

**Сравнительный анализ подавления фликера статическим тиристорным компенсатором и активным фильтрокомпенсирующим устройством
МАТИНЯН А.М., КИСЕЛЕВ А.Н., ДРОЗДОВ А.В.**

Приведены причины возникновения фликера, проведен анализ алгоритмов и принципов работы фликеркомпенсаторов на базе статических тиристорных компенсаторов (СТК) и активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ). Для случаев, нормированных ГОСТ, получены аналитические зависимости эффективности подавления фликера от параметров нагрузки и компенсирующих устройств. Рассмотрено влияние на фликер пассивных фильтров. На разработанных цифровых моделях фликеркомпенсаторов проведена верификация полученных зависимостей. На цифровых моделях СТК и АФКУ получены зависимости эффективности подавления фликера от мощности фликеркомпенсатора для реальных замеров нагрузочного тока дуговых сталеплавильных печей. Показано, что при определенных условиях работа СТК может приводить к увеличению фликера. За счет большего быстродействия АФКУ технически эффективнее (имеет больший коэффициент ослабления фликера), чем СТК. При этом АФКУ для достижения того же технического эффекта требуется меньшая установленная мощность оборудования, что обуславливает его большую экономическую эффективность по сравнению с СТК.

Ключевые слова: эффективность подавления фликера, СТК, АФКУ, ДСП, компьютерное моделирование

Factors causing the occurrence of flicker are pointed out, and the algorithms and operating principles of flicker compensators constructed on the basis of static thyristor compensators (STCs) and active filtering and compensating devices (AFCDs) are presented. Analytical dependences of the flicker suppression efficiency on the parameters of load and compensating devices are obtained for the cases regulated by the relevant Russian State Standard (GOST). The influence of passive filters on flicker is considered. The obtained dependences are verified using the developed digital models of flicker compensators. Dependences of flicker suppression efficiency on the flicker compensator capacity are obtained on the digital models of STCs and AFCDs for real measurements of arc steel melting furnace load current. It is shown that under certain conditions STC operation may lead to increase of flicker. Owing to its higher speed of response, an AFCD is more technically efficient (has a better flicker attenuation ratio) than an STC. It should be noted that in case of using an AFCD, the same technical effect is achieved with as smaller installed capacity of equipment, due to which it is a more economically efficient choice than an STC.

Key words: flickers up pression efficiency, STC, AFCD, steel*making electric arc furnace, computer modeling

**Система активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях 110–220/6–20 кВ
НАСЫРОВ Р.Р., ТУЛЬСКИЙ В.Н., КАРТАШЕВ И.И.**

Предлагается система активно-адаптивного регулирования напряжения трансформаторов с регулированием под нагрузкой (РПН), позволяющая по результатам расчетно-измерительных процедур выбрать требуемое положение переключателя РПН. Такой подход к централизованному регулированию напряжения в распределительных сетях позволяет обеспечить требуемый уровень напряжения у наибольшего возможного числа потребителей за счет прогнозирования изменения напряжения. При этом проводится учет остаточного ресурса РПН трансформатора, что не приводит к досрочному его износу. Результаты расчетных экспериментов показали, что применение системы активно-адаптивного управления РПН трансформатора, в сравнении с принципом встречного регулирования, позволяет на порядок увеличить число узлов сети с уровнем напряжения, соответствующим требуемому.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, качество электроэнергии, регулирование напряжения, активно-адаптивная система, регулирование под нагрузкой, математическое моделирование

The article is devoted to development of smart OLTC system for transformers based on actual voltage levels in the nodes of distribution grid. This approach to the centralized voltage control in distribution networks makes it possible to ensure the required level of voltage in the most possible number of consumers due to predict of voltage change. This also includes an account of the residual life of the transformer OLTC that does not lead to its premature exhaustion. The experiments showed that the use of smart OLTC system in comparison with the principle of counter regulation allows by times reduce the not within the required voltage level nodes of the network

Key words: power distribution networks, power quality, voltage control, active-adaptive system, no-load voltage control, mathematical modeling

**Применение PLC-технологий Yitran в системе управления блокировками безопасности распределительных устройств высокого напряжения
БОРИСОВ Р.К., КОВАЛЕВ Д. И., КОКОРИН С.А., КОЧУРОВ О.М.**

Рассмотрено применение технологии передачи данных по цепям питания (PLC) для управления оперативными блокировками коммутационных аппаратов электрических станций и подстанций. В качестве каналобразующей аппаратуры используются встраиваемые модемы фирмы Yitran. Основное внимание уделяется условиям распространения PLC-сигнала в реальной сети питания. С помощью методов цифрового спектрального анализа проведено исследование характеристик PLC-сигнала, формируемого модемами. Установлено, что уровень варьируется от 10 мВ до 1,5 В и занимает диапазон частот от 20 до 80 кГц. Экспериментально определен порог чувствительности модема (55 дБ) в условиях интенсивных помех. Предложена математическая модель на основе теории цепей с распределенными параметрами, отражающая свойства сетей питания в диапазоне частот, соответствующих спектру PLC-сигнала. По результатам моделирования сети протяженностью 1200 м сделан вывод о необходимости применения частотных заградителей с индуктивностью 1 мГн, снижающих влияние емкостных нагрузок на распространение PLC-сигнала. Данные рекомендации в отношении топологии организации сети.

Ключевые слова: электростанции, подстанции, распределительные устройства, управление, оперативная блокировка, связь, цепи питания

Application of the technology of data transmission via power line circuits (PLC) for controlling the operative interlocks of switching apparatuses at power plants and electrical substations is considered. Built-in modems produced by Yitran are used as channel forming equipment. The main attention is paid to PLC signal propagation conditions in a real power supply network. The characteristics of the PLC signal produced by the modems are investigated using the digital spectral analysis methods. It is found that the PLC signal level varies from 10 mV to 1.5 V and occupies a frequency band from 20 to 80 kHz. The modem sensitivity threshold under the conditions of intense interference is determined by experiment (55 dB). A mathematical model reflecting the properties of power supply networks in the frequency band corresponding to the PLC signal spectrum and constructed using the theory of circuits with distributed parameters is proposed. A 1200-m-long network was modeled, and a conclusion is drawn based on the modeling results that there is a need to install power line traps with an inductance of 1 mH, which reduce the influence of capacitive loads on the propagation of the PLC signal. Recommendation for shaping the network topology are given.

Key words: power plants, substations, switchgears, control, operative interlock, communication, power supply circuits

Предел мощности параллельного инвертора на высокой частоте ЮЛЕГИН А.Н.

Построена математическая модель классической схемы параллельного инвертора тока, используемого для индукционного нагрева. В модель заложены реальные параметры высокочастотного тиристора. Экономичность мощных инверторов определяется отношением выходной активной мощности к массе, стоимости или числу силовых ключей (тиристоры) инвертора, т.е. по трем удельным, в сущности эквивалентным, показателям кВт/кг, кВт/евро, кВт/вкл. При частотах 8 и 10 кГц основную долю составляют потери включения тиристоры, однако нет методики их расчета в связи со сложностью и неоднозначностью процесса включения. Известный из практики удельный показатель (примерно 30–35 кВт/вкл. для 10 кГц) далеко не предельный. Однако поиск оптимума, т.е. предела этого показателя, на основе физического перебора вариантов (выбор оптимальной индуктивности линии, соотношений напряжений, способов управления и т.д.) затруднителен и неэффективен. В статье предложен метод математических экспериментов и выполнено более 5 тыс. опытов, найден предел 51 кВт/вкл. для 10 кГц и других частот. Полученные оптимальные параметры представлены в таблицах и включены в инженерную методику проектирования параллельных инверторов; в результате удалось значительно понизить их стоимость или повысить мощность.

Ключевые слова: инвертор тока, параметры, математическая модель, оптимальные показатели

A mathematical model of the classic circuit of a parallel current inverter used for induction heating is constructed. The model includes the real parameters of a high-frequency thyristor. The efficiency of high-capacity inverters is determined by the ratio of the output active power to the mass, cost, or number of power switches (thyristors) of the inverter, i.e., by the following three indicators, which are essentially equivalent to each other: kW/kg, kW/euro, and kW/switch. At 8 and 10 kHz frequencies, thyristor switching-on losses account for the major part of the total losses. However, a procedure for calculating these losses is lacking due to complexity and ambiguity of the switching-on process. The specific indicator known from practice (approximately 30–35 kW/switch for 10 kHz) is far from being the limiting one. However, a search for the optimum, i.e., the limit of this indicator based on physical screening of versions (selecting the optimal line inductance, voltage ratios, control methods, etc.) is difficult and inefficient. The method of mathematical experiments is proposed, more than 5000 tests are carried out, and the limit equal to 51 kW/switch is found for 10 kHz and for other frequencies. The obtained optimal parameters are tabulated and included in an engineering procedure for designing parallel inverters; as a result, their cost was reduced considerably, or a significantly higher power output of the inverters was obtained.

Key words: current inverter, parameters, mathematical model, optimal indicators

Параметрические структурные схемы многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при поперечном пьезоэффекте АФОНИН С.М.

Применение прецизионного пьезопривода нано- и микроперемещений перспективно в оборудовании нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектроники и астрономии. Пьезокерамический актюатор (пьезоактюатор) или пьезодвигатель такого пьезопривода работает на основе обратного пьезоэффекта. Перемещение достигается за счет деформации пьезоактюатора в диапазоне от единиц нанометров до десятков микрометров с точностью до десятых долей нанометров при приложении электрического напряжения. Диапазон перемещения пьезопривода до сотен микрометров увеличивается при использовании многослойного (составного) пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте. Полученные в статье структурно-параметрическая модель, параметрические структурные схемы и передаточные функции многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте позволяют описывать его

динамические и статические свойства с учетом физических параметров, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.

Ключевые слова: многослойный пьезоактуатор, поперечный пьезоэффект, нано- и микроперемещения, деформация, параметрические структурные схемы, передаточные функции

Application of a high-precision piezoelectric drive of nano- and microdisplacements holds promise in the equipment of nanotechnology, nanobiology, microelectronics, and astronomy. The piezoceramic actuator (piezoactuator) or piezomotor of such piezodrive operates on the basis of inverse piezoelectric effect. Displacement is obtained as a result of piezoactuator deformation in the range from a few nanometers to several tens of micrometers with accuracy of a few tenths of nanometer when electric voltage is applied. The piezodrive displacement range can be increased to a few hundreds of micrometers through the use of a multilayer (composite) piezoactuator on the basis of transverse piezoelectric effect. By using the obtained structural-parametric model, the parametric structural diagrams, and transfer functions of a multilayer piezoactuator on the basis of transverse piezoelectric effect it is possible to describe its dynamic and static properties taking into account the physical parameters, external load, and resistance of matching electric circuits.

Key words: multilayer piezoactuator, transverse piezoelectric effect, nano- and microdisplacements, deformation, parametric structural diagrams, transfer functions

Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма **ПОЛЯХОВ Н.Д., ХА АНЬ ТУАН**

Существующие способы возбуждения синхронных генераторов основаны на построении систем с объектом управления с постоянными параметрами. В реальности же происходят существенные изменения параметров в различных режимах работы, характерных, например, при выдаче и потреблении энергии. В линеаризованной модели синхронного генератора даже в режиме потребления наблюдается изменение знака одного из параметров. Для автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) с взаимосвязанными контурами настройка систем выполняется опытным оператором, причем процедура может быть сложной и занимать много времени. Результатом всегда является установка одной компромиссной настройки АРВ, далеко не оптимальной для всех режимов работы машины. В статье представлен новый алгоритм управления синхронным генератором на основе безынерционной параметрической адаптации. При синтезе алгоритма использован метод функций Ляпунова. Алгоритм, полученный в алгебраической форме, обладает экспоненциальной устойчивостью адаптивных процессов и отрабатывает значительную неопределенность объекта управления (пятикратное уменьшение и увеличение параметров), а также аддитивные возмущения (электромагнитный момент). Проведенное моделирование адаптивного синхронного генератора в среде MATLAB/Simulink показывает стабильность (почти одинаковость) форм основных переходных процессов по частоте и напряжению. Алгоритм не требует предварительного исследования и после несложных расчетов почти готов для практического использования или внедрения.

Ключевые слова: синхронный генератор, система возбуждения, адаптивное управление, функции Ляпунова, параметрическая адаптация

The existing methods for exciting synchronous generators are based on constructing systems with a controlled plant having constant parameters. In reality, the plant parameters undergo essential changes in different modes of operation, e.g., those typical for power generation and consumption. In the linearized model of a synchronous generator, a change in the sign of one of the parameters is observed even in the power consumption mode. For automatic excitation controllers (AECs) with interconnected loops, the systems are tuned by an experienced operator; the tuning procedure may be quite complicated and may take much time. As a result, a single compromise tuning of the AEC is setup, which is far from being the optimal one for all modes of machine operation. The article presents a new algorithm for control of asynchronous generator on the basis of inertia-free parametric adaptation. In

synthesizing the algorithm, the method of Lyapunov functions is used. The algorithm, which is obtained in algebraic form, has exponential stability of adaptive processes and is robust to a significant uncertainty of the controlled plant (it adapts to five-fold decrease and increase of the parameters) and to additive disturbances (the electromagnetic torque). The performed modeling of an adaptive synchronous generator in the MATLAB/Simulink environment shows stability (almost identity) of the patterns of the main frequency and voltage transients. The algorithm does not require preliminary investigation and after carrying out some straightforward calculations becomes almost ready for practical use or application.

Key words: synchronous generator, excitation system, adaptive control, Lyapunov functions, Parametric adaptation

Выбор коммуникационной основы для умных энергетических систем КСЕНОФОНТОВ М.А.

Пути создания умных энергетических систем в значительной степени зависят от того, каким образом будет осуществляться информационный обмен между объектами, составляющими указанную систему, т.е. какова коммуникационная основа системы. Предлагается использование принципа передачи данных PLC (Power Line Communication) по электрическим проводам с использованием двух сред (двух каналов связи, обладающих различающимися физическими свойствами). Технология PLC открывает новые возможности реализации концепции «умного дома», в котором вся бытовая электроника объединена в единую информационную сеть с возможностью централизованного управления. Электрическая сеть – идеальная среда передачи управляющих сигналов между бытовыми приборами, работающими от сети 110/220 В. Встроенные в различные приборы специализированные микросхемы могут обеспечить возможность приема/передачи данных через электросеть. В настоящее время отечественной промышленностью освоена данная технология и она наиболее широко нашла применение в приборах учета электроэнергии.

Ключевые слова: энергетические системы, линии электроснабжения, передача информации, «умный» дом, направляющая структура

Ways of creating smart power systems depend to a considerable degree on how information exchange will be carried out between the facilities constituting the system, i.e., on what is the communication basis of the system. It is proposed to use the power line communication (PLC) principle via two media (two communication channels having different physical properties). The use of PLC technology opens new possibilities for implementing the “smart house” concept, in which all domestic electronic devices are united into a single information network with the possibility of carrying out centralized control. An electric network is the ideal medium for transmitting control signals among domestic appliances operating from a 110/220 V network. Dedicated microchips built in various appliances make it possible to organize receiving and transmission of data via the electric network. At present, the domestic industry has brought this technology to the level of commercially available product, and it has found the widest use in electric energy accounting instruments.

Key words: power systems, power supply lines, data transmission, “smart house”, guiding structure

Оценка энергии, выделенной в нелинейных ограничителях перенапряжений при воздействии атмосферных перенапряжений КОЛЕЧИЦКИЙ Е.С.

Предложен новый способ оценки энергии, выделенной в ограничителях перенапряжений

(ОПН), при воздействии волн перенапряжений, набегающих на подстанцию (ПС) с воздушных линий. Способ основан на оценке энергии падающего импульса. Так как энергия, которую несет импульс тока, конечна, то и выделенная в ОПН энергия также конечна и не может быть больше энергии импульса тока. Выводится формула для определения полной энергии, которую несет импульс тока. В справедливости формулы можно убедиться, если рассмотреть задачу о падении волны на нагрузку, сопротивление которой равно волновому сопротивлению линии. Для этой же цели можно также использовать программу ЕМТР-АТР. Определив полную энергию падающей волны, можно найти верхний предел энергии, которую необходимо затратить, чтобы ограничить перенапряжения. В число ограничений в этой задаче входят: ограничение амплитуды падающей волны напряжения до уровня электрической прочности изоляции линии; параметры ОПН, задаваемые нормативными документами, и требуемый уровень ограничения перенапряжений по ГОСТ 1516.3—96. Из результатов расчетов следует, что для классов напряжения 220 – 750 кВ полная энергия, выделенная в ОПН, составляет примерно 84 % энергии падающей волны. Этот вывод позволяет утверждать, что в задачах по защите от грозových перенапряжений ОПН полностью выполняют свои функции без перегрузок. Показано, что ОПН, установленные на воздушных линиях для снижения числа грозových отключений, не перегружаются в случаях, когда они установлены на промежуточных опорах. Приведены рекомендации для учета отходящих от ПС линий, которые можно использовать для оптимизации числа ОПН на ПС.

Ключевые слова: подстанции, линии электропередачи, ограничение перенапряжений, импульс тока, энергия

A new method for estimating the energy released in overvoltage limiters (OVLs) under the effect of voltage surges arriving to a substation from overhead lines is proposed. The proposed method is based on estimating the energy of an incident impulse. Since the energy carried by the current impulse has a finite value, so is the energy released in the OVL and cannot be greater than the current impulse energy. A formula for determining the total energy carried by the current impulse is derived. That the formula is valid can be ascertained if we consider the problem about a surge arriving to a load the impedance of which is equal to the line surge impedance. The EMTP"ATP computer program can be used for the same purpose. Having determined the full energy of incident surge, it is possible to find the upper limit of the energy that must be dissipated to limit the overvoltage. The list of constraints used in this problem includes the following: limiting the amplitude of incident voltage surge to the power line insulation strength level, the OVL parameters specified by the relevant regulatory documents, and the required overvoltage limitation according to GOST (State Standard) 1516.3—96. It follows from the calculation results that for the voltage classes 220—750 kV, the full energy released in the OVL is equal to around 84% of the incident surge energy. This conclusion allows us to state that, as far as protection from lightning voltage surge is concerned, the OVLs fully perform their functions without being overloaded. It is shown that OVLs installed on overhead lines for reducing the number of lightning-caused disconnections are not overloaded if they are installed on intermediate towers. Recommendations for taking into account the lines outgoing from a substation are suggested, which can be used for optimizing the number of OVLs installed at the substation.

Key words: substations, power lines, limitation of overvoltages, current impulse, energy

Борис Иванович Кудрин
(К 80_летию со дня рождения)

Указатель материалов, опубликованных в журнале «Электричество» в 2014 г.