the model

hydrometeors in the group by the dielectric string or tape and the simultaneous introduction in thundercloud of some hydrometeor arrays will significantly increase the probability of the artificial initiation of the intracloud lightning and lightning “cloud – ground”, and the successful discharging of thundercloud. And, the minimal linear sizes of the separate hydrometeor group should be more than some tens of centimeters. Some variants of the disposition of the model hydrometeor group in thundercloud (near the bottom boundary of the thunderstorm cell, inside thunderstorm cell, in the space between the thunderstorm cells) when the most optimal conditions for the initiation of the intracloud lightning and lightning “cloud – ground” have been provided have been proposed.

Key words: downward and intracloud lightnings, thundercloud, thunderstorm cell, artificial initiation, model hydrometeor groups, streamer corona, volume leader, field amplification coefficient.

Электротехника, №8-2018, стр.46-52

Резонансные перенапряжения в первичной обмотке трансформатора отбора мощности

ЛАРИН В.С., МАТВЕЕВ Д.А., ЖУЙКОВ А.В., КУБАТКИН М.А., НИКУЛОВ И.И.

При проектировании новых видов трансформаторного оборудования, такого как трансформаторов отбора мощности требуется детальное рассмотрение всех технических аспектов и условий их применения с учетом особенностей их конструкции. Одной из задач является обеспечение их стойкости к воздействиям, возникающим при их взаимодействии с сетью. В переходных режимах электрической сети, вызванных работой коммутационной аппаратуры или короткими замыканиями, на трансформаторы воздействуют колебательные напряжения, которые при определенных условиях могут вызвать резонансные перенапряжения внутри обмоток. В отличие от традиционных силовых трансформаторов, в трансформаторах отбора мощности применяются другие типы и конструкции обмоток, что определяет существенное различие в частотах собственных колебаний и теоретическую возможность развития резонансных перенапряжений при других сочетаниях параметров сети и коммутаций. В статье рассмотрены вопросы определения доминирующих частот колебаний, собственных частот колебаний обмоток и напряжений на продольной изоляции обмоток трансформаторов при резонансных условиях. Рассмотренные подходы применимы не только к трансформаторам отбора мощности, но и к другим типам трансформаторного оборудования.

Ключевые слова: трансформаторы отбора мощности, коммутационные перенапряжения, резонансные перенапряжения, обмотки трансформаторов, резонансные частоты обмоток, собственные частоты колебаний.

The design of new types of transformers, such as station service voltage transformers (SSVT), requires detailed consideration of all technical aspects and conditions of their application and their design features. One of the problems is to ensure that the transformers will be able to withstand the impacts occurring during their interaction with the grid. During the transient events in the network caused by the operation of switching equipment or short circuits, the transformers are affected by an oscillating voltage, which under certain conditions can cause resonant overvoltages inside their windings. The design of SSVTs differ from traditional power transformers, mostly because different types of windings are used, which determines the essential difference in the frequencies of natural oscillations and the theoretical possibility of resonance overvoltages occurrence in some combinations of network parameters and switching conditions. The problems of estimating of natural and dominating frequencies of oscillations in SSVT primary windings and voltages on longitudinal (interlayer) insulation of SSVT windings in resonant conditions are considered in the paper. The proposed approach is applicable not only to SSVTs, but also to other types of transformer equipment.

Key words: station service voltage transformers, switching overvoltages, resonant overvoltages, transformer windings, winding resonant frequencies, winding natural frequencies.

Электротехника, №8-2018, стр.54-59

Силовые взаимодействия в магнитных системах с объемными высокотемпературными сверхпроводниками

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

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований силовых взаимодействий между постоянными магнитами и объемными высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП). Полученные данные представляют интерес для проектирования различных устройств с ВТСП элементами: магнитных подшипников, транспортных систем с магнитной левитацией, электрических машин и др. Численный анализ электромагнитного поля в рассмотренных задачах выполнен методом пространственных интегральных уравнений для источников поля. Свойства

использованных ВТСП материалов из YBaCuO керамики представлены традиционной моделью для транспортных токов и комбинированной моделью, позволяющей учитывать два типа источников поля внутри сверхпроводника – плотности транспортного тока и связанных токов (намагниченности). Для плотности транспортного тока применена одна из модификаций модели критического состояния, в которой удельное электрическое сопротивление сверхпроводника представлено гиперболической функцией трех параметров: абсолютной температуры, напряженности магнитного поля и плотности тока. Модель для намагниченности базируется на определении связанных токов в виде плотности магнитных моментов совокупности малых сверхпроводящих цилиндров в объеме образца ВТСП. Экспериментальные исследования выполнены на установках с системами криостатирования ВТСП в среде жидкого азота и устройствами прецизионных измерений сил. Сравнение результатов экспериментов и расчетных данных подтверждают достоверность разработанных методов моделирования.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, постоянные магниты, силовые взаимодействия, метод расчета, модель свойств, экспериментальные исследования.

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of force interactions between permanent magnets and bulk high-temperature superconductors (HTS). The obtained data are of interest for the design of various devices with HTS elements: magnetic bearings, transport systems with magnetic levitation, electric machines, etc. Numerical analysis of the electromagnetic field was performed by the method of spatial integral equations for field sources. The properties of the HTS materials (YBaCuO ceramics) are represented by a traditional model for transport currents and a combined model, which considers two types of field sources inside the superconductor—the transport current density and the related currents (magnetization). For the transport current density, one of the modifications of the critical state model is applied, in which the specific electric resistance of the superconductor is represented by the hyperbolic function of three parameters: absolute temperature, magnetic field strength and current density. The model for magnetization is based on the definition of related currents as the density of magnetic moments of a set of small superconducting cylinders in the bulk high-temperature superconductor sample. Experimental studies were performed on specially designed installations with cooling systems with liquid nitrogen for high-temperature superconductors and force sensors. Comparison of the results of experiments and calculation data confirms the reliability of the developed modeling methods.

Key words: high-temperature superconductor, permanent magnets, force interactions, method of calculation, model of properties, experimental studies

Электротехника, №8-2018, стр.60-67

Особенности декомпозиции электрического контура печи графитации при моделировании электромагнитных полей переменного тока

ЯРЫМБАШ Д.С., КИЛИМНИК И.М., ЯРЫМБАШ С.Т.

Существующие методы расчетов электромагнитных процессов в системе токоподводов печи графитации и шинных пакетов печной петли требуют принятия существенных допущений, которые значительно искажают реальную картину и не отвечают современным требованиям по точности. Применение трехмерного полевого моделирования ограничено устойчивостью вычислительного процесса, значительными затратами вычислительных ресурсов и времени. В статье выполнено численное моделирование сопряженных пространственных электрических и магнитных полей в области систем шинных пакетов печной петли, токоподводов и керна печей графитации переменного тока методом конечных элементов. Разработан новый метод декомпозиции и динамического синтеза параметров по критерию минимизации токовой погрешности для расчета электрических контуров систем питания электропечей сопротивления прямого нагрева. Метод обеспечивает высокую точность расчета активных и индуктивных сопротивлений, потерь активной мощности и энергии магнитного поля по данным трехмерного численно-полевого моделирования сложных систем шинных пакетов печной петли, токоподводов и керна печи графитации. Определены критерии декомпозиции трехмерных областей систем проводников переменного тока, имеющих сложную пространственно-геометрическую конфигурацию на подобласти. Применение метода конечных элементов и метода декомпозиции 3D области печной петли печи графитации переменного тока малой мощности обеспечило высокую точность и вычислительную эффективность численной реализации трехмерного моделирования электромагнитных полей. Относительные погрешности метода не превышают 0,35 % – для энергии магнитного поля, 1,45 % – для электрических потерь, 1,48 % – для модуля падения напряжения и 0,67 % – для фаз падения напряжения по сравнению с данными численно-полевого моделирования электрического контура печной петли. Предложенный метод может применяться при расчетах параметров электрических машин и коротких сетей

ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.

Ключевые слова: печи графитации, электромагнитное поле, моделирование.

The current calculation methods are required of significant assumptions. It's significantly deformed the real picture of the electromagnetic processes in the complicated spatial system of the current feeders of graphitization furnace and furnace loop busbar packages and isn't satisfied the requirements of accuracy requirements. The using of three-dimensional field modeling are limited of increasing computing resources, calculation time, computational process instability and series of difficulties. The numerical modeling of conjugate electric and magnetic spatial fields in domain of the furnace loop busbar packages, current feeders and AC graphitization furnace core using the finite element method are performed in the paper. The new method of decomposition and dynamic synthesis parameters of the minimizing criterion of the current error are developed for circuit calculation of high-current electrical power supply systems of AC electric resistance furnaces of direct heating. This method and using the data of the three-dimensional numerical-field modeling in domain of furnace loop busbar packages, current feeders and of graphitization furnace core are provided the high accuracy of calculation of the resistance and reactance, active power losses, the magnetic field energy. The subdomain decomposition criteria of three-dimensional regions of the AC system conductors of the complicated spatial geometric configuration are defined. The application of finite element method and method of decomposition of the 3D domain of furnace loop of low-power AC graphitization furnace are provided high accuracy and computational efficiency of numerical implementation of three-dimensional modeling of electromagnetic fields. The according the data of numerical-simulation field of electric furnace circuit loop are presented the relative error of the magnetic field energy less than 0,35%, electrical losses – 1,45%, the voltage module – 1,48% and voltage angular error – 0,67%. The proposed method can be used in the calculation of parameters of electrical machines and short-circuit arc furnaces.

Key words: graphite furnaces, electromagnetic field, simulation.

Электротехника, №8-2018, стр.67-73

Моделирование движения электромобиля в стандартном цикле

СЛЕПЦОВ М.А., ОМАРА А.М.

Выполнено моделирование энергосиловой установки электрического транспортного средства при питании от батареи аккумуляторов. Тяговый привод содержит четыре электродвигателя по числу ведущих колёс (колёсная формула 4x4). Мощность тяговых двигателей передних и задних колёс выбрана различной для анализа энергетической эффективности привода в различных режимах движения и при меняющемся профиле пути за счёт изменения соотношения распределения мощности колёс. Предложены алгоритмы управления питанием тяговых двигателей посредством контроллера, позволяющего реализовать стратегию распределения потока энергии аккумуляторной батареи между передними и задними ведущими колёсами. Выполнен расчёт мощности электродвигателей и параметров аккумуляторной батареи. Моделирование энергосиловой установки электрического транспортного средства выполнено в условиях движения по новому европейскому циклу (ECE15 и EUDC) с помощью пакета программ AVL CRUISE, разработана функциональная схема модели тягового электропривода. Модульное построение инструмента позволяет просто и удобно исследовать разные конфигурации транспортных средств. Полученные результаты показали, что предложенная конфигурация тягового электропривода с ведущими колёсами, оснащёнными двигателями разной мощности, и разработанный алгоритм управления ими позволяют решить задачу экономного расходования энергии аккумуляторной батареи и обеспечить требуемую дальность пробега в стандартном цикле.

Ключевые слова: тяговый электропривод, электрическое транспортное средство, тяговый электродвигатель, батарея аккумуляторов, накопители электроэнергии.

The paper presents the design and simulation investigation of a power train system used for battery electric vehicle. The proposed electric propulsion system consists of four independently driven in-wheel traction motors. Rear and front traction motors are selected with different power ratings for analyzing the energy efficiency of the drive system in various modes of operation under the driving cycle variations. The power management and control algorithm is proposed by means of a rule-based controller, which allows implementing the strategy of battery power distribution between the front and rear driving wheels. The power of the electric motors and the parameters of the battery are calculated and presented in this paper. The new European driving cycle is adopted as the motion profile, which is composed of the two European cycles (ECE15 and EUDC). The simulation of the entire power train system of battery electric vehicle is implemented using the AVL CRUISE software package. The modular construction of the

program allows simple and convenient way to explore different vehicle configurations. The obtained simulation results show that the proposed power train system matches the design specifications of battery electric vehicle dynamic performance and allows solving the problem of economical energy consumption of the battery in order to provide the required driving range in the standard cycle.

Key words: power train system, battery electric vehicle, traction motor, battery power, storage of electricity.

Электротехника, №8-2018, стр.74-81

Стабилизатор напряжения с параметрическим управлением

КОРШУНОВ А.И.

Рассмотрено применение параметрического управления в системе стабилизации напряжения постоянного тока, представляющее собой изменение сопротивления резистора, включенного последовательно с нагрузкой. Регулирование сопротивления осуществляется путем изменения относительной длительности шунтирования резистора контактом ключа, происходящего с высокой частотой. Фильтр из дросселя и конденсатора, включенный между коммутируемым резистором и нагрузкой позволяет сгладить пульсации напряжения на нагрузке до допустимого уровня. Построена предельная непрерывная модель стабилизатора напряжения с интегральным регулятором. Определен стационарный режим и получено условие его асимптотической устойчивости по линеаризованному уравнению возмущенного движения. Показано, что при использовании во вторичных источниках питания стабилизатор с параметрическим управлением имеет определенные преимущества перед стабилизатором, использующим импульсный понижающий преобразователь напряжения. Исследование рассчитанного стабилизатора на математической модели показало хорошее совпадение экспериментальных и расчетных результатов.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения постоянного тока, параметрическое управляющее воздействие.

Application of self-reactance management is considered in the system of stabilizing of direct-current voltage. Self-reactance managing influence is a change of resistance of the resistor

included consistently with loading. Adjusting of resistance comes true by the change of relative duration of short circuit of the resistor carried out with high-frequency. Filter from a throttle and condenser, included between resistor and loading allows to smooth out the voltage pulsations on loading to the possible size. The limited continuous model of voltage stabilizer is built with an integral regulator. The stationary mode is certain and the condition of his asymptotic stability is got on the linearized equation of perturbed motion. It is shown that at the use in the secondary sources of feed a stabilizer with a self-reactance management has certain advantages before a stabilizer using impulsive lowering transformer. Research of the expected stabilizer on a mathematical model showed the good coincidence of experimental and calculation results.

Key words: direct-current voltage stabilizer, self-reactance managing influence.