

*Электричество, 2015, №9, с.4–11.*

Управление вставкой постоянного тока при объединении энергосистем Сибири и Востока  
ДЕМИДОВ А.А., ТИТАЕВСКАЯ Н.А., ТИХОНОВ А.В.

Анализируется возможность использования вставки постоянного тока (ВПТ) в качестве объекта управления централизованной системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (ЦС АРЧМ). Перспективы использования ВПТ в таком качестве рассматриваются на примере объединения энергосистем (ЭС) Сибири и Востока через ВПТ на подстанции (ПС) 220 кВ Могоча. В работе представлены разработанные алгоритмы управления ВПТ от ЦС АРЧМ объединенной энергетической системы (ОЭС) Востока в координации с ЦС АРЧМ ОЭС Сибири, обеспечивающие эффективное и безопасное использование ВПТ. Приведены исследования регулирования частоты в ОЭС Востока с участием ВПТ при различном долевом участии объектов управления ЦС АРЧМ, с заданием для ВПТ индивидуальной «мертвой» полосы регулятора частоты, а также при наличии ограничений в сети ОЭС Сибири. Проведен анализ полученных результатов. В качестве средства исследования использована система компьютерной математики MATLAB с пакетом визуального блочного имитационного моделирования Simulink.  
*Ключевые слова:* энергосистема, переток активной мощности, регулирование частоты, вставка постоянного тока, моделирование

Back to back high voltage direct current link (HVDC) as a control object for load frequency control system (LFCS) is analyzed. Interconnection integrated power systems (IPS) of Siberia and East via back to back HVDC link at substation 220 kV Mogocho is considered as an example. Control algorithms for coordinated LFC systems of IPS of Siberia and IPS of East, that ensure effective and safe usage of back to back HVDC link, are given. Research of frequency control in IPS of East with back to back HVDC link is conducted under different conditions: different shares of LFCS control objects, individual dead band of frequency controller for back to back HVDC link, restrictions in IPS of Siberia network. Results are analyzed. Numerical computing environment MATLAB with visual modeling package Simulink is used as a research tool.  
*Key words:* power system, flow power active, frequency control, back to back high voltage direct current link, modeling

*Электричество, 2015, №9, с.12–19.*

Оптимизация режимов работы гидротепловых энергетических систем при краткосрочном планировании графиков нагрузки электростанций  
ЛЕТУН В.М., ОБОСКАЛОВ В.П.

Представлена практическая реализация принципиально нового и эффективного метода оптимизации режима работы гидротепловой энергосистемы. На примере гипотетической энергосистемы, состоящей из одной тепловой электростанции и двух гидростанций (прототипов реальных гидростанций), проведены расчеты по оптимизации режима работы энергосистемы на восьмичасовом интервале времени. В представленной постановке задачи задано интегральное ограничение по объему расходуемой воды на гидростанциях за период оптимизации режима, учитывается изменение напора воды на гидростанциях, в процессе расчета осуществляется выбор на каждом часе оптимального состава работающих гидроагрегатов. Расчет завершается вычислением технико-экономических показателей. Время расчета – 10 с. Проведено сравнение эффективности результатов по предлагаемому методу и по постановке задачи с одним из возможных вариантов упрощенной постановки и соответствующей методики решения этой задачи.  
*Ключевые слова:* энергосистема, гидростанция, гидроагрегат, напор воды, мера эффективности

Practical implementation of a fundamentally new and efficient method for optimizing the operating mode of a power system containing hydraulic and thermal power plants is presented. Calculations for optimizing the power system operating mode on an eight-hour time interval are carried out taking as an example a hypothetical power system consisting of one thermal power plant and two hydraulic power plants (which are prototypes of real hydraulic power plants). According to the present statement of the problem, an integral constraint is imposed on the amount of water spent at the hydraulic power plants in the period for which the operating mode is optimized, the change of water head at hydraulic power plants is taken into account, and the optimal composition of operating hydraulic power units is selected at each hour in the course of calculation. The calculation is finished with determining the technical and economic indicators. The calculation is completed within 10 s. The effectiveness of the results obtained from using the proposed method and problem statement is compared with one of possible versions of simplified problem statement and corresponding procedure for solving this problem.

*Key words:* power system, hydraulic power plant, hydraulic power unit, water head, effectiveness measure

*Электричество, 2015, № 9, с. 20–26.*

Управляемый подмагничиванием трансформатор

СМИРНОВ С.С., ОСАК А.Б.

В качестве управляемого источника реактивной мощности предлагается использовать трехфазную группу однофазных управляемых подмагничиванием трансформаторов броневое типа. Обмотки управления размещаются на боковых стержнях, включаются встречно и подключаются к управляемому источнику постоянного напряжения. Обмотки управления создают круговой магнитный поток, что приводит к изменению потребляемой реактивной мощности обмотки среднего стержня. Необходимая мощность источника постоянного напряжения менее 1% мощности трансформатора. Так как обмотки управления закорочены через источник постоянного тока, то в них возникает ток частотой 100 Гц, приводящий к выравниванию напряжений 50 Гц на обмотках управления и их взаимной компенсации. Взаимодействие магнитных полей трансформатора имеет сложный нелинейный характер, и поэтому требуется экспериментальная оценка его режимных свойств. В качестве однофазного управляемого трансформатора может использоваться серийный трехфазный трансформатор. Обмотки высокого напряжения боковых стержней включаются встречно, и к ним подсоединяется источник постоянного напряжения. Испытания выполнены на трехфазном трансформаторе мощностью 820 В×А напряжением 380 В, который использовался как однофазный трансформатор мощностью 273 В×А с напряжением 220 В. Испытания показали, что потребляемая реактивная мощность трансформатора пропорциональна приложенному напряжению и току в обмотках управления. При токе управления 1,91 А и напряжении 220 В реактивная мощность равна 265 вар. Ток 3-й гармоники составил 7,7%, ток 5-й и 7-й гармоник менее 1%. Подключение активной нагрузки к вторичной обмотке не повлияло на регулирование реактивной мощности. Подключение к вторичной обмотке конденсаторной батареи позволило регулировать реактивную мощность в пределах от +161 В×А до – 112 В×А, т.е. работать функционально как синхронный компенсатор. Технико-экономическое сравнение управляемого трансформатора мощностью 40 МВ×А, реализованного с использованием трехфазных трансформаторов мощностью по 40 МВ×А с синхронным

компенсатором 50МВхА, показало, что он имеет меньшие удельные капиталовложения при лучших регулировочных и эксплуатационных характеристиках.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, качество электрической энергии, реактивная мощность, регулирование напряжения

The research suggests that a threephase transformer tank of singlephase shelltype magnetically controlled transformers be used as an adjustable reactive power source. The control windings are placed on side legs and connected in a seriesopposing arrangement. They are connected to the controlled DC voltage source. The control windings create a magnetic circular flux, which leads to changes in the consumed reactive power of the centerleg winding. The necessary power of the DC voltage source is less than 1 % of the transformer power. Since the control windings are short circuited through the DC voltage source, the current that appears has a frequency of 100 Hz, which leads to equal voltages of 50 Hz on the control windings and their mutual compensation. The interaction between the magnetic fields of the transformer is a complex nonlinear nature and therefore it is necessary to experimentally assess its operation characteristics. A threephase commercial transformer can be used as a onephase controlled transformer. The highvoltage windings of side legs are connected in a seriesopposing manner and DC voltage source is connected to them. Tests were conducted on an 820 VA/220 V singlephase transformer. The tests have shown that the consumed reactive power of the transformer is proportional to the voltage and current applied to the control windings. With the control current of 1,91 A and voltage of 200 V the reactive power made up 265 var. The current of the 3rd harmonic was 7,7 %, and that of the 5 th, and 7 th harmonics – less than 1 %. Connection of a resistive load to the secondary winding did not affect the reactive power adjustment. The connection to the secondary winding of the capacitor tank made it possible to adjust reactive power in the range from +161 VA to –112 VA, i.e. to function like a synchronous compensator.

*Key words:* electricpowersystem, powerquality, reactivepower, voltagecontrol

*Электричество, 2015, №9, с.27–38.*

Картины магнитных сверх- и антипоток в короткозамкнутом двухобмоточном трансформаторе. Ч.2. Двухстержневой трансформатор  
ШАКИРОВ М.А., ВАРЛАМОВ Ю.В.

Представлены оригинальные картины магнитных полей, подтверждающие явления возникновения сверх- и антипоток в различных частях магнитопровода короткозамкнутых трансформаторов. Поля построены на основе метода конечных элементов с применением стандартной программы ELCUT. Разработанная методика доступна для проверки и применения в условиях университетских студенческих программ обучения. Вторая часть исследований посвящена двухстержневому трансформатору.

*Ключевые слова:* трансформатор, магнитный поток, ярмо, обмотка, короткое замыкание, метод конечных элементов, схема замещения

The original magnetic field patterns are presented that confirm the superflux and antiflux occurrence phenomena in different parts of the magnetic core of shortcircuited transformers. The field patterns are constructed using the standard ELCUT computer program based on the finite element method. The developed procedure is accessible for validation and application in the environment of university student education programs. The second part of investigations is devoted to a twoleg transformer.

*Key words:* transformer, magnetic flux, yoke, winding, short circuit, finite element method, equivalent circuit

*Электричество, 2015, №9, с.39–47.*

Аппроксиматоры синусоидальных функций в электроприводах с управлением моментом исполнительных двигателей

КАРЖАВОВ Б.Н.

Статья продолжает работы автора, посвященные исследованию электроприводов с управлением моментом исполнительных двигателей. Рассматривается построение множительных устройств, выполненных на базе квазисинусоидальных аппроксиматоров синусоидальных функций и используемых в электроприводах с моментным управлением исполнительными двигателями. Показаны особенности построения аппроксиматоров, применяемых в формирователях управляющих сигналов усилителей мощности приводов, а также в преобразователях сигналов синхронного генератора в реверсивный сигнал датчика скорости, в том числе и в зависимости от числа фаз. Получены выражения, характеризующие качество аппроксимации. Даны примеры использования аппроксиматоров в различных электроприводах.

*Ключевые слова:* электропривод, управление, множительное устройство, аппроксиматоры синусоидальных функций, особенности применения аппроксиматоров, критерий качества

This article is a continuation of the author's works devoted to investigation of electric drives involving torque control of actuator motors. Designing the multiplying devices made on the basis of quasi sinewave approximators of sinusoidal functions and used in electric drives with torque control of actuator motors is considered. The article also shows the specific features pertinent to designing the approximators used in the devices generating control signals for the drive power amplifiers and in the converters of signals from synchronous generators into the speed sensor's reversible signal, also depending on the number of phases. Expressions characterizing the approximation quality are obtained. Examples of using approximators in various types of electric drives are given.

*Key words:* electric drive, multiplying device, approximators of sinusoidal functions, specific features pertinent to applying approximators, quality criterion

*Электричество, 2015, №9, с.48–55.*

Параметрические взаимосвязи в однофазном малоискажающем выпрямителе на базе однофазного инвертора напряжения

МЫЦЫК Г.С., ХЛАИНГ МИН У

Предложено упрощенное модельное описание параметрических взаимосвязей в однофазном малоискажающем (активном) выпрямителе (ОМИВ). Выпрямитель выполнен на базе однофазного инвертора по мостовой схеме с формированием его противо-ЭДС по программному алгоритму однополярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с синусоидальным законом. Показано, что увеличение значений тактовой частоты ШИМ и емкости буферного конденсатора (до определенного рационального уровня) приводит к улучшению показателей качества энергетического потока на входе и выходе ОМИВ.

Вместе с этим повышается и точность предложенного модельного описания, что согласуется с особенностями используемого при исследовании метода основной гармоника.

*Ключевые слова:* активный выпрямитель, инверторная схема, алгоритм ШИМ, параметрические взаимосвязи, модельное описание, метод основной гармоники, проверка на адекватность, компьютерное моделирование

A simplified model description of parametric interrelations in a singlephase lowdistortion (active) rectifier (SLDR) is proposed. The rectifier is made on the basis of a singlephase bridge inverter with its counter EMF generated using a softwarebased algorithm of unipolar pulsewidth modulation (PWM) according to a sinewave law. It is shown that by increasing the PWM clock frequency and capacitance of the buffer capacitor (to a certain reasonable level) it is possible to improve the power flow quality indicators at the SLDR input and output. In addition, better accuracy of the proposed model description is obtained, which is consistent with the specific features of the fundamental harmonic component method used in the investigation.

*Key words:* active rectifier, inverter arrangement, PWM-algorithm, parametric interrelations, model description, fundamental harmonic component method, adequacy check, computer modeling

*Электричество, 2015, №9, с.55–64.*

Линеаризация усредненных структурных динамических моделей импульсных преобразователей постоянного напряжения в режиме прерывистого тока  
БЕЛОВ Г.А.

Уточняются ранее обоснованные автором нелинейные усредненные структурные модели импульсных преобразователей постоянного напряжения (ППН) в режиме прерывистого тока (РПТ) с учетом прямого падения напряжения на силовом диоде и эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС) выходного конденсатора. Обоснование линеаризованных структурных моделей в РПТ оказывается намного сложнее, чем в режиме непрерывного тока (РНТ). Ток дросселя в РПТ представляет собой последовательность импульсов треугольной формы, для определения длительности которых необходимо рассчитывать длительность спада тока на каждом периоде переключений  $T$ . Длительность спада тока, в свою очередь, нелинейно зависит от длительности включенного состояния силового транзистора, задаваемой широтно-импульсным модулятором (ШИМ), а также от входного и выходного значений напряжения силовой части. Указанная сложность преодолевается без учета обычно используемого допущения о равенстве нулю активного сопротивления силовой цепи силового дросселя, что позволяет получить более общие, точные и в то же время достаточно простые соотношения для расчета параметров предлагаемых линеаризованных структурных моделей. Предлагаемая методика обоснования моделей едина для всех трех схем ППН (понижающей, повышающей, инвертирующей). Показана возможность получения линеаризованных усредненных моделей из ранее обоснованных линеаризованных дискретных структурных моделей, которые являются элементами единой системы структурных динамических моделей импульсных ППН.

*Ключевые слова:* импульсный преобразователь, усредненные структурные динамические модели, режим прерывистого тока, линеаризация моделей, связь усредненных и дискретных моделей

The averaged nonlinear structural models of impulse DC voltage converters (DCVC) that were previously substantiated by the authors are determined more exactly for an intermittent current mode (ICM) taking into account the forward voltage drop across the power diode and

the equivalent seriesconnected impedance (ESI) of the output capacitor. The problem of substantiating linearized structural models in an ICM is much more difficult than in a continuous current mode (CCM). The choke current in an ICM is a sequence of triangularshape impulses, the duration of which is determined based on calculating the current fall duration on each switching interval  $T$ . In turn, the current fall duration depends nonlinearly on the duration of the power transistor switchedon state, which is set by the pulsewidth modulator (PWM), and on the power part's input and output voltages. The abovementioned difficulty is surpassed without taking into account the usually adopted assumption about zero resistance of the power choke's main circuit, as a result of which it becomes possible to obtain more general but at the same time quite simple correlations for calculating the parameters of the proposed linearized structural models. The proposed model substantiation procedure is common for all three types of DCVC arrangements (stepdown, stepup, and inverting). The article also demonstrates the possibility to obtain linearized averaged models based on the previously substantiated linearized discrete structural models, which are components of the unified system of structural dynamic models of impulse DCVCs.

*Key words:* impulse converter, averaged structural dynamic models, intermittent current mode, linearization of models, interrelation between averaged and discrete models

*Электричество, 2015, №9, с. 64–67.*

Импульсное сопротивление нескольких стержневых заземлителей опор воздушных линий  
АННЕНКОВ В.З.

Существующая практика проектирования опор ВЛ состоит в увеличении длины заземлителей с ростом удельного сопротивления грунта. Ориентировка на сопротивления промышленной частоты приводит к курьезной практике использования выносных заземлителей. Однако более точный расчет импульсного сопротивления стержневого заземлителя показал, что его импульсного сопротивления достаточно для молниезащиты. Импульсное сопротивление стержневого заземлителя слабо зависит от структуры грунта как горизонтальной, так и вертикальной, в отличие от сопротивлений при небольшом токе промышленной частоты. Для молниезащиты, по-видимому, достаточно одного стержневого заземлителя, но требования релейной защиты и техники безопасности могут потребовать увеличения числа заземлителей. Кроме того, это необходимо для сравнения и выбора оптимального заземлителя. Предлагается метод расчета импульсного сопротивления нескольких стержневых заземлителей на примере четырех заземлителей, расположенных по одной линии, опытные данные которых известны.

*Ключевые слова:* воздушные линии, опоры, заземлители, расчет сопротивления

According to the existing practice of designing overhead power line supports, the length of used grounding rods is increased with a growth of soil resistivity. The approach according to which power-frequency impedances are mainly taken into consideration results in the use of strange-looking external grounding rods. However, a more accurate calculation of the grounding rod impulse impedance has shown that its value is sufficient for ensuring the required lightning protection. A ground in rod's impulse impedance depends only slightly on both the horizontal and vertical soil structure unlike the impedances at a moderate level of power frequency current. Apparently, only one grounding rod is sufficient to ensure lightning protection. On the other hand, in order to comply with the relay protection and safety engineering requirements, it may be necessary to use a larger number of grounding rods. A method for calculating the impulse impedance of several grounding rods is proposed taking as

an example an in-line arrangement of four grounding rods the experimental data for which are known.

*Key words:* overhead lines, supports, grounding rods, impedance calculation

Анатолий Федорович Дьяков (Некролог)