

Содержание

Электротехника, 2024, №3, стр. 2-12

Уточненный анализ применения совмещенных обмоток звезда-треугольник в трехфазных электродвигателях

КАЗАКОВ Ю.Б., СМИРНОВ Д.С., КИСЕЛЕВ М.А., НОВИКОВ И.А., ЗАХАРОВ А.В.

Применение совмещенных обмоток звезда-треугольник в трехфазных электродвигателях может обеспечить снижение дифференциального рассеяния, индуктивного сопротивления, дополнительных потерь и электромагнитного шума от высших пространственных гармоник магнитного поля. Использование совмещенных обмоток с увеличенным в два раза числом параллельных структур позволяет в большем диапазоне изменять число параллельных ветвей обмотки. Теоретические преимущества совмещенных обмоток не всегда достижимы в трехфазных электродвигателях на практике, так как для эффективной совместной работы обмоток звезда-треугольник необходимо выполнять условия параллельной работы. Несоблюдение условий приводит к ухудшению эффективности работы электродвигателей. Выбор совмещенных обмоток в трехфазных электродвигателях необходимо осуществлять на основе уточненного электромагнитного анализа. Предложен алгоритм расчета совмещенных обмоток с последовательным соединением обмоток звезда-треугольник. Уточненный гармонический анализ магнитодвижущих сил, дифференциального рассеяния и распределения индукции магнитного поля в зазоре подтвердил снижение влияния высших пространственных гармоник при использовании совмещенных обмоток. Прямой пуск электродвигателя с совмещенной обмоткой вследствие повышенного пускового момента и сниженного влияния высших пространственных гармоник магнитного поля осуществляется быстрее и с меньшими пульсациями скорости во время разгона.

Ключевые слова: трехфазный электродвигатель, асинхронный двигатель, совмещенная обмотка звезда-треугольник, параллельное и последовательное соединения, электромагнитные процессы, дополнительные потери, эффективность.

The use of combined star-triangle windings in three-phase electric motors can reduce differential scattering, inductive resistance, additional losses and electromagnetic noise from higher spatial harmonics of the magnetic field. The use of combined windings with a doubled number of parallel structures makes it possible to change the number of parallel branches of the winding in a larger range. The theoretical advantages of combined windings are not always achievable in three-phase electric motors in practice, since for effective joint operation of the star-triangle windings, it is necessary to meet the conditions of parallel operation. Failure to comply with the conditions leads to a deterioration in the efficiency of electric motors. The selection of combined windings in three-phase electric motors must be carried out on the basis of a refined electromagnetic analysis. An algorithm for calculating combined windings with a serial connection of star-triangle windings is proposed. The refined harmonic analysis of magnetomotive forces, differential scattering and magnetic field induction distribution in the gap confirmed the decrease in the influence of higher spatial harmonics when using combined windings. Direct start of an electric motor with a combined winding due to the increased starting torque and the reduced influence of higher spatial harmonics of the magnetic field is carried out faster and with lower speed pulsations during acceleration.

Key words: three-phase electric motor, asynchronous motor, combined star-triangle winding, parallel and serial connections, electromagnetic processes, additional losses, efficiency.

Электротехника, 2024, №3, стр. 13-19

Снижение потерь в роторе мощных синхронных магнитоэлектрических генераторов

ИВАННИКОВ Ю.Н., ЗУБКОВ Ю.В., МАКАРИЧЕВ Ю.А.

Рассмотрена возможность снижения добавочных потерь в постоянных магнитах путем уменьшения влияния высших гармонических на магнитное поле в воздушном зазоре. Рассмотрены различные типы обмоток статора и предложены конструктивные меры по выбору оптимальной формы магнитов в радиально возбуждаемых генераторах с позиции снижения высших гармонических и, следовательно, потерь в роторе. При решении поставленных задач использовались методы численного моделирования стационарного и нестационарного магнитного полей.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, синхронный генератор с

постоянными магнитами, синхронный генератор с прямым приводом, потери в магнитах, повышение энергоэффективности.

The possibility of reducing additional losses in permanent magnets by reducing the influence of higher harmonic ones on the magnetic field in the air gap is considered. Various types of stator windings are considered and constructive measures are proposed to select the optimal shape of magnets in radially excited generators from the position of reducing higher harmonic and, consequently, losses in the rotor. Methods of numerical simulation of stationary and non-stationary magnetic fields were used to solve the tasks.

Key words: wind power plant, synchronous generator with permanent magnets, synchronous generator with direct drive, losses in magnets, energy efficiency improvement.

Электротехника, 2024, №3, стр. 20-27

Пульсации момента в машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами

БАБИЦКИЙ Д.Ю., ТОПОРКОВ Д.М, ГЕЙНРИХ Г.О.

Выполнено исследование пульсаций момента в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами. Рассмотрена конструкция магнитной системы с расположением постоянных магнитов на цилиндрической поверхности ротора. Анализ проведен с использованием метода гармонических составляющих. Рассмотрено образование момента при взаимодействии гармоник магнитодвижущей силы, создаваемой дробными зубцовыми обмотками, гармоник магнитодвижущей силы возбуждения, образованной постоянными магнитами, при постоянной и переменной эквивалентной магнитной проводимости. Получены аналитические выражения, описывающие возникновение пульсаций момента.

Ключевые слова: дробная зубцовая обмотка, постоянные магниты, магнитодвижущая сила, магнитная проводимость, пульсации момента.

A study of moment pulsations in electric machines with fractional tooth windings and permanent magnets has been carried out. The design of a magnetic system with the arrangement of

permanent magnets on the cylindrical surface of the rotor is considered. The analysis was carried out using the method of harmonic components. The formation of a moment during the interaction of the harmonics of the magnetomotive force created by fractional tooth windings, the harmonics of the magnetomotive excitation force formed by permanent magnets, with constant and variable equivalent magnetic conductivity, is considered. Analytical expressions describing the occurrence of moment pulsations are obtained.

Key words: fractional tooth winding, permanent magnets, magnetomotive force, magnetic conductivity, moment pulsations.

Электротехника, 2024, №3, стр. 28-33

Трёхмерная аналитическая модель магнитоэлектрического вентильного двигателя АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассмотрена математическая модель магнитоэлектрического вентильного двигателя, основанная на решении трёхмерного уравнения Лапласа в частных производных методом разделения переменных для вложенных друг в друга полых цилиндров конечной длины, граничные условия для которых совпадают с граничными условиями магнитного поля, вызванного постоянными магнитами в закрытых каналах ротора, токами обмотки статора и наведенными намагниченностями в обоих сердечниках. Постоянные метода разделения переменных находятся из решения системы линейных алгебраических уравнений, матрица которой в рассматриваемом примере имеет размер 24×18 . Элементами матрицы являются функции Бесселя, Инфельда и Макдональда с соответствующими собственными числами. Анализируется распределение магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя. Показано, что радиальная составляющая индукции на ограниченном участке вблизи края сердечников испытывает всплеск. При равном укорочении длины сердечников статора и ротора наблюдается увеличение радиальной магнитной индукции в воздушном зазоре из-за роста плотности магнитного потока в нём, вызванного постоянством МДС магнитов ротора и статора в указанной процедуре.

Ключевые слова: магнитоэлектрический двигатель, индукция в воздушном зазоре, электромагнитный момент, трёхмерная аналитическая модель, разделение переменных, неизвестные постоянные, цилиндрические функции Бесселя.

A mathematical model of a magnetoelectric valve motor based on the solution of the three-dimensional Laplace equation in partial derivatives by the method of separation of variables for nested hollow cylinders of finite length, the boundary conditions for which coincide with the boundary conditions of the magnetic field caused by permanent magnets in the closed channels of the rotor, stator winding currents and induced magnetizations in both cores, is considered. The constants of the method of separating variables are found from the solution of a system of linear algebraic equations, the matrix of which in the example under consideration has a size of 24×18 . The elements of the matrix are the Bessel, Infeld and MacDonald functions with corresponding eigenvalues. The distribution of magnetic induction in the engine air gap is analyzed. It is shown that the radial component of induction in a limited area near the edge of the cores experiences a surge. With an equal shortening of the length of the stator and rotor cores, an increase in radial magnetic induction in the air gap is observed due to an increase in the magnetic flux density in it caused by the constancy of the MDS of the rotor and stator magnets in this procedure.

Key words: magnetoelectric motor, induction in the air gap, electromagnetic moment, three-dimensional analytical model, separation of variables, unknown constants, cylindrical Bessel functions.

Электротехника, 2024, №3, стр. 34-47

Прямое управление моментом четырехфазного вентильно-индукторного двигателя для привода электромобилей

КРАСОВСКИЙ А.Б., ТИХОНОВ А.И., ВАСЮКОВ С.А., СНИТЬКО И.С., ВОСТОРГИНА Е.С.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) являются конкурентами традиционным двигателям в электрическом транспорте благодаря их высоким удельным показателям и отсутствию постоянных магнитов и обмоток в конструкции ротора, что повышает их надежность и снижает затраты на производство. В силу сильно выраженной нелинейности их магнитных характеристик и дискретности в управлении для ВИД характерны значительные пульсации момента, шум и вибрации, для подавления которых целесообразно использовать прямое управление мгновенным моментом (DITC), оно широко используется в традиционных электроприводах. Однако ВИД отличаются от традиционных двигателей, поэтому к ним нельзя применить известные технические решения. Имитационное моделирование является удобным и универсальным средством для исследования и разработки методов и алгоритмов управления ВИД, а среда MATLAB

Simulink позволяет его успешно реализовать. В статье применительно к четырехфазному ВИД рассмотрены два наиболее известных и принципиально отличающихся между собой варианта DITC, обоснованы и проиллюстрированы их недостатки и предложен новый вариант DITC, наиболее подходящий для управления ВИД в составе тягового электропривода электромобилей.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, прямое управление моментом, пульсации момента, повышение удельных показателей, моделирование.

Valve-inductor motors (VIM) are competitors to traditional motors in electric transport due to their high specific characteristics and the absence of permanent magnets and windings in the rotor design, which increases their reliability and reduces production costs. Due to the strongly pronounced nonlinearity of their magnetic characteristics and discreteness in control, they are characterized by significant moment pulsations, noise and vibrations, to suppress which it is advisable to use direct instantaneous moment control (DITC), it is widely used in traditional electric drives. However, the VIM differs from traditional engines, so well-known technical solutions cannot be applied to them. Simulation modeling is a convenient and versatile tool for the research and development of methods and algorithms for data management, and the MATLAB Simulink environment allows it to be successfully implemented. In the article, with regard to the four-phase VIM, two of the most well-known and fundamentally different DITC variants are considered, their disadvantages are justified and illustrated, and a new DITC variant is proposed, the most suitable VIM for control as part of an electric traction drive of electric vehicles.

Key words: valve-inductor motor, direct torque control, torque pulsations, increase in specific indicators, modeling.

Электротехника, 2024, №3, стр. 48-56

Алгоритм синхронизации системы управления многоканального электромеханического рулевого привода

КУЗНЕЦОВ В.Е., ЛУКИЧЕВ А.Н., НГУЕН Д.Х., БОГДАНОВА С.М., ФИЛАТОВ Д.М.

В статье рассматривается распространенный способ построения многоканальной системы управления рулевым органом авиационной техники. Для повышения надежности органа управления использована структура гибридных рулевых приводов, состоящая из электромеханического и гидравлического приводов. Использование разных приводов определяет построение адаптивного алгоритма синхронизации положения разнородных

приводов для уменьшения сил взаимонагружения системы приводов органа управления. Приведен метод синтеза адаптивного алгоритма синхронизации положения и силы для двух каналов приводов с учетом их нелинейного трения и нелинейной скоростной характеристики гидравлического клапана. Сравнение эффективности алгоритмов синхронизации выполнены в среде MATLAB Simulink.

Ключевые слова: электромеханический рулевой привод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, алгоритм синхронизации, адаптивный алгоритм, трение, выравнивание сил взаимонагружения.

The article discusses a common way to build a multichannel control system for the steering body of aviation equipment. To increase the reliability of the control body, the structure of hybrid steering drives, consisting of electromechanical and hydraulic drives, is used. The use of different drives determines the construction of an adaptive algorithm for synchronizing the position of dissimilar drives to reduce the forces of mutual loading of the drive system of the control body. A method for synthesizing an adaptive position and force synchronization algorithm for two drive channels is presented, taking into account their nonlinear friction and the nonlinear velocity characteristics of a hydraulic valve. The comparison of the efficiency of synchronization algorithms was performed in the MATLAB Simulink environment.

Key words: electromechanical steering drive, synchronous motor with permanent magnets, synchronization algorithm, adaptive algorithm, friction, alignment of forces of mutual loading.

Электротехника, 2024, №3, стр. 57-62

Управление компенсирующим устройством в электрической сети горного предприятия

МАЛАФЕЕВ С.И., МАЛАФЕЕВА А.А.

В электрических сетях горных предприятий питание мощных нагрузок, например, карьерных экскаваторов, осуществляется с помощью консольных линий. При работе циклической мощной резкопеременной нагрузки и рекуперации энергии наблюдаются отклонения и колебания напряжения. Рассмотрен способ снижения колебаний напряжения в такой сети с помощью компенсирующего устройства, алгоритм работы которого предусматривает регулирование емкостного/индуктивного тока в питающей линии пропорционально активной составляющей тока нагрузки. Коэффициент

пропорциональности между реактивным током линии и активным током нагрузки принимается равным отношению активного и индуктивного сопротивлений питающей линии. Комплексное сопротивление питающей электрической сети предполагается известным или идентифицируется в процессе работы. Приведены формулы для расчета токов в системе электропитания для различных режимов. Выполнено компьютерное моделирование электроэнергетических процессов при работе тиристорно-реакторного компенсирующего устройства со специальным регулятором.

Ключевые слова: электрическая сеть горного предприятия, компенсирующие устройства, колебания напряжения, моделирование.

In the electrical networks of mining enterprises, powerful loads, such as quarry excavators, are powered using cantilever lines. During the operation of a cyclic high-power alternating load and energy recovery, voltage deviations and fluctuations are observed. A method for reducing voltage fluctuations in such a network is considered using a compensating device, the algorithm of which provides for the regulation of capacitive/inductive current in the supply line in proportion to the active component of the load current. The proportionality coefficient between the reactive line current and the active load current is assumed to be equal to the ratio of the active and inductive resistances of the supply line. The complex resistance of the power supply network is assumed to be known or identified during operation. Formulas for calculating currents in the power supply system for various modes are given. Computer simulation of electric power processes during operation of a thyristor-reactor compensating device with a special regulator has been performed.

Key words: electric network of a mining enterprise, compensating devices, voltage fluctuations, modeling.

Электротехника, 2024, №3, стр. 63-67

Гармоники напряжений в сети, создаваемые индукционным нагревателем, питаемым транзисторным генератором

БУКАНИН В.А., ИВАНОВ А.Н., ВОЛОГДИН В.В., ВОЛОГДИН ВЛ.В.

Рассмотрены проблемы электромагнитной совместимости, связанные с наличием в сети общего назначения искажений синусоидального напряжения при подключении систем индукционного нагрева металлов. Одним из источников эмиссии гармоник напряжения является проектируемая индукционная установка высокой частоты для нагрева

графитового цилиндра на базе транзисторного генератора ВГТ 8-50/10. Рассмотрены проблемы низкочастотных кондуктивных помех, создаваемых при работе индукционной установки для нагрева графитового цилиндра на высокой частоте. Приведены результаты экспериментальных исследований искажения синусоидальности кривой напряжения в питающей сети. Выполнены измерения коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициентов n -й гармонической составляющей. Получены кривые напряжения и тока в сети на входе транзисторного источника питания ВГТ частотой 10 кГц при подключении его к индуктору мощностью 12 и 20 кВт. Выполнены измерения гармоник напряжения и сравнение их с предельными нормативными параметрами. Зафиксированы номера гармоник, на которых имеются превышение допустимых значений напряжений.

Ключевые слова: индукционный нагрев, транзисторный генератор, электромагнитная совместимость, кондуктивные помехи, гармоники напряжений.

The problems of electromagnetic compatibility related to the presence of sinusoidal voltage distortions in the general-purpose network when connecting induction heating systems for metals are considered. One of the sources of voltage harmonic emission is a projected high-frequency induction installation for heating a graphite cylinder based on a transistor generator VGT 8-50/10. The problems of low-frequency conductive interference created during the operation of an induction installation for heating a graphite cylinder at high frequency are considered. The results of experimental studies of the distortion of the sinusoidal voltage curve in the supply network are presented. The non-sinusoidal voltage coefficient and the coefficients of the n th harmonic component were measured. The curves of voltage and current in the network at the input of a transistor VGT power supply with a frequency of 10 kHz when connected to an inductor with a power of 12 and 20 kW are obtained. Voltage harmonics were measured and compared with the maximum regulatory parameters. The numbers of harmonics that exceed the permissible voltage values are recorded.

Key words: induction heating, transistor generator, electromagnetic compatibility, conductive interference, voltage harmonics.

Электротехника, 2024, №3, стр. 68-75

Особенности охлаждения токовводов (концевых устройств) силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников

БУЯНОВ Ю.Л.

Рассмотрены конструктивные схемы и способы охлаждения высоковольтных концевых устройств (токовводов) силовых сверхпроводящих кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников. На базе теоретических тепловых моделей, описывающих распределение температуры и теплового потока вдоль токовводов при идеальном и реальном теплообмене, проведён анализ их работы в условиях охлаждения газообразным азотом или гелием. Показано изменение соотношения оптимальных плотностей тока и удельных теплопритоков к источнику холода в зависимости от расхода и природы охлаждающего газа. Количественно определено, что применение газообразного гелия для охлаждения токоведущих элементов концевого устройства даёт существенный эффект по сравнению с азотом.

Ключевые слова: ВТСП силовые кабели, газоохлаждаемые токовводы, конструкция концевых устройств, способы криогенного охлаждения.

Design schemes and methods for cooling high-voltage terminals (current leads) of power superconducting cables based on high-temperature superconductors are considered. On the basis of theoretical thermal models describing the distribution of temperature and heat flow along the current leads under ideal and real heat transfer, an analysis was made of their operation under conditions of cooling with gaseous nitrogen or helium. The change in the ratio of optimal current densities and specific heat inflows to the cold source is shown depending on the flow rate and nature of the cooling gas. It has been quantitatively determined that the use of gaseous helium for cooling the current-carrying elements of the terminals gives a significant effect compared to nitrogen.

Key words: HTS power cables, gas-cooled current leads, design of terminals, cryogenic cooling methods.

Электротехника, 2024, №3, стр. 76-77

Авторы номера