

Содержание

К 80-летию кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ»

Высоковольтные компенсаторы реактивной мощности на основе полупроводниковых регуляторов напряжения

ПАНФИЛОВ Д.И., АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ И.Д., ЖУРАВЛЕВ И.И., КУЗЕНЕВ Д.С.

Рассмотрены подходы к построению компенсаторов реактивной мощности (КРМ) на основе полупроводниковых регуляторов переменного напряжения. Регуляторы переменного напряжения реализованы на основе трансформатора с секционированной вторичной обмоткой и полупроводникового коммутатора, построенного на основе управляемых ключей. При анализе процессов в КРМ регулятор переменного напряжения может быть представлен трансформатором с регулируемым коэффициентом трансформации. Рассмотрены электромагнитные процессы в КРМ при регулировании его мощности в широких пределах путем управления коэффициентом трансформации трансформатора. Приведены аналитические выражения, определяющие токи, напряжения, установленные мощности элементов силовой схемы КРМ. Отмечена зависимость требований к параметрам силовых ключей полупроводникового коммутатора от напряжения сети. Предложены схмотехнические решения по построению КРМ, позволяющие уменьшить требования к параметрам силовых ключей в зависимости от напряжения питающей сети. Приведены примеры расчета параметров КРМ напряжением 10 и 35 кВ, реализующих регулирование реактивной мощности в диапазоне от нуля до 5 Мвар. Приведены результаты имитационного моделирования режимов работы КРМ, построенных на основе предложенных схмотехнических решений, и результаты исследований макетного образца КРМ, обеспечивающего регулирование реактивной мощности от нуля до 5 Мвар при работе от сети 10 кВ. Отмечены особенности и преимущества КРМ, построенных на основе полупроводниковых регуляторов напряжения.

Ключевые слова: высоковольтные компенсаторы реактивной мощности, регулятор напряжения, реактивная мощность в распределительных сетях, управляемый трансформатор, регулирование реактивной мощности.

Approaches to the construction of reactive power compensators (RPC) based on semiconductor AC voltage regulators are considered. AC voltage regulators are implemented on the basis of a transformer with a partitioned secondary winding and a semiconductor switchboard built on the basis of controlled switches. When analyzing processes in the RPC, the AC voltage regulator can be represented by a transformer with an adjustable transformation coefficient. Electromagnetic processes in the RPC are considered when its power is regulated within a wide range by controlling the transformer transformation coefficient. Analytical expressions defining currents, voltages, installed capacities of the elements of the power circuit of the RPC are given. The dependence of the requirements for the parameters of the power switches of a semiconductor switch on the network voltage is noted. Circuit design solutions for the construction of the RPC are proposed, which reduce the requirements for the parameters of power switches depending on the voltage of the supply network. Examples of calculating the parameters of the 10 kV and 35 kV RMS that implement reactive power regulation in the range from zero to 5 Mvar are given. The results of simulation modeling of the operating modes of the KRM, built on the basis of the proposed circuit solutions, and the results of studies of the model sample of the RPC, providing regulation of reactive power from zero to 5 Mvar when operating from a 10 kV network, are compared. The features and advantages of RPC built on the basis of semiconductor voltage regulators are noted.

Key words: high-voltage reactive power compensators, voltage regulator, reactive power in distribution networks, controlled transformer, reactive power regulation.

Электротехника, 2023, №6, стр. 13-20

Полупроводниковые устройства стабилизации переменного напряжения для повышения качества электрической энергии в цифровых распределительных электрических сетях 0,4 кВ

АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И., КРАСНОПЕРОВ Р.Н., РАШИТОВ П.А., РОЖКОВ А.Н., СТОЙНОВА А.М.

Рассмотрена технология построения полупроводниковых устройств стабилизации переменного напряжения, предназначенных для повышения качества электрической энергии в распределительных электрических сетях 0,4 кВ. Технология предусматривает применение при построении устройств стабилизации переменного напряжения вольтодобавочных трансформаторов с секционированной обмоткой, тиристорных коммутаторов и микропроцессорной системы управления с интеграцией в АСУ ТП цифровых электрических сетей и передачей данных по протоколам МЭК 60870-5-104, МЭК 61850. Разработаны алгоритмы управления полупроводниковыми устройствами стабилизации переменного напряжения, обеспечивающие стабилизацию напряжения в сетях в автоматическом режиме, а также реализующие надежные маршруты переключения ступеней регулирования напряжения. Предложен способ защиты полупроводниковых устройств стабилизации переменного напряжения при возникновении аварийных режимов работы сетей. Предложены имитационные модели и приведены результаты моделирования режимов работы полупроводниковых устройств в составе энергетической системы. Представлены результаты экспериментальных исследований макетных образцов, подтверждающие эффективность предложенных технических решений.

Ключевые слова: цифровые распределительные сети 0,4 кВ, полупроводниковое устройство стабилизации переменного напряжения, качество электрической энергии, вольтодобавочный трансформатор, тиристорный коммутатор, микропроцессорная система управления, алгоритмы автоматического управления, экспериментальные исследования, макетный образец.

The technology of constructing semiconductor devices for AC voltage stabilization designed to improve the quality of electrical energy in 0.4 kV distribution electrical networks is considered. The technology provides for the use in the construction of devices for the stabilization of alternating voltage of voltage-add transformers with a partitioned winding, thyristor switches and a microprocessor control system with integration into the automated control system of digital electrical networks and data transmission according to IEC 60870-5-104, IEC 61850 protocols. Algorithms have been developed for controlling semiconductor devices for AC voltage stabilization, providing voltage stabilization in networks in automatic mode, as well as implementing reliable routes for switching voltage regulation stages. The method of protection of semiconductor devices of stabilization of alternating voltage in case of emergency modes of operation of networks is proposed. Simulation models are proposed and the results of modeling

the modes of operation of semiconductor devices as part of an energy system are presented. The results of experimental studies of mock-up samples confirming the effectiveness of the proposed technical solutions are presented.

Key words: 0.4 kV digital distribution networks, semiconductor device for AC voltage stabilization, electrical energy quality, voltage-add transformer, thyristor switch, microprocessor control system, automatic control algorithms, experimental studies, mock-up sample.

Электротехника, 2023, №6, стр. 21-29

К оценке влияния несимметрии нагрузки на показатели качества и потери электроэнергии в трехфазных линиях электропередачи

ЧАСОВ А.В., АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И.

Рассмотрено влияние несимметрии трехфазной нагрузки на потери энергии и несимметрию линейных напряжений в трехфазных линиях электропередачи. Приведены аналитические выражения, определяющие увеличение потерь в линии электропередачи, при работе трехфазной четырехпроводной линии электропередачи на активную несимметричную нагрузку с постоянной суммарной мощностью. Представлены графические зависимости, позволяющие оценить влияние несимметрии нагрузки на увеличение потерь в линии электропередачи. Описан подход к расчету коэффициента несимметрии по напряжению и оценке влияния на него несимметричной нагрузки. Получены аналитические выражения и зависимости, определяющие влияние несимметричной активной нагрузки на коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и на потери в трехфазной четырехпроводной линии электропередачи. Проведенный анализ базируется на предположении, что несимметрия в режиме работы линии электропередачи вызвана лишь различием в активных мощностях фаз нагрузки и линии электропередачи. Полученные при таких допущениях выражения определяют границы минимально возможных отрицательных воздействий на увеличение потерь в линии электропередачи и коэффициент несимметрии по напряжению. Наличие реактивных мощностей в фазах нагрузки будет приводить лишь к дополнительному увеличению потерь и коэффициента несимметрии по напряжению. Представленные результаты можно использовать для демонстрации потенциальных эффектов от применения устройств симметрирования в линиях электропередачи. Современные устройства симметрирования позволяют перераспределять равномерно суммарную активную мощность и одновременно полностью компенсировать реактивную мощность в

фазах линии электропередачи. В этом смысле, приведенные в статье результаты, наглядно иллюстрируют зависимости минимальных потерь в линии электропередачи от параметров линии электропередачи и нагрузки при применении устройств симметрирования, обеспечивающих оптимальный режим работы линии электропередачи.

Ключевые слова: четырехпроводная линия электропередачи, несимметричная нагрузка, показатели качества электроэнергии, потери мощности, устройство симметрирования.

The influence of the asymmetry of a three-phase load on energy losses and the asymmetry of linear voltages in three-phase power transmission lines is considered. Analytical expressions are given that determine the increase in losses in the transmission line when a three-phase four-wire transmission line operates on an active asymmetric load with a constant total power. Graphical dependences are presented to assess the effect of load asymmetry on the increase in losses in the transmission line. An approach to calculating the voltage asymmetry coefficient and assessing the effect of an asymmetric load on it is described. Analytical expressions and dependences are obtained that determine the effect of an asymmetric active load on the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence and on losses in a three-phase four-wire power transmission line. The analysis is based on the assumption that the asymmetry in the mode of operation of the transmission line is caused only by the difference in the active capacities of the phases of the load and the transmission line. The expressions obtained with such assumptions determine the limits of the minimum possible negative effects on the increase in losses in the power transmission line and the voltage asymmetry coefficient. The presence of reactive power in the load phases will only lead to an additional increase in losses and the voltage asymmetry coefficient. The presented results can be used to demonstrate the potential effects of the use of symmetry devices in power transmission lines. Modern symmetry devices make it possible to redistribute the total active power evenly and at the same time fully compensate for the reactive power in the phases of the power transmission line. In this sense, the results presented in the article clearly illustrate the dependences of the minimum losses in the power line on the parameters of the power line and the load when using symmetry devices that ensure optimal operation of the power line.

Key words: four-wire power transmission line, unbalanced load, power quality indicators, power loss, symmetry device.

Электротехника, 2023, №6, стр. 29-37

Влияние параметров линии электропередачи и её нагрузки на потери и качество

электроэнергии в точке подключения нагрузки

ЭЛЬХОЛИ АХМЕД М., ПАНФИЛОВ Д.И., АСТАШЕВ М.Г.

Выполнен анализ влияния параметров ЛЭП и её несимметричной нагрузки на показатели качества напряжения и потери энергии в линии. Исследования проведены на стандартной тестовой четырехузловой IEEE модели электрической сети. Предложены и обоснованы математический и алгоритмический аппараты исследования несимметричных режимов работы ЛЭП, сочетающие использование специализированной программы расчета режимов работы энергосистем с несимметричными нагрузками UDSLF с методом Ньютона-Рафсона, как одного из наиболее эффективных инструментов определения корней системы нелинейных уравнений. Проиллюстрированы особенности влияния несимметрии нагрузки ЛЭП на потери энергии и качество напряжения при изменении параметров ЛЭП и нагрузки. Предложены пути повышения эффективности работы ЛЭП с несимметричными нагрузками.

Ключевые слова: трехфазные линии электропередачи, устройства симметрирования, метод симметричных составляющих, баланс мощности, компенсация реактивной мощности, универсальный регулятор мощности.

The analysis of the influence of the parameters of the transmission line and its asymmetric load on the quality indicators of voltage and energy loss in the line is carried out. The research was carried out on a standard four-node IEEE test model of the electrical network. Mathematical and algorithmic devices for the study of asymmetric modes of operation of power lines are proposed and justified, combining the use of a specialized program for calculating the modes of operation of power systems with asymmetric loads UDSLF with the Newton-Raphson method as one of the most effective tools for determining the roots of a system of nonlinear equations. The peculiarities of the influence of the asymmetry of the power line load on energy losses and voltage quality when changing the parameters of the power line and load are illustrated. Ways to improve the efficiency of power lines with asymmetric loads are proposed.

Key words: three-phase power transmission lines, symmetry devices, method of symmetrical components, power balance, reactive power compensation, universal power regulator.

Электротехника, 2023, №6, стр. 38-46

Регулятор синусоидального напряжения с широким диапазоном регулирования

ГОРЧАКОВ А.В., АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И., РОЖКОВ А.Н., ЖУРАВЛЕВ И.И.,

ЧАСОВ А.В.

Рассмотрен регулятор синусоидального напряжения на основе трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации и ключевого коммутатора, обеспечивающий широкий диапазон изменения напряжения на выходе регулятора и высокую дискретность регулирования. Рассмотрены различные топологии построения регуляторов, предложено одно из наиболее эффективных решений. Выполнен анализ электромагнитных процессов в силовом оборудовании регулятора. Предложены подходы к расчёту и выбору характеристик силового оборудования регуляторов. Представлен вариант реализации силовых узлов регулятора напряжения 0,4 кВ, 1 МВА и его аппаратно-программного комплекса системы управления; получены характеристики и конкретные технические параметры регулятора. Рассмотрены преимущества и потенциальные возможности применения предложенной топологии построения регулятора.

Ключевые слова: регулятор напряжения, трансформатор с секционированными обмотками, коммутатор, ключ переменного тока.

A sinusoidal voltage regulator based on a transformer with an adjustable transformation coefficient and a key switch is considered, which provides a wide range of voltage changes at the output of the regulator and high discreteness of regulation. Various topologies of construction of regulators are considered, one of the most effective solutions is proposed. The analysis of electromagnetic processes in the power equipment of the regulator is carried out. Approaches to the calculation and selection of the characteristics of the power equipment of regulators are proposed. A variant of the implementation of the power units of the 0.4 kV, 1 MVA voltage regulator and its hardware and software complex of the control system is presented; the characteristics and specific technical parameters of the regulator are obtained. The advantages and potential applications of the proposed topology of the controller construction are considered.

Key words: voltage regulator, transformer with partitioned windings, switchboard, AC switch.

Электротехника, 2023, №6, стр. 47-53

Расчет потерь в магнитопроводе высокооборотного вентильно-индукторного электрогенератора

КОЛПАХЧЬЯН П.Г., ЛОБОВ Б.Н., ПАХОМИН С.А., НАЗИКЯН Г.А., ЛОБОВ Р.Б.

Рассмотрены вопросы определения потерь в магнитной системе высокооборотного вентильно-индукторного электрогенератора с конфигурацией 8/6. Магнитопровод генератора выполнен из листовой электротехнической стали марки 20НХ1300 толщиной 0,2 мм. Частота перемагничивания составляет 1200 Гц. Расчет потерь выполнялся на основе информации о распределении магнитного поля в магнитопроводах статора и ротора. Использовалась обобщенная формула Штейнметца, позволяющая учитывать несинусоидальный характер и постоянную составляющую магнитной индукции в элементах магнитной системы. В качестве примера выполнен расчет потерь в высокооборотном вентильно-индукторном генераторе мощностью 50 кВт, номинальной частотой вращения 12 000 об/мин. Приведены результаты анализа распределения потерь в отдельных элементах магнитной системы.

Ключевые слова: высокооборотный электрогенератор, вентильно-индукторная электрическая машина, математическое моделирование, расчет потерь, формула Штейнметца.

The issues of determining losses in the magnetic system of a high-speed valve-inductor electric generator with a configuration of 8/6 are considered. The magnetic circuit of the generator is made of sheet electrical steel grade 20HX1300 0.2 mm thick. The frequency of remagnetization is 1200 Hz. The calculation of losses was carried out on the basis of information about the distribution of the magnetic field in the magnetic conductors of the stator and rotor. The generalized Steinmetz formula was used, which allows taking into account the non-sinusoidal nature and the constant component of magnetic induction in the elements of the magnetic system. As an example, the calculation of losses in a high-speed valve-inductor generator with a capacity of 50 kW, with a nominal rotation speed of 12,000 rpm is performed. The results of the analysis of the distribution of losses in individual elements of the magnetic system are presented.

Key words: high-speed electric generator, valve-inductor electric machine, mathematical modeling, loss calculation, Steinmetz formula.

Электротехника, 2023, №6, стр. 53-62

Сравнительный анализ применения электрохимических аккумуляторов разных типов в качестве накопителей энергии

ВАЛЬЦЕВ Н.В., БАРБИН Н.М.

В локальных энергосистемах и у конечных потребителей наиболее перспективным представляется использование аккумуляторов различных типов, в первую очередь, литий-ионных, получивших заметное развитие в последнее десятилетие. Тем не менее, некоторые проблемы, например, пожароопасность этих аккумуляторов, до сих пор не решены, а их стоимость остается высокой. Наиболее же дешевыми являются давно известные и хорошо отработанные свинцово-кислотные аккумуляторы. В статье на основе анализа литературных данных приводятся характеристики различных аккумуляторов, оцениваются текущее состояние рынка и перспективы использования различных аккумуляторов. Показано, что в текущих условиях при использовании в стационарных системах накопления энергии свинцово-кислотные аккумуляторы безусловно конкурентоспособны и зачастую даже имеют преимущества перед литий-ионными благодаря малой стоимости, отработанным технологиям эксплуатации и утилизации и будут оставаться таковыми в перспективе нескольких десятков лет.

Ключевые слова: накопители энергии, свинцово-кислотные аккумуляторы, литий-ионные аккумуляторы, состояние, перспективы, обзор.

In local power systems and end-users, the most promising is the use of various types of batteries, primarily lithium-ion batteries, which have received significant development in the last decade. However, some problems, such as the fire hazard of these batteries, have not yet been solved, and their cost remains high. The cheapest are the long-known and well-used lead-acid batteries. Based on the analysis of literature data, the article presents the characteristics of various batteries, assesses the current state of the market and prospects for the use of various batteries. It is shown that under current conditions, when used in stationary energy storage systems, lead-acid batteries are certainly competitive and often even have advantages over lithium-ion batteries due to low cost, proven technologies of operation and disposal and will remain so in the future for several decades.

Key words: energy storage, lead-acid batteries, lithium-ion batteries, condition, prospects, overview.

Электротехника, 2023, №6, стр. 63-64

Авторы номера

Электротехника, 2023, №6, стр. 65-66

Григорий Бенционович Лазарев

(к 85-летию со дня рождения)