

Моделирование процессов в асинхронном двигателе с поврежденным стержнем короткозамкнутого ротора в режиме выбега

НОВОЖИЛОВ А.Н., ПОТАПЕНКО А.О., НОВОЖИЛОВ Т.А.

В статье рассмотрен метод моделирования процессов асинхронного двигателя с поврежденными стержнями короткозамкнутого ротора в режиме выбега, основанный на использовании математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, дифференциальные уравнения которой составлены по методу контурных токов для междуфазных напряжений. Обоснован упрощенный метод представления токов в стержнях короткозамкнутого ротора, а также приведены математические выражения для определения электродвижущей силы обмотки статора в режиме выбега. Выполнена экспериментальная проверка результатов моделирования. Представлены результаты расчетов и экспериментов. Показано, что предложенный метод с погрешностью 10-15% позволяет моделировать гармонический спектр распределения токов в стержнях «беличьей клетки» ротора, скорость вращения ротора и коэффициент затухания этих токов при выбегае, а также ЭДС индуцируемую в обмотках статора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, системы диагностики повреждения ротора, математическая модель асинхронного двигателя, режим выбега, обрыв стержней ротора.

The article designed to extension the theoretical foundations of building diagnostic systems of fault detection of square-cage rotor in induction motor. The method of modeling processes of the induction motor with rotor's broken bars in runout regime, is based on using a mathematical model of the induction motor with square-cage rotor, is presented. Differential equations in this model are generated by mesh formulation for voltage between phases. The simplified method of formulation current in square-cage rotor's bars is justified, and mathematical treatments are adduced for determining the electromotive difference of potential of the stator winding in runout regime. The experimental checking of modeling results was realized. The results of calculation and experiment were presented. It was found that the proposed method allows to simulate the harmonic spectrum of the current distribution in the square-cage rotor's bars , rotor's rate of turn, numerical decrement of this currents in runout regime, and electromotive difference of potential are induced in the stator windings with an accuracy of 10-15%.

Key words: induction motor, square-cage rotor, diagnostic system of rotor's fault, mathematical model of an induction motor, runout regime, broken rotor bars.

Численное моделирование несимметрии статора и ротора асинхронного двигателя

ЛАВРЕНОВ Е.О., ТЮКОВ В.А.

Рассмотрена проблема расчета и моделирования режимов работы асинхронных двигателей, связанных с наличием электрической несимметрии. Представлена краткая характеристика применяемых аналитических и численных методов расчета таких режимов. Отмечена несовместимость аналитических методов расчета несимметричных режимов с задачами учета нелинейных процессов электрических машин. Обоснован выбор в пользу применения трехфазной естественной системы координат применительно к данной конкретной задаче расчета нелинейного режима работы в совокупности с учетом нелинейности. Описан алгоритм учета насыщения магнитопровода при численном моделировании несимметричного режима работы асинхронного двигателя. На основе предложенной модификации математической модели в программном пакете MatLab выполнено имитационное моделирование несимметричного индукционного двигателя с учетом насыщения магнитной цепи. Для демонстрации работы программы получены статические механические характеристики для режимов обрыва одной из фаз статора и ротора. Выполнена оценка эффективности снижения эффекта одноосного включения путем увеличения активных сопротивлений в уцелевших фазах ротора. Анализ полученных результатов подтверждает адекватность составленной модели.

Ключевые слова: индукционный двигатель, имитационное моделирование, несимметричный режим, электрическая несимметрия, статическая механическая характеристика, магнитная индукция, гармоники.

This paper concerns the problem of calculation and modeling of induction motor asymmetry modes. Brief characteristic of applied analytical and numerical methods for those modes calculation is present. Incompatibility of analytical methods applied for asymmetrical modes calculation and task of electrical machines nonlinearity consideration is marked. Election to choose of three-phase natural coordinates for this specific task of taking into consideration together asymmetrical mode calculation and system nonlinearity is explained. For numerical modeling of induction motor asymmetric modes, algorithm taking into account magnetic core saturation is described. Based on proposed mathematical model modification, using MatLab package, asymmetric induction motor modeling with account for magnetic circuit saturation is performed. For model operational demonstration, motor static mechanical characteristic in modes of stator and rotor phase loss are obtained. Estimate of extant phase resistance rising method efficiency using for single-axis loading effect decrease is concerned. Analysis of the

results confirms correctness of the model.

Key words: modeling, induction motor, imitation modeling, asymmetry mode, electrical asymmetry, static mechanical characteristics, magnetic flux density, harmonics.

Каскадный синхронно-асинхронный генератор со встречным вращением статора ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ТЕРЕГУЛОВ Т.Р., ШАПИРО С.В.

Дано описание устройства и принципа действия каскадного синхронно-асинхронного тихоходного генератора со встречным вращением статора промежуточных ступеней. Показано, что при встречном вращении статора и ротора асинхронной машины достигается существенная экономия активных материалов – обмоточного провода и электротехнической стали. Основная причина такой экономии – уменьшение числа пар полюсов вследствие существенного роста угловой скорости вращения магнитного поля в зазоре относительно статора. При этом статор первой и последней ступеней каскада остаются неподвижными, и поэтому нет необходимости в скользящих контактах. Рассмотрено устройство шестеренчатой передачи, позволяющей осуществить встречное вращение статора при подаче механической энергии на него от одного привода. Такая передача позволяет плавно варьировать выходную частоту каскада, что необходимо при использовании тихоходных генераторов на ветроэнергетических электростанциях. Экспериментальные исследования многоступенчатого синхронно-асинхронного каскадного генератора подтвердили его работоспособность и экономическую эффективность.

Ключевые слова: синхронно-асинхронный тихоходный генератор, встречное вращение статора и ротора, трёхфазный ток.

The description of structure and principle of cascading actions synchronously-asynchronous generator speed with counter rotating stator intermediate steps. It is shown that when passing rotation of asynchronous machine stator and rotor achieved significant savings of active materials-wire and electrical steel. The main reason for such savings is to reduce the number of pairs of Poles as a result of the significant increase in angular velocity of the rotation of the magnetic field in the gap relative to the stator. While the stator of the first and last steps of the cascade remain stationary, and so there is no need in moving contacts. Given a device to allow transmission pinion drives a counter rotation of the stator when applying mechanical energy

from one drive. The presence of this kind of transmission allows you to smoothly vary the frequency of the cascade, which is necessary when using slow moving wind generators power plants. The results of the pilot study of multistage synchronous-asynchronous cascade generator confirmed its efficiency and cost-effectiveness.

Key words: synchronous-asynchronous generator, low counter rotation of the stator and rotor, three-phase AC.

Условия отрыва якоря интегрированного линейного электромагнитного двигателя МОШКИН В.И.

Одним из способов повышения удельных энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей является статическое нагружение двигателя на этапе трогания, реализуемое с помощью устройства электромагнитного удержания якоря.

Стремление упростить конструкцию двигателя и одновременно повысить его энергетические показатели привело к идее интеграции конструкции двигателя и устройства удержания якоря на основе общего магнитопровода. В его состав входят ферромагнитный направляющий корпус и удерживающая поверхность.

Экспериментальные исследования таких интегрированных двигателей показали сложность регулирования усилия удержания, поскольку оно определяется несколькими конструктивными параметрами. Актуальность исследования вызвана необходимостью определения диапазонов допустимого изменения и сочетания конструктивных параметров ферромагнитного направляющего корпуса и удерживающей площадки, которые обеспечивают работоспособность двигателя. Аналитически получена зависимость магнитной индукции ярма по отношению к индукции начала насыщения верхнего магнитного шунта от площади поперечного сечения этого шунта и удерживающей поверхности с помощью кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания и схемы замещения магнитной системы. На основе полученных зависимостей и для выбранных конструктивных параметров при рабочем зазоре 20 мм выполнено математическое моделирование магнитной системы интегрированного электромагнитного двигателя на этапе трогания. Путем численного эксперимента определены магнитные индукции в ярме и верхнем магнитном шунте, которые изготовлены из конструкционной стали Ст3. Результаты численного эксперимента подтвердили выполненные расчёты. Исследования и анализ показали возможность определять условия отрыва якоря на этапе трогания в виде границ и областей допустимых значений указанных конструктивных

параметров. Вне этих областей интегрированный электромагнитный двигатель работать не может.

Ключевые слова: линейный электромагнитный двигатель, магнитный шунт, ферромагнитный направляющий корпус, якорь, область допустимых изменений параметров.

One of ways of increase of specific power indicators of pulse linear electromagnetic engines is static loading of the engine at the start-off stage, realized by means of the device of electromagnetic deduction of an anchor. The aspiration to simplify a design of the engine and at the same time to raise its power indicators led to idea of integration of a design of the engine and the device of deduction of an anchor on the basis of the general magnetic conductor. The ferromagnetic directing case and holding surface are its part. Pilot studies of such integrated engines showed complexity of regulation of effort of deduction as it is defined by several design data. Relevance of research is caused by need of determination of ranges of admissible change and a combination of design data of the ferromagnetic directing case and a holding platform which provide operability of the engine. Dependence of magnetic induction of a yoke in relation to induction of the beginning of saturation of the top magnetic shunt from the area of cross section of this shunt and a holding surface by means of piecewise and linear approximation of a curve of magnetization of a material and an equivalent circuit of magnetic system is analytically received. On the basis of the received dependences and for the chosen design data at a working gap of 20 mm mathematical modeling of magnetic system of the integrated electromagnetic engine at a start-off stage is executed. By numerical experiment are defined magnetic induction in a yoke and in the top magnetic shunt, executed of constructional St3 steel. Results of numerical experiment confirmed the calculations given in article. The executed researches and the carried-out analysis showed opportunity to define conditions of a separation of an anchor at a start-off stage in the form of borders and areas of admissible values of the specified design data. Out of these areas the integrated electromagnetic engine can't work.

Key words: the linear electromagnetic engine, the magnetic shunt, the ferromagnetic directing case, anchor, area of admissible changes of parameters.

Активный фильтр с индуктивным накопителем для компенсации неактивной мощности выпрямителей с емкостным фильтром

ЧАПЛЫГИН Е.Е.

Рассмотрена компенсация неактивных составляющих сетевого тока выпрямителя с С-фильтром или их совокупности при подключении параллельного активного фильтра с индуктивным накопителем на базе инвертора тока. Активный фильтр позволяет повысить коэффициент мощности до предельных значений, однако этот результат достигается при больших значениях индуктивности накопителя энергии. Проведено моделирование системы «выпрямитель–активный фильтр» спектральными методами. Показано, что коррекция закона переключения при введении обратной связи по току накопителя позволяет уменьшить индуктивность накопителя в 3–4 раза при сохранении тех же значений коэффициента мощности системы «выпрямитель–активный фильтр».

Предложен каскадный активный фильтр, состоящий из инвертора тока и инвертора напряжения, при работе которого на стороне постоянного тока стабилизируется ток инвертора тока. В каскадном активном фильтре суммарные затраты на индуктивные элементы могут быть снижены на порядок при достижении тех же значений коэффициента мощности. Проведено сравнение инверторов напряжения по полумостовой и мостовой схемам. Показаны преимущества инвертора напряжения, выполненного по полумостовой схеме.

Ключевые слова: выпрямитель, емкостной фильтр, коэффициент мощности, активные сетевые фильтры, инвертор тока; инвертор напряжения.

A compensation of inactive components of network current in rectifier with capacitive filter or combination of this filter and parallel active filter with inductive storage based on current inverter is shown. Active filter provides increasing of power factor to the maximum values, but that result can be reached only with high values of storage inductance. Modelling of system “rectifier-active filter” is done by spectral methods. It is shown that correction of switching algorithm by storage current feedback provides 3-4 times decreasing of inductance with keeping the same values of power factor of “rectifier-active filter” system. Multistage active filter consisting of current inverter and voltage inverter with current stabilization on the direct current side is proposed. The usage of this filter significantly reduces costs of inductive elements with reaching the same values of power factor. The comparison of voltage inverters based on bridge and half-bridge schemes is done. Advantages of half-bridge inverter are shown.

Key words: rectifier, capacitive filter, power factor, active network filters, current inverter, voltage inverter

Повышение надежности электроприводов тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты

ОСИПОВ О.И., КАРАНДАЕВ А.С., ХРАМШИН В.Р., ХРАМШИН Т.Р.

При использовании преобразователей частоты (ПЧ) в электроприводах ответственных механизмов тепловых электростанций увеличивается число аварийных отключений вспомогательного оборудования, вызванных тем, что общепромышленные ПЧ слабо адаптированы к провалам и кратковременным отключениям питающего напряжения. Это диктует необходимость разработки частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП), обладающих повышенной устойчивостью к нарушениям электроснабжения. Обязательной функцией для всех регулируемых электроприводов ответственных механизмов является возобновление технологического режима за 2–3 с при восстановлении электропитания. В статье выполнен анализ переходных процессов самозапуска высоковольтных и низковольтных ЧРП насосов и вентиляторов. Отмечена необходимость разработки новых алгоритмов и систем управления электроприводами, обеспечивающих минимальное время восстановления технологического режима. Рассмотрен способ управления с принудительным гашением поля, использующий для поддержания момента электродвигателя энергию собственных вращающихся масс. Осциллограммами автоматического перезапуска электропривода при отключении его электропитания длительностью до 0,4 с. подтверждено, что технологический режим привода успешно восстанавливается за 1,5 с. Рассмотрены способы и функциональные схемы устройств, осуществляющих вычисление мгновенной скорости вращения ротора электродвигателя непосредственно с момента поступления сигнала об отсутствии напряжения. К моменту подачи напряжения на вход ПЧ расчетная скорость вращения ротора известна, поэтому время, необходимое на поиск частоты напряжения инвертора, сводится к нулю. Общее время перезапуска ЧРП после нарушения электроснабжения сокращается, в результате чего повышается надежность работы электропривода и приводного механизма. Приведены осциллограммы координат регулируемого группового электропривода дутьевых вентиляторов при переводе электропитания с сети на ПЧ. Рассмотрен режим “самоподхвата”, обеспечивающий автоматическое определение скорости двигателя и мягкое включение преобразователя на вращающийся двигатель. Для реализации этого режима используется специальный поисковый алгоритм – частотное сканирование асинхронного двигателя на пониженном напряжении по критерию достижения минимума тока статора. Приведена схема питания двух ЧРП, подключенных к одной секции шин, обеспечивающая использование энергии маховых масс одного из электроприводов (как

правило, большей мощности) для поддержания в работоспособном состоянии другого электропривода (меньшей мощности). Отмечено, что предложенные способы и устройства обеспечивают повышение надежности работы ЧРП ответственных механизмов при кратковременных нарушениях электроснабжения. Отмечена необходимость экспериментальных исследований разработанных электроприводов и систем управления.

Ключевые слова: тепловая электростанция, вспомогательные механизмы, частотно-регулируемый электропривод, нарушения электроснабжения, самозапуск электроприводов

It is noted that the introduction of the variable-frequency electric drive only for energy saving purposes and because of technological requirements, without taking into account the performance characteristics of the introduced devices, will have a negative influence on the failure-free operation. The main reason of the increase in the number of failures is that the frequency convertor is not fully adapted to the voltage dip or short-term power interruptions. Thus it is necessary to develop variable-frequency electric drives with higher robustness to power supply interruptions. The compulsory function of any controlled electric drive of critical mechanisms is the recovery of the operating practice within 2-3 seconds after power supply restoration. The authors analyzed self-starting transient processes in high voltage and low voltage variable-frequency electric drives of pumps and fans. It was found that it is necessary to develop new algorithms and electric drive control systems aimed at providing the minimum operation practice recovery time. The research group carried out the analysis of the control method with forced field suppression, which makes use of rotating mass energy for maintaining of the electric motor torque. Oscillograms records of the electric drive automatic restart are given to prove that if the outage lasts 0.4 sec., it takes 1.5 sec. to successfully recover the operating practice. The complete circuit diagram of the device responsible for the calculation of the instant rotor speed right from the moment of obtaining voltage interruption signal was also considered. By the time of voltage supply to the frequency convertor the calculated rotor speed is known, that is why the time required for inverter supply voltage frequency search is zero. The total time of the variable-frequency electric drive restart is shortened, thus resulting in improvement of operation reliability of the electric drive and the actuating mechanism. Coordinate oscillograph records were given for the controlled group electric drive of blower fans when their power supply was changed from the network to the frequency convertor. The authors analyzed the algorithm of "flying start" providing automatic determination of the motor speed and the soft start of the convertor on the rotating motor. A special search algorithm is used to provide this

mode such as frequency-controlled scanning of the induction motor at lower voltage until the minimum value of stator current is achieved. The research group considered the feed circuit of two variable-frequency electric drives connected to one bus section, which provides the application of rotating mass energy of one electric drive (as a rule, of more powerful one) to maintain the operable state of the other electric drive (less powerful one). It was found that the developed methods and devices improve the reliability of variable-frequency electric drives operation of critical mechanisms during short term power interruptions. The research group is going to carry out experiments to test the developed electric drives and the control systems.

Key words: thermal electric power station, auxiliary mechanisms, variable-frequency electric drive, power supply interruptions, self-start of electric drives

Совмещённое исполнение электрической машины и магнитного редуктора

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассматривается электрическая машина, совмещённая с редуктором (СЭМР), имеющая внутренний ротор на постоянных магнитах. Дано аналитическое описание функциональных свойств этого гибридного устройства. Наличие обмотки на статоре, получающей питание от статического преобразователя частоты, позволяет получить совмещённый электромеханический преобразователь, работающий в режиме двигателя или генератора, и двухроторный магнитный редуктор с непрерывно регулируемым коэффициентом редукции. Составные части СЭМР представлены статором с многополюсной трехфазной обмоткой, наружным ротором, содержащим шихтованные ферромагнитные призматические стержни с числом z_1 , близким к числу пар полюсов p_1 обмотки статора и внутренним магнитоэлектрическим ротором с числом пар полюсов p_2 , равным разности $(z_1 - p_1)$. Магнитное поле статора с числом пар полюсов p_1 , поступает на одну сторону внутреннего ротора, имеющего z_1 ферромагнитных стержней. На выходе с другой стороны этого ротора будем иметь основную гармонику с небольшим числом пар полюсов, равным разности $(z_1 - p_1)$. Это малополусное магнитное поле взаимодействует с магнитами внутреннего ротора, имеющего то же самое число пар полюсов. Формирование электромагнитных моментов СЭМР имеет некоторую аналогию с классической синхронной электрической машиной и, следовательно, эти моменты обладают некоторыми ограничительными максимумами. Такая машина может найти применение в таких отраслях, как станкостроение, робототехника, транспорт, оборонная

техника, ветроэнергетика и др.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитный редуктор, совмещенное исполнение, наружный ротор с ферромагнитными стержнями; внутренний магнитоэлектрический ротор; статический преобразователь частоты.

In article is considered combined electric machine and reducer (SEMR) with internal rotor on constant magnet, is given analytical description functional characteristic this hybrid device. The presence of the stator winding, powered by static frequency converter, allows to have combined electromechanic converter, working engine or generator, and allows having a twin-rotor magnetic gear with continuously adjusted reduction ratio. The component parts SEMR is presented stator with many pros by three-phase winding, medicine to be taken externally by rotor, contain reclaiming ferromagnetic prismatic rods with number z_1 , close to count pair pole p_1 windings stator and internal magnetolectric rotor with number pair pole p_2 , equal differences $(z_1 - p_1)$. The Magnetic field stator with number pair pole p_1 , entering on one side of the internal rotor, having ferromagnetic rods z_1 , on output on the other hand this rotor shall have a main harmonica with small number pair pole, equal differences $(z_1 - p_1)$. This magnetic field with a small number of poles interacts with magnet of the internal rotor, having same number pair pole. Shaping the electromagnetic moments SEMR have certain analogy with classical synchronous electric machine and, consequently, these moments possess some restrictive maximum. SEMR can find using in such branch, as machine-tool construction, robotics, transport, defense technology, wind power and others

Key words: electric machine, magnet reducer, combined performance, ferromagnetic outer rotor with squirrel-cage, internal magnet rotor, static frequency converter.

Проектирование оптимальных электромагнитов систем магнитной левитации и боковой стабилизации наземного транспорта на основе решения обратных задач
БАХВАЛОВ Ю.А., ГОРБАТЕНКО Н.И., ГРЕЧИХИН В.В., ЮФАНОВА А.Л.

Выполнен обзор научно-технических работ по созданию транспорта с магнитной левитацией экипажа и дан анализ основных этапов его проектирования. Построен итерационный алгоритм проектирования электромагнитов, применяемых в системах магнитной левитации и боковой стабилизации высокоскоростного наземного транспорта.

Алгоритм основан на решении обратных задач теории электромагнитного поля. Предложены соотношения для расчета достаточно близких к точному решению начальных значений искомых величин. В алгоритм введен дополнительный этап минимизации массы электромагнитов, что позволяет увеличить полезный вес транспортного средства. При этом использованы необходимые и достаточные условия существования минимума массы объекта проектирования. Рассмотрен пример реализации алгоритма при проектировании электромагнита левитации. Выполнена оценка влияния вихревых токов, индуцируемых в ферромагнитном рельсе в процессе движения экипажа на силу левитации. Определен коэффициент, позволяющий учитывать это явление. В обоснование формулы для расчета ширины феррорельса получены зависимости составляющих силы левитации, возникающих при смещении электромагнита относительно оси феррорельса. Результаты исследований показывают высокую эффективность использования методологии решения обратных задач при проектировании электромагнитов систем левитации и боковой стабилизации. Предложенный алгоритм оптимального проектирования электромагнитов может быть использован при проектировании подобных устройств в электроаппаратостроении.

Ключевые слова: наземный транспорт, магнитная левитация, электромагнит, обратная задача, минимизация массы

Overview of scientific-technical works on the creation of transport with magnetic levitation of the crew was performed and the main stages of its design was analyzed. The article describes in detail the construction of the iterative algorithm for the design of electromagnets used in the systems of magnetic levitation and lateral stabilization of high-speed surface transportation. The algorithm is based on solving the inverse problems of the theory of the electromagnetic field. The article shows the relations for computing sufficiently close to the exact solution of the initial values of the unknown parameters. In the algorithm introduced an additional step of minimizing the mass of the electromagnets, which allows increasing the useful weight of the crew. This article uses the necessary and sufficient conditions for the existence of a minimum mass of object design. An example is considered that shows the implementation of the algorithm for the design of the levitation electromagnet. Evaluation of the effect of eddy currents induced in a ferromagnetic rail during the movement of the crew on levitation force is given. Was determined coefficient, which allows to take into account this fact. Were obtained the depending to the components of the levitation force arising from the displacement of the electromagnet relative to the axis of ferrorail to justify the formula to calculate the width of ferrorail. Research results

show high efficiency of use the methodology of solving inverse problems in the design of systems levitation electromagnets and lateral stabilization. The proposed algorithm of optimal design of electromagnets can be used for the design of such devices in the electric instrument making.

Key words: electromagnet, inverse problem, magnetic levitation, algorithm, minimize the mass

Усовершенствование резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных сверхтоков

БАРАНОВ М.И.

Предложена резистивная схема защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) многомодульного исполнения от аварийных сверхтоков, возникающих в отдельных модулях ЕНЭ при внутреннем или внешнем электрическом пробое изоляции их конденсаторов. Главной отличительной особенностью схемы является раздельная работа модулей ЕНЭ на стадии заряда параллельно включенных конденсаторов и их совместная работа на стадии разряда конденсаторов модулей на общую электрическую нагрузку. Такой режим предотвращает взрывообразное разрушение их защитных графито-керамических постоянных резисторов ТВО-60 в аварийной ситуации, возникающей при пробое одного из конденсаторов ЕНЭ на стадии заряда. Представлены результаты расчета основных электротехнических параметров предложенной резистивной схемы защиты. Количественная оценка подобных параметров защитной схемы ЕНЭ указывает на ее практическую реализуемость в области высоковольтной импульсной техники.

Ключевые слова: высоковольтный импульсный конденсатор, мощный емкостный накопитель энергии, аварийный сверхток, резистивная схема защиты, выбор параметров защитной схемы.

The new capacitance-resistance chart of protection is offered high-voltage impulsive condensers of powerful capacity store of energy (CSE) of multimodule execution from emergency very large currents, arising up in the separate modules of CSE at the internal (external) electric hasp of isolation of their condensers. The main distinctive feature of this chart is separate work of the modules of CSE on the stage of charge of the parallel included condensers and their joint work on the stage of discharge of condensers of the modules on the general electric loading. Such

mode of operations of the high-voltage modules of CSE is prevented by similar to the explosion destruction of their protective graphite-ceramic permanent resistors of type of TVO-60 in an emergency situation, arising up at the hasp of one of condensers of CSE on the stage of charge. The results of engineering calculation of basic electrical engineering parameters of the offered capacitance-resistance chart of protection of multimodule CSE are presented from emergency very large currents. The executed quantitative estimation of similar parameters of this protective chart of CSE specifies on its practical realized in area of high-voltage impulsive technique.

Key words: high-voltage impulsive condenser, powerful capacity store of energy, emergency very large currents, capacitance-resistance chart of protection, choice of parameters of protective chart.

Определение показателя уязвимости к кибератакам задачи оценивания состояния по данным SCADA и синхронизированным векторным измерениям

КОЛОСОК И.Н., ГУРИНА Л.А.

Оценивание состояния – математический метод обработки данных, широко используемый для расчета режима электроэнергетических систем (ЭЭС) по данным измерений. Задача оценивания состояния дает корректное решение только в тех случаях, когда в телеизмерениях отсутствуют грубые ошибки. Причинами появления этих ошибок могут быть случайные факторы, связанные со сбоями в системе сбора данных, ошибками персонала и т.д., и преднамеренные воздействия (кибератаки) на систему сбора и передачи данных, базы данных и саму программу оценивания состояния. В статье рассмотрены возможные последствия кибератак на результаты оценивания состояния. Введено понятие показателя уязвимости к кибератакам задачи оценивания состояния. Предложен подход к определению уровней и значений показателя уязвимости. Показано, что совместное использование телеизмерений SCADA и синхронизированных векторных измерений при оценивании состояния ЭЭС позволяет повысить эффективность методов обнаружения грубых ошибок в телеизмерениях и точность получаемых оценок, снижая тем самым уязвимость задачи оценивания состояния к кибератакам.

Ключевые слова: ЭЭС, оценивание состояния, измерения SCADA, синхронизированные векторные измерения, кибербезопасность, показатель уязвимости.

State estimation is an important procedure providing reliable quality information for control of electric power system. The state estimation problem provides a correct solution only in the cases

where measurements do not contain bad data. The reasons of bad data can be both random factors related to a failure in the data collection system, personnel errors, etc. and deliberate impacts (cyber attacks) on the system of data collection and transfer, databases and state estimation software. The paper focuses on the possible implications of cyber attacks for the state estimation results. The notion of the cyber vulnerability index of the state estimation problem is introduced. The approach to the determination of its levels and values is suggested. The research shows that the joint application of SCADA and PMU data for the state estimation of power systems makes it possible to improve the performance of the bad data detection algorithms and increase the accuracy of the obtained estimates, thus decreasing the state estimation problem vulnerability to cyber attacks.

Key words: EPS, state estimation, SCADA measurements, PMU measurements, cyber security, cyber vulnerability index.

Прогнозирование технического состояния ветроэнергетических установок

СЕРЕБРЯКОВ А.В., КРЮКОВ О.В., ТИТОВ В.Г.

Рассмотрены вопросы диагностирования и прогнозирования технического состояния ветроэнергетических установок в соответствии с концепцией локальных сетей SMART GRID. Предложены структуры датчиков диагностирования и прогнозирования технического состояния ветроэнергетической установки со встроенной системой оперативного диагностирования. Дано описание математической модели функционирования системы с разным уровнем глубины диагностирования. Рассмотрены факторы, влияющие на выбор глубины диагностирования ветроэнергетической установки. Построена математическая модель системы диагностирования технического состояния на основании функциональной схемы. Предложен алгоритм прогнозирования технического состояния ветроэнергетической установки, позволяющий избежать аварийных режимов работы. Предложен математический подход синтеза средств диагностирования ветроэнергетических установок, позволяющий комбинировать любые специфичные алгоритмы диагностики конкретных узлов электромеханической части и интегрировать в одной системе свойства регулирования, диагностирования, прогнозирования и экспертной системы.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, система оперативной диагностики, прогнозирование технического состояния, мониторинг технического состояния

The questions of diagnosticating and prognostication of the technical state of the wind-driven powerplants are considered in accordance with conception of local networks of SMART GRID. The structures of sensors of diagnosticating and prognostication of the technical state of the wind-driven powerplant offer with the embedded system of the operative diagnosticating. Description of mathematical model of functioning of the system is Given with the different level of depth of diagnosticating. Factors influencing at choice depth of diagnosticating of the wind-driven powerplant are considered. The mathematical model of the system of diagnosticating of the technical state is built on the basis of functional diagram. The algorithm of prognostication of the technical state of the wind-driven powerplant, allowing to avoid malfunctions of work, offers. Mathematical approach of synthesis of facilities of diagnosticating of the wind-driven powerplants, allowing to combine any specific algorithms of diagnostics of certain knots of electromechanics part and integrate in one system properties of adjusting, diagnosticating, prognostication and consulting model, offers.

Key words: wind power installation, the system of operative diagnostics, prediction of technical state, monitoring of technical state

Влияние рукавов электрододержателей на электрические параметры трубошинного участка токоподвода дуговой сталеплавильной печи

АЛИФЕРОВ А.И., БИКЕЕВ Р.А., ВЛАСОВ Д.С., БЛАНК А.В., ОЩЕПКОВА Т.Б.

Показана суть электромагнитного влияния металлоконструкций, лежащих вблизи токоведущих элементов, и его последствия: нагрев металлоконструкций, дополнительные потери активной мощности источника питания, изменение электромагнитного поля, и, как результат - изменение активного и индуктивного сопротивлений в схеме замещения электропечного контура. Рассмотрена существующая методика учета влияния металлоконструкций, лежащих вблизи токоведущих элементов, на электрические параметры токоподвода мощных электротехнологических установок, с указанием ее недостатков. Предложен способ увеличения ее точности и области применимости. Для этого введен более универсальный коэффициент близлежащих металлоконструкций (КБМ), дающий возможность учитывать влияние металлоконструкций на активное и индуктивное сопротивления электропечного контура. Приведены результаты численного моделирования трубошинного участка токоподвода с рукавами электрододержателей трехфазной 100-тонной дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученными при физическом

моделировании участка токоподвода 100-тонной ДСП. Подтвержденная таким образом численная модель использовалась для получения зависимостей активного и индуктивного сопротивлений и КБМ исследуемого участка от геометрии участка и свойств рукавов электрододержателей. Полученные зависимости являются основой для инженерной методики, предназначенной для проектирования токоподводов ДСП.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, коэффициент добавочных потерь, рукав электрододержателя, схема замещения электропечного контура.

There are shown essence of electromagnetic influence of a metalware located closely to current-leading elements, its aftereffects: the metal constructions heating up, additional losses of active power of supply, perturbations in electromagnetic field, and consequent changes in active and inductive resistances of equivalent circuit of furnace. An existing method of accounting of influence of metal constructions located closely to current-leading conductors on electrical parameters of current-lead of high-power electrotechnological installations was examined with indication its disadvantages. A way for extension of accuracy and range of applicability of the method was proposed. For that it was introduced Coefficient of Neighboring Metalware (CNM), which allows accounting influence of metal constructions on active and inductive resistances of furnace circuit. There are presented results of numerical simulation for tubular-bus partition of current-lead of 100 ton arc steel-smelting furnace. The results were compared with experimental data, obtained by physical simulation of current-lead partition of 100 ton arc steel-smelting furnace. Validated this way numerical model used for producing of dependencies of active and inductive resistances and CNM on geometry of the partition and properties of electrode-holders' arms. Obtained dependencies are the basis for engineering method for designing of current-leads for electric arc steel-smelting furnaces.

Key words: electric arc furnace, coefficient of additional losses, electrode holding arm, equivalent circuit of furnace.

Исследование трехфазного измерительного преобразователя активного тока на основе трансреакторов

КУВШИНОВ Г.Е., КОМЛЕВ А.В., КОРШУНОВ В.Н.

Рассмотрены особенности распределения активной нагрузки между генераторными агрегатами в судовой электроэнергетической системе. Указаны недостатки существующих

устройств распределения активных нагрузок, в которых традиционно в качестве измерительного преобразователя тока используются трансформаторы тока. Отмечена перспективность применения в таких устройствах дифференцирующих индукционных преобразователей тока (катушек Роговского). Предложено устройство и рассмотрен принцип действия трехфазного измерительного преобразователя активного тока, выполненного на основе дифференцирующих индукционных преобразователей тока без использования интегрирующих фильтров. Определена зависимость точности измерения активной составляющей тока нагрузки синхронного генератора от ЭДС дифференцирующего индукционного преобразователя тока. Описана схема компьютерного моделирования трехфазного измерительного преобразователя активного тока. Приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований устройства, подтверждающие способность рассматриваемого измерительного преобразователя заменить для судовых электроэнергетических систем традиционные решения, выполненные на основе трансформаторов тока.

Ключевые слова: судовая электростанция, синхронный генератор, дифференцирующий индукционный преобразователь тока (катушка Роговского), трехфазный измерительный преобразователь активного тока, распределение активных нагрузок.

The article describes features of the active load sharing between generator sets in the marine electrical power system. Disadvantages of existing active load sharing devices, that traditionally use current transformers, are shown. The reducing of these disadvantages can be provided by use differentiating inductive current transducers (Rogowski coils) in the active load sharing devices. The paper presents the electric circuit and principle of operation of the three-phase active current converter with differentiating inductive current transducers without use of integrating filters. The scheme and results of computer simulation of this three-phase measuring active current converter is described. The results of experimental studies of the presented device, confirming its ability to replace traditional solutions, based on current transformers, are also given.

Key words: marine electrical power station, synchronous generator, differentiating inductive current transducer (Rogowski coil), three-phase active current converter, active load sharing.

Энергоэффективное терминальное управление сервоприводами модулей солнечной электростанции

КАПЛЯ Е.В.

Установлена зависимость оптимальной по расходу энергии продолжительности терминального управления сервоприводом постоянного тока от величины углового перемещения и параметров сервопривода. Получена новая формула, позволяющая вычислить оптимальную длину отрезка терминального управления сервоприводом. Построены зависимости расхода энергии при терминальном управлении серводвигателем постоянного тока от продолжительности терминального управления.

Ключевые слова: оптимальное потребление энергии, терминальное управление, оптимальная продолжительность, сервопривод, серводвигатель, двигатель постоянного тока, солнечный модуль, солнечная электростанция.

The dependence of the optimal termination time control DC servo motor from the magnitude of the angular displacement and servo parameters. The new formula is proposed for calculate the optimal termination time of the servo control. Presents the dependence of the energy consumption in the process terminal control by the servo DC motor from the terminal time.

Key words: optimal consumption energy, terminal control, fixed-time control, optimal termination time, servo-driver, servo motor, DC motor, solar module, solar power plant.