

Научно-исследовательская деятельность Института электротехники Университета им. Лейбница в Ганновере в области электрометаллургических процессов плавления
БАКЕ Е., СПИТАНС С.

Широкий спектр металлургических плавильных процессов в промышленности проводится с использованием электротермических и электромагнитных технологий. Применение электротехнологий имеет много преимуществ с экологической и экономической точек зрения. Несмотря на то, что уровень электромагнитных плавильных установок, используемых в отрасли, сегодня очень высок, еще есть потенциал для их улучшения и оптимизации. В данной статье описаны последние приложения и будущие тенденции эффективного использования электромагнитных технологий обработки в металлургических процессах плавления на примерах, которые являются частью научно-исследовательской деятельности Института электротехнологии Университета Лейбница в Ганновере.

Ключевые слова: электротермия, процесс плавления, электромагнитные технологии, экология, экономика

A wide range of industrial metallurgical melting processes are carried out using electrothermal and electromagnetic technologies. The application of electrotechnologies offers many advantages from technological, ecological and economical point of view. Although the technology level of the electromagnetic melting installations and processes used in the industry today is very high, there are still potentials for improvement and optimization. In this paper recent applications and future development trends for efficient use of electromagnetic processing technologies in metallurgical melting processes are described along selected examples which are part of the research activities of the Institute of Electrotechnology of the Leibniz University of Hannover.

Key words: metallurgical processes, induction melting, electromagnetic levitation, electromagnetic processing

Решение краевой задачи уравнения Пуассона для движущейся заряженной капельной пелены в форме прямоугольного параллелепипеда
КОРОТЧЕВ А.А., НАГЕЛЬ Ю.А., САФРОНОВ А.А.

Одна из основных задач, стоящая на пути практического создания капельного холодильника-излучателя для космических энергоустановок, – обеспечение прямолинейности траекторий движения капель в условиях микрогравитации. Вследствие взаимодействия движущейся капельной пелены с космической плазмой капли приобретают одноименный электрический заряд. Это приводит к отклонению отдельных капель и жидкокапельных слоев от прямолинейных траекторий. Рассматривается возможность парирования этого эффекта с помощью внешнего электрического поля. При постановке задачи используются идеи А.А. Власова, объединяющие подходы к решению на основе дискретности и сплошности среды. Приводятся аналитические решения краевой задачи уравнения Пуассона для пелены в форме прямоугольного параллелепипеда в случае линейного увеличения электрического заряда капель по длине пелены. На основе полученного решения показано, что путем выбора граничных условий (запирающих потенциалов) имеется возможность минимизировать отклонение капель от прямолинейных траекторий.

Ключевые слова: капельный холодильник-излучатель, заряженная капельная пелена, электрическое поле, электризация капель, электрический заряд, уравнение Пуассона

One of the key problems that have to be solved for constructing a droplet cooler-radiator for space power installations is to set up straight motion trajectories of droplets in microgravity environment. Due to interaction between the moving droplet sheet and space plasma, the droplets acquire unipolar electric charge. This results in that some droplets and liquid-droplet layers deviate from straight trajectories. The possibility of compensating this effect by means of external electric field is considered. In stating the problem, A.A. Vlasov's ideas are used, which unite the approaches to solving the problem on the basis of discrete and continuous properties of medium. Analytic solutions of the Poisson equation boundary problem are presented for a droplet sheet having the shape of a rectangular parallelepiped for the case of linearly increasing electric charge of droplets along the sheet length. It is shown from the obtained solution that by selecting the boundary conditions (blocking potentials) it is possible to minimize deviations of droplets from rectangular trajectories.

Key words: droplet cooler-radiator, charged droplet sheet, electric field, electrization of droplets, electric charge, Poisson equation.

Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами (Часть 1)

ШАКАРЯН Ю.Г., ФОКИН В.К., ЛИХАЧЕВ А.П.

На примере электроэнергетической системы простой структуры, содержащей одну и две параллельно работающие линии электропередачи, представлены ее аналитические зависимости и режимные характеристики в установившемся режиме при наличии на передающем конце электропередачи различного типа фазоповоротных устройств (ФПУ), построенных на основе фазоповоротного трансформатора и на основе современной силовой электроники – объединенного регулятора потока мощности. Рассмотрены ограничения применения отдельных типов ФПУ и мероприятия по их ослаблению.

Выполнен анализ распределения потоков активной и реактивной мощностей внутри данных типов устройств с рассмотрением значений амплитуды и фазы тока на входе и выходе ФПУ. Получены соотношения, определяющие установленную мощность различных типов ФПУ, и при относительно равном влиянии на энергосистему проведено сопоставление как требуемых установленных мощностей, так и их стоимости.

Исследовано перераспределение потоков мощности между параллельно работающими линиями электропередачи при наличии фазоповоротных устройств на одной из них для случаев наличия и отсутствия ограничения токовой нагрузки ЛЭП по нагреву проводов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, линия электропередачи, фазоповоротное устройство, фазоповоротный трансформатор, объединенный регулятор потока мощности

The analytic dependences and steady-state operating characteristics of an electric power system fitted with different types of phase-shifting devices (PSDs) installed at the power line sending end (implemented on the basis of a phase-shifting transformer and using a unified power flow controller made on the basis of modern power electronics) are presented taking as an example a simple power system containing one and two parallel power lines. Limitations imposed on the use of individual types of PSDs and measures for relieving them are considered. The distribution of active and reactive power flows inside these types of devices is analyzed taking into consideration the amplitude and phase of the current at the PSD inlet and outlet. Correlations for determining the installed capacity of different types of PSDs are obtained, and comparison of PSDs having relatively commensurable effects on the power system is carried out in terms of the required capacities and costs. The redistribution of power flows between parallel power lines with a PSD installed in one of them is investigated for the cases with and without constraints imposed on the power line current loading based on permissible heating of wires.

Key words: electric power system, power line, phase-shifting device, phase-shifting transformer, unified power flow controller

Метод анализа высших гармоник напряжения в магистральной электрической сети
САЛИМОВА А.С., ТУЛЬСКИЙ В.Н., ШАМОНОВ Р.Г.

Описан метод анализа высших гармоник в сложносвязанных электрических сетях 110 кВ и выше для выявления доминирующих источников искажения. Для каждого узла, в котором проведены измерения показателей качества электроэнергии (КЭ), предлагается рассчитывать так называемые эквивалентные токи высших гармоник, характеризующие некие абстрактные источники гармоник, присоединенные непосредственно к данным узлам и которые могли бы создавать в нем напряжение, равное фактическому измеренному на соответствующей частоте при отсутствии в сети прочих источников высших гармоник. Путем сопоставления эквивалентных токов для различных узлов сети предлагается выявить расположение доминирующих источников высших гармоник. Показано, что наряду с индикацией близости расположения мощных нелинейных нагрузок, вносящих наибольшие искажения, высокие (относительно соседних узлов) значения эквивалентных токов также указывают на узлы сети, вблизи которых мероприятия по компенсации токов гармоник будут наиболее эффективными. Представлены результаты апробации метода на математической модели и на результатах измерений показателей КЭ в сетях 110–220–500 кВ реальной энергосистемы. Предлагаемый метод позволяет выявить расположение доминирующих источников высших гармоник, достаточно прост в применении и его несложно включить в функционал автоматизированных систем мониторинга показателей КЭ.

Ключевые слова: электрические сети, высокое напряжение, качество электроэнергии, искажение кривой напряжения, источники высших гармоник, компенсация высших гармоник

A method of analyzing higher harmonic components in meshed electric networks with rated voltages of 110 kV and higher for revealing dominating sources of distortion is described. For each node in which the electric power quality indicators were measured, it is proposed to calculate so-called equivalent higher harmonic currents that characterize certain abstract sources of harmonic components directly connected to these nodes and that could produce in them a voltage equal to the actually measured one at the corresponding frequency provided that the network does not contain other sources of higher harmonic components. It is proposed to reveal the locations of dominating sources of higher harmonic components by comparing the equivalent currents for different network nodes. It is shown that, along with indicating the proximity of large nonlinear loads introducing the largest distortions, high (with respect to neighboring nodes) values of equivalent currents also point to network nodes near which the measures taken to compensate the higher harmonic components of currents will yield the best effect. Results from approving the method on a mathematical model and on the results obtained from measurements of the electric power quality indicators in the 110–220–500 kV networks of a real power system are presented. By using the proposed method it is possible to reveal the locations of dominating sources of higher harmonic components; the proposed method is fairly simple in use and can be easily incorporated in the scope of functions performed by automated systems for monitoring the electric power quality indicators.

Key words: electric networks, high voltage, electric power quality, distortion of voltage waveform, sources of higher harmonic components, compensation of higher harmonic components

**Математическая модель многомашинной электрической системы
в фазных координатах**
СИВОКОБЫЛЕНКО В.Ф.

Разработана математическая модель многомашинной электрической системы на основе дифференциальных уравнений в фазных координатах для всех элементов системы, позволяющая учитывать пофазную несимметрию параметров и выполнять расчеты динамической устойчивости, а также режимов пуска и самозапуска двигательной нагрузки после отключений различного вида коротких замыканий. Дифференциальные уравнения всех элементов электрической системы представлены в модели в естественных координатах. Получены аналитические выражения для обратных матриц индуктивностей и для представления асинхронных и синхронных машин во внешней схеме в виде трехфазных эквивалентных индуктивностей и противо-ЭДС, что упрощает формирование модели и сокращает время расчетов. Модель позволяет учитывать асимметрию параметров по фазам при расчетах различного вида коротких замыканий и аварийных режимов.

Ключевые слова: электрическая система, математическая модель, синхронная и асинхронная машина, дифференциальные уравнения, система координат

The mathematical model of a multimachine electric system is developed on the basis of differential equations written in the phase coordinate axes for all components of the power system, which takes into account phase asymmetry of the parameters and allows the user to carry out calculations of transient stability and motor load starting and self-starting modes after clearing different kinds of short-circuit faults. The differential equations of all electric system components are presented in the model in the natural coordinate axes. Analytic expressions for inverse inductance matrices and for representing induction and synchronous machines in the external system in the form of equivalent three-phase inductances and counter-EMFs are obtained, the use of which simplifies construction of the model and reduces the computation time. The model takes into account asymmetry of parameters in phases in carrying out calculations of different kinds of short-circuit faults and emergency modes of operation.

Key words: electric system, mathematical model, synchronous and induction machines, differential equations, coordinate system

**Работа ветроэлектростанций в энергосистеме
и «мифы» об их негативном влиянии**
ЕЛИСТРАТОВ В.В.

В настоящее время ветроэнергетика является одним из наиболее активно развивающимся самостоятельных направлений энергетики. На конец 2013 г. установленная мощность сетевых ветроэлектростанций в мире превысила 318 ГВт. Промышленностью освоена широкая номенклатура ветроэнергетических установок мегаваттного класса, позволивших преодолеть многие «детские» болезни ветроэнергетики, в том числе энергетические, системные, экологические. Рассмотрены способы повышения надежности сетевого энергоснабжения при заметной доле участия ветроэлектростанций (ВЭС):

укрупнение ветропарков по числу ВЭУ;

объединение управления отдельных ветропарков в единый энергокомплекс;

повышение точности прогнозирования прихода ветровой энергии;

объединение крупных ВЭС в энергокомплекс с аккумулирующими системами;

использование современного электротехнического оборудования ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, работа в энергосистеме, мощность, современное оборудование

Wind power plants (WPPs) are presently one of the most rapidly developing self-contained areas of power engineering. By late 2013, the installed capacity of network wind power plants around the world exceeded 318 GW. A wide range of megawatt-class wind power plants have now become commercially available, the use of which made it possible to overcome many difficulties of the early stage in the development of wind power industry, including those related to energy, systems, and environmental aspects. Ways for achieving more reliable operation of power supply networks with a noticeable fraction of wind power plants are considered, including the following ones:

increasing the number of WPPs in a wind farm;
uniting the control of individual wind farms into a single power complex;
achieving more accurate prediction of wind energy inflow;
uniting large WPPs into a power complex containing energy storage systems;
making WPPs with the use of advanced electrical equipment.

Key words: wind power plants, operation on a power system, power capacity, advanced equipment

Анализ устойчивости и показателей качества переходных процессов в одноконтурной системе управления понижающим импульсным преобразователем БЕЛОВ Г.А., АБРАМОВ С.В.

Проведено исследование устойчивости и колебательности переходных процессов одноконтурной системы управления понижающим импульсным преобразователем, ранее синтезированной частотным методом с использованием непрерывной динамической модели преобразователя. При этом используется обоснованная авторами дискретная структурная модель и метод z-преобразования. Построены и проанализированы годографы корней характеристического уравнения дискретной модели и частотные характеристики, позволяющие судить об устойчивости по критерию Найквиста и определять коэффициент колебательности. Рассмотрено изменение характеристик системы при уменьшении частоты переключений. Результаты сравниваются с данными, полученными при применении непрерывной динамической модели системы. Показано, что с уменьшением частоты переключений результаты, получаемые при использовании непрерывной модели, дают все большую погрешность.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, система управления, дискретная структурная модель, передаточная функция, смещенное z-преобразование, характеристическое уравнение, годографы корней, устойчивость, частотные характеристики, коэффициент колебательности

The stability and oscillatory characteristics of transients in the single-loop control system of a step-down impulse converter are studied. The control system under study was previously synthesized using a continuous dynamic model of the converter. The investigation is carried out using the discrete structural model substantiated by the authors and the method of z-transformation. The root loci of the discrete model's characteristic equation and the frequency responses are constructed and analyzed, from which a judgment can be made about stability according to the Nyquist criterion, and from which the oscillatory coefficient can be determined. The variation of system characteristics in decreasing the switching frequency is considered. The results are compared with the data obtained in using a continuous dynamic model of the system.

It is shown that with decreasing the switching frequency, the results obtained using the continuous model are becoming increasingly less accurate.

Key words: impulse converter, control system, discrete structural model, transfer function, shifted z-transformation, characteristic equation, root loci, stability, frequency responses, oscillatory coefficient

Физические процессы при демпфировании электромеханических колебаний синхронной машины с модульно-фазовым автоматическим регулятором возбуждения

АГАМАЛОВ О.Н.

Рассмотрены физические процессы демпфирования электромеханических колебаний синхронной машины без регулирования возбуждения. Применяется пропорциональный (АРВ-П) и модульно-фазовый автоматический регулятор возбуждения (АРВ-МФ), реагирующий на отклонения значения и фазы фазора напряжения статора. Показаны преимущества АРВ-МФ по сравнению с указанными выше другими структурами управления возбуждением. Приведен пример расчета коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности синхронной машины с вышеприведенными системами регуляторов возбуждения для простейшей модели «синхронный генератор – шины бесконечной мощности». Из примера следует, что переменный для АРВ-МФ коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности превосходит значение для АРВ сильного действия (АРВ-СД) с некоторого настраиваемого отклонения угла ротора.

Ключевые слова: синхронный генератор, фазор напряжения статора, автоматический регулятор возбуждения, коэффициент запаса статической устойчивости, управление по комплексному выходу объекта

The physical processes connected with damping electromechanical swings of a synchronous machine without excitation control are considered. For achieving better damping of electromechanical oscillations, proportional and modulus-phase automatic excitation controllers are used (AEC-P and AEC-MF). The latter responds to deviations of the stator voltage phasor modulus and phase. The advantages of the AEC-MF over the other considered excitation control structures are shown. An example of calculating the steady-state stability margin coefficient with respect to the synchronous machine power output is given for the cases of a synchronous machine equipped with the above-mentioned excitation control systems for the simplest «synchronous generator - infinite bus» model. It follows from the presented example that the steady-state stability margin coefficient with respect to active power, which has a variable value for the AEC-MF, is higher than that of the so-called strong-action AEC starting from a certain adjustable deviation of rotor angle.

Key words: synchronous generator, stator voltage phasor, automatic excitation controller, steady-state stability margin coefficient, control with respect to the plant's complex output

**Памяти Александра Степановича Шаталова (1914—2004)
(К 100-летию со дня рождения)**

**Памяти Александра Васильевича Баева
(К 100-летию со дня рождения)**