

Электротехника 08-2016, стр. 2

К юбилею кафедры ТЭВН МЭИ

ХРЕНОВ С.И.

Электротехника 08-2016, стр. 3-8

О технических требованиях к дугогасящим реакторам в распределительных сетях 6–35 кВ

МАТВЕЕВ Д.А., БЫКОВА А.М., ЖУЙКОВ А.В., ЛАРИН В.С., НИКУЛОВ И.И.,
ХРЕНОВ С.И.

Разработка технических требований к дугогасящим реакторам (ДГР), предназначенным для компенсации емкостных токов однофазных замыканий на землю в электрических сетях, является актуальной задачей. Соответствующий ГОСТ 19470-74 «Реакторы масляные заземляющие дугогасящие. Технические условия» не действует, широко внедряются автоматически регулируемые реакторы (с регулируемым зазором, управляемые подмагничиванием), появляются принципиально новые конструкции реакторов, в частности с конденсаторным регулированием. Устарела и типовая инструкция по компенсации емкостных токов [1], не учитывающая новые технические решения. В статье обсуждаются имеющиеся и предлагаются новые критерии применения ДГР в сетях 6–35 кВ. Предложено в качестве основного критерия применения устройств компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю использовать не степень расстройки ДГР, а остаточный ток в месте замыкания, тогда с учетом условий электробезопасности предъявляются новые требования к ДГР и состоянию сетей, характеризуемому активными токами на землю и содержанием высших гармоник. Отдельно рассмотрен вопрос емкостной несимметрии и показано, что в случае применения реакторов, управляемых подмагничиванием, отсутствует необходимость симметрирования сетей и ограничения напряжения несимметрии на уровне 0,75% фазного напряжения. Данные рекомендации предлагается учитывать при разработке инструкции по компенсации емкостных токов и общих технических требований к ДГР и системам их автоматической настройки.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, компенсация емкостных токов, дугогасящие реакторы.

There is a years-long necessity of development of technical requirements for single-phase earth fault arc suppression reactors (ASR) in Russian Federation. An old standard GOST 19470-74 «Oil-filled arc suppression reactors. Technical requirements» is withdrawn, automatically-controlled ASRs, either of plunger-type or controlled by magnetic biasing, find more and more usage. Completely new reactor designs have appeared, for example capacitor-controlled reactors. Guide for earth-fault current compensation became obsolete as well for not taking into account new technologies. So development of such an instruction is a crucial task. Current paper considers existing and provides new criteria of ASR application in 6–35 kV distribution networks. It is proposed to use the residual earth-fault current as a major criterion for capacitive current compensation, as opposed to ASR tuning coefficient. Such an approach together with electrical safety regulations imposes requirements both to the ASR itself and to the network conditions, characterized by active phase-to-ground currents and harmonics content. Furthermore, the problem of capacitance asymmetry is considered. It is shown, that usage of ASRs controlled by magnetic biasing allows to omit network balancing and limitation of asymmetry voltage less than 0.75% of phase voltage. It is proposed to apply these findings to development of earth-fault current compensation guide and general technical requirements to ASRs and systems of their automatic tuning.

Key words: one-phase earth faults, compensation of earth faults, arc suspension reactors

Электротехника 08-2016, стр. 9-15

Оценка эффективности дугогасящих реакторов на экспериментальном стенде по энергетическому критерию

МАТВЕЕВ Д.А., ЖУЙКОВ А.В., НИКУЛОВ И.И., СКОРОХОДОВА А.Ю., ХРЕНОВ С.И.

Исследуется эффективность дугогасящих реакторов (ДГР) в условиях перемежающихся однофазных дуговых замыканий (ОДЗ) на землю. На основании теоретического анализа, уточняющего полученные ранее расчетные соотношения, сделан вывод о достаточно сильном влиянии точности настройки ДГР на время восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги ОДЗ в области малых расстроек компенсации, что служит обоснованием ужесточения требований к точности настройки. Приведенные соображения подтверждены путем физического моделирования перемежающихся дуговых замыканий на экспериментально-испытательном стенде ОАО «РЭТЗ Энергия» с емкостным током однофазного замыкания на землю 43 А. В экспериментах учитывались активные проводи- мости сети на землю, которые моделировались с помощью водных

резисторов, обеспечивавших изменение активного сопротивления путем их подогрева выдержкой под рабочим напряжением в перерывах между опытами. Для интерпретации результатов измерений и возможности количественного сопоставления эффективности реакторов различных конструкций предложен энергетический критерий оценки эффективности ДГР в условиях перемежающихся ОДЗ, заключающийся в оценке средней мощности, выделяющейся в месте дугового замыкания. По результатам измерений средних мощностей ОДЗ установлена целесообразность ограничения допустимой степени расстройки ДГР с регулируемым зазором на уровне 3%. Выполнен анализ работы ДГР с подмагничиванием в режиме перемежающегося ОДЗ и приведено сопоставление эффективности в этом режиме для реакторов РЗДПОМ-300/6,6 и РУОМ-300/6,6.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, компенсация емкостных токов, дугогасящие реакторы, экспериментальный стенд.

The article discusses the effectiveness of arc suppression reactors (ASRs) at the time of intermittent arcing single-phase earth faults. On the basis of theoretical analysis, ascertaining the earlier obtained ratios, a conclusion has been made that there exists a sufficiently strong influence of the accuracy of ASR tuning on the voltage recovery time on the damaged phase after extinction of the arcing single-phase earth faults when it comes to a range of small detuning coefficient values. This, therefore, justifies stiffening the requirements for accuracy of ASR tuning. This reasoning has been confirmed experimentally by physically modeling the alternating arcing faults on a 6 kV experimental setup of «RETZ Energy» with capacitive currents of single-phase earth faults of 43 A. A distinctive feature of the experiment was the taking into account the conductance of the network to the ground. The conductance was modeled using water resistors, which provide change in resistance when they are heated after exposure under operating voltage in between experiments. For the interpretation of the results of the measurements and for quantitative comparison of different designs of reactors, an energy criterion for evaluating the performance of the ASRs in intermittent arcing single-phase earth faults has been suggested. This criterion is based on evaluating the average power dissipated at the location of the arc fault. According to the results of the measurements, that took effect of the real values of the network conductance to the ground, the feasibility of limiting the permissible degree of detuning of the plunger-type ASRs of 3% was established. This article also analyzes the performance of the ASRs controlled by magnetic biasing during intermittent arcing single-phase earth faults and presents a comparison of the efficiency of the reactors RZDPOM-300/6.6 and RUOM-300/ 6.6.

Key words: single-phase earth faults, compensation of earth faults, arc suspension reactors, experimental setup.

Электротехника 08-2016, стр. 16-22

Минимизация высших гармоник в токе управляемого подмагничиванием дугогасящего реактора

ЖУЙКОВ А.В., МАТВЕЕВ Д.А., ХРЕНОВ С.И., НИКУЛОВ И.И.

Одна из целей применения дугогасящих реакторов (ДГР) в сетях 6–35 кВ – ограничение тока металлического однофазного замыкания на землю. Ток нелинейных искажений реактора вносит вклад в остаточный ток замыкания, по- этому его минимизация является важной задачей при проектировании ДГР. Отличительной особенностью управляемых подмагничиванием ДГР является работа в режимах технического насыщения электротехнической стали. При этом ток намагничивания устройства содержит высшие гармонические составляющие, доля которых зависит от конструкции магнитной системы и свойств электротехнической стали. В статье предложен подход к оптимизации магнитной системы управляемых подмагничиванием ДГР, основанный на корректировке характеристики намагничивания магнитопровода по результатам экспериментального определения гармонического состава токов реактора в широком диапазоне регулирования подмагничивания. Выполнен анализ влияния параметров совмещенной бронестержневой магнитной системы на ток искажения реактора. Приведены результаты обработки данных экспериментов, на основе которых получена характеристика намагничивания, обеспечивающая расчет гармонического состава тока реактора с погрешностью, не превышающей 10%. С помощью предложенного подхода выполнен оптимизационный расчет параметров участков магнитной системы реактора РУОМ, позволивший снизить ток искажений до 4% во всем диапазоне регулирования (10–120%) номинальной мощности реактора и до 1% в диапазоне 60–100% номинальной мощности реактора.

Ключевые слова: дугогасящие реакторы, однофазные замыкания на землю, токо-потокосная кривая, гармоники

Among the purposes of ASR application in 6– 35 kV distribution networks is the compensation of single-phase earth fault currents. Electric current caused by reactor's nonlinear distortions contributes into residual short-circuit current, thus demanding minimization of the former during ASR designing. ASRs controlled by magnetic biasing have a specific feature of operating within electrical steel technical saturation region. Under such conditions apparatus' magnetizing current contains higher harmonic components, with percentage of those depending

on the design of the magnetic system and electrical steel characteristics. This paper considers an approach to optimization of magnetic system of magnetically-controlled ASRs, the approach being based on adjustment of magnetization characteristic of magnetic circuit according to the experimental measurements of reactor current harmonics content in a wide range of magnetization current. In addition, effects of combined shell-core magnetic system parameters on reactor's distortion current are analyzed. The paper presents results of experiments conducted on a three-phase experimental test installation proprietary to "RETZ Energy" transformer factory. These results provided base for computation of harmonics content of reactor current with calculation error no more than 10%. Calculation for optimizing parts of RUOM reactor magnetic system was performed using presented approach, allowing to limit distortion current to 4% within entire control range (10–120% of nominal reactor power) and to 1% within a range of 60–100% of nominal power.

Key words: single-phase earth faults, arc suppression reactors, flux-current curve, harmonics.

Электротехника 08-2016, стр. 23-28

Применение системы с распределенной архитектурой сбора и обработки информации в задачах активно-адаптивного управления напряжением в распределительных электрических сетях

АЛЕШИН С.В., ВАНИН А.С., НАСЫРОВ Р.Р., НОВИКОВ Д.О., ТУЛЬСКИЙ В.Н.

Рассмотрена система активно-адаптивного управления режимами электрических сетей с распределенной архитектурой сбора и обработки данных. Описаны преимущества данного принципа управления по сравнению с традиционными методами. Дано описание аппаратных средств отечественной разработки – контроллера присоединения программируемого регистрирующего (КП-ПР), предназначенного для измерения базовых электротехнических параметров и построения распределенных систем сбора и обработки данных. Рассмотрена процедура диспетчерского управления и сбора данных (система СОНАТА), основанная на распределенной многоядерной архитектуре, обладающая высокой надежностью и поддерживающая режим жесткого реального времени. Реализована полнофункциональная натурная модель системы активно-адаптивного регулирования напряжения, выполненная с использованием предложенных программно-аппаратных средств. Система активно-адаптивного регулирования напряжения (ААРН) позволяет по результатам расчетно-измерительных процедур выбрать соответствующее ответвление устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) по фактическим

уровням напряжения в узлах распределительной сети. Такой подход к централизованному регулированию напряжения в распределительных сетях позволяет обеспечить требуемый уровень напряжения у наибольшего возможного числа потребителей благодаря прогнозированию изменения напряжения. Выполнен анализ влияния нештатной ситуации (случайного отказа оборудования) на работу системы ААРН. Определена количественная оценка влияния неисправностей на качество регулирования и выбора ответвления устройства РПН. Показано, что для бесперебойной работы системы ААРН требуются дополнительные средства диагностики, резервирования и компенсации потери данных.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, активно-адаптивное управление напряжением, ответвление РПН, анализ отказов.

This paper describes the implementation of the active adaptive control system for power grids with distributed architecture of data acquisition and processing. The advantages of the proposed control principle were compared with commonly used methods. Domestic hardware – bay controller is described. The hardware was designed to measure basic electrical parameters and create distributed systems for data collecting and processing. SCADA SONATA based on a multi-core distributed architecture with high reliability and real-time mode support is reviewed as well. The full-scale model of the active-adaptive voltage control system was created by software and hardware provided. Impact of emergencies (random failure of control equipment) during the operation of the active-adaptive voltage control system was analyzed and the effect of the fault on the regulation quality and the choice of connection OLTC (on-load tap-changer) was estimated. Active-adaptive voltage control system is 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. The usage of additional diagnostic tools, backup and data loss compensation is necessary for the smooth operation of the active-adaptive voltage control system.

Key words: distributed power grids, active-adaptive voltage control, load management, failure analysis.

Электротехника 08-2016, стр. 29-33

Мониторинг качества электрической энергии для оценки надежности работы силового оборудования и активно-адаптивного регулирования напряжения в

распределительных электрических сетях

ВАНИН А.С., ВАЛЯНСКИЙ А.В., НАСЫРОВ Р.Р., ТУЛЬСКИЙ В.Н.

В настоящее время разработаны и активно внедряются системы мониторинга качества электрической энергии и параметров режима, позволяющие получать необходимую информацию в различных узлах сети в реальном времени, а также формировать архивы данных на продолжительных интервалах времени. Наличие такой информации позволяет изменить подход к краткосрочному и долгосрочному управлению распределительными сетями. В статье описаны возможности применения информации от системы мониторинга для управления распределительными сетями на примере системы оценки надежности работы силового оборудования для планирования ремонтов и системы активно-адаптивного управления напряжением. Показаны зависимости вероятности отказа оборудования от наработки при различных типах графиков нагрузки и различном качестве электроэнергии. Сделан вывод о том, что износ основного оборудования значительно увеличивается при функционировании в условиях пониженного качества электроэнергии. Показана зависимость изменения периодичности обследования и ремонтов оборудования от наработки и условий эксплуатации. Приведено описание структуры и принципа действия системы активно-адаптивного регулирования напряжения. Для тестового примера выполнено сравнение количества нарушений по установившемуся отклонению напряжения у потребителей в распределительной сети при различных методах регулирования напряжения в центре питания. Показано, что при наличии неоднородной нагрузки в сети требуемый уровень напряжения у потребителей не может быть обеспечен методом встречного регулирования. Наличие системы мониторинга качества электроэнергии и параметров режима у потребителей позволяет реализовать систему управления, обеспечивающую требуемый уровень напряжения у наибольшего количества потребителей.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, система мониторинга, качество электрической энергии, надежность силового оборудования, регулирование напряжения.

By the present time the monitoring systems of power quality and regime parameters are developed and being intensively implemented. These systems allow to collect information about regimes and power quality in different points of grid in real time and to form long period data archives. The presence of such system allows to change the approach to short and long period control of distribution grids. The paper describes the possibility of application the information from the monitoring system to control the distribution grids on the example of the power equipment reliability assessment system and smart systems for voltage control. The paper shows

the relation between power equipment fault probability and operation time on different load profiles and level of power quality. It concludes that wear of power equipment significantly increasing when it operated in the condition of low power quality. The paper shows the relation between the frequency of maintenance and conditions of operating. The paper describes the structure and principles of operating of smart system for voltage control. The comparison of voltage deviations on the load nodes of distribution network during different methods of voltage control on the primary substation is executed. It's shown that desirable voltage level can't be achieved by opposite regulation method if the network contains heterogeneous load. The proposed system of voltage control allows to provide required voltage level on maximum load nodes.

Key words: distributed power grids, monitoring system, power quality, reliability of power equipment, voltage regulation.

Электротехника 08-2016, стр. 34-38

Инициирование молнии в грозовых облаках с использованием искусственных облаков заряженного аэрозоля

ТЕМНИКОВ А.Г., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., ОРЛОВ А.В., ЛЫСОВ Н.Ю., БЕЛОВА О.С.,
ГЕРАСТЕНОК Т.К., ЖУРАВКОВА Д.С., ГУНДАРЕВА С.В., КАЛУГИНА И.Е.

Представлены результаты экспериментального моделирования процессов инициирования молнии в грозовых облаках массивами крупных гидрометеоров с использованием искусственных облаков заряженного водного аэрозоля отрицательной и положительной полярности. Показано существенное влияние групп гидрометеоров на инициирование и распространение разряда между заряженным облаком и землей. Выявлено существенное влияние полярности облака на вероятность инициирования разряда массивами гидрометеоров. Установлено, что наиболее выраженное влияние на инициирование разряда гидрометеоры оказывают в положительно заряженных аэрозольных облаках. Определены характерные виды разрядных явлений, иницируемых гидрометеорами в облаках отрицательной и положительной полярности: облачные, канальные и диффузные разряды. Установлено, что характерные частотные диапазоны в вейвлетном спектре электромагнитного излучения таких разрядных явлений, иницируемых гидрометеорами, при отрицательной полярности облака имеют более высокие значения, чем при его положительной полярности. Найдено, что характеристики импульса тока главной стадии разряда между облаком и землей, формирующихся с участием массива гидрометеоров,

отличаются от аналогичных характеристик для случаев, когда гидрометеоры отсутствуют в промежутке между заряженным облаком и землей. Таким образом, использование искусственных облаков заряженного аэрозоля открывает новые возможности для исследования процессов инициирования молнии в грозовых облаках.

Ключевые слова: искусственное облако заряженного аэрозоля, молния, грозовое облако, группа гидрометеоров, инициирование, электромагнитное излучение, вейвлетный анализ, облачные и каналные разряды.

Results of the experimental simulation of the lightning initiation processes in thunder clouds by the large hydrometeor arrays using the artificial clouds of charged water aerosol of the negative and positive polarity have presented in the paper. Significant influence of the hydrometeor arrays on the discharge initiation and propagation between the charged cloud and the ground has presented. Significant influence of the cloud polarity on the probability of discharge initiation by the hydrometeor array has found. It has established that the hydrometeors have the most pronounced influence on the discharge initiation in the positively charged aerosol clouds. Character types of the discharge phenomena initiated by the hydrometeors in the clouds of negative and positive polarity have found: cloud discharges, channel discharges, diffuse discharges. It has established that the characteristic frequency ranges in the wavelet spectrum of electromagnetic radiation of such discharge phenomena initiated by the hydrometeors have more values for negative polarity of cloud than positive one. It has found that the characteristics of the current impulse of the main stage of discharge between the cloud and the ground forming with the participation of hydrometeors differ from the analogous characteristics for the cases when the hydrometeors absent in the gap between the charged cloud and the ground. Thus, using of the artificial clouds of charged aerosol opens the new possibilities for investigation of the processes of lightning initiation in thunder clouds.

Key words: artificial cloud of charged aerosol, lightning, thunder cloud, hydrometeors array, initiation, electromagnetic radiation, wavelet analysis, cloud and channel discharges.

Электротехника 08-2016, стр. 39-43

Перспективы применения твердой изоляции в комплектных распределительных устройствах и изоляции из сшитого полиэтилена на постоянном и переменном токе
ШУЛЬГА Р.Н., ШУЛЬГА А.Р., КОВАЛЕВ Д.И., МИРЗАБЕКЯН Г.З., ВАРИВодОВ В.Н.
Рассмотрены перспективы использования энергетических кабельных линий с изоляцией

из сшитого полиэтилена (СПЭ) и распределительных устройств с твердой изоляцией на переменном и постоянном токе. Перечислены основные разработки предприятий-изготовителей кабельной продукции, приведены основные ее характеристики. Описаны преимущества кабельных линий с изоляцией из СПЭ перед кабельными линиями с бумажно-масляной изоляцией: повышенная пропускная способность, высокая допустимая температура изоляции, меньший радиус изгиба кабеля, меньшие массогабаритные показатели, повышенный срок службы, возможность укладки при низких температурах, высокие экологические характеристики. Проанализированы мировой опыт и основные проблемы применения кабелей с изоляцией из СПЭ при постоянном токе высокого напряжения. Рассмотрены варианты выполнения изоляции и конструкции распределительных устройств 6–35 кВ различных изготовителей. Перечислены некоторые функции распределительных устройств, типовые конструкции и состав оборудования, описаны основные испытательные режимы для изоляции отдельных секций и блоков распределительных устройств. Сопоставлены различные типы твердой изоляции комплектных распределительных устройств (КРУ) среднего напряжения: с заземленным экраном на поверхности и без него. В качестве достоинств конструкции при наличии экрана отмечены: сниженные массогабаритные показатели и повышенная электробезопасность. Приведены сведения о перспективной российской разработке в области КРУ и твердой изоляции, сделаны выводы об их основных преимуществах. Предложен базовый функционал системы управления и мониторинга распределительным устройством нового поколения.

Ключевые слова: кабели, распределительное устройство, сшитый полиэтилен, твердая изоляция, объемный заряд, переменный ток, постоянный ток.

The prospects of usage of energy cables of cross-linked polyethylene and complete voltage distributive system on an alternative current and direct current with allocation of a problem elimination influence of a volume charge for direct current are considered. Listed the main achievements of manufacturing facility of cable products, there are numbers the main specifications of listed types of insulation. The main advantages of energy cables of cross-linked polyethylene over the competitors paper-in-oil are described: strong bandwidth (capacity), high permissible temperature of insulation, minimum cable bend radius, minimum weight-size parameters, increased lifetime, ability laying at low temperatures, improved environmental. Global experience and the main problems of application of cross-linked polyethylene in ultrahigh voltage cable lines on direct current are noted. Approaches to development and construction of 6–35 kV complete distributive system of various modification and appointments

are considered. Listed some functions of distribution systems, uniform designs and configuration, the main test points for insulation of different sections and blocks of distribution systems. Different types of solid insulation complete medium voltage of distribution systems are compared: insulation with/without grounded shield on the surface. In capacity of strengths availability of shield are reduced weight-size parameters and improved electrosafety. Some preliminaries long-range Russian development in the field of complete voltage distributive system and resumes about their main advances are made. The base functionality of operating system and monitoring by next generation distributive system is listed.

Key words: cables, complete voltage distributive system, cross-linked polyethylene, solid insulation, space charge, AC current, DC current.

Электротехника 08-2016, стр. 43-52

Новый подход к расчету степени очистки дымовых газов в электрофильтрах

ВЕРЕЩАГИН И.П., ХРЕНОВ С.И., СМАГИН К.А., ЧЕКАЛОВ Л.В., ТИМОФЕЕВ Е.М.

Существовавшие до последних лет методы расчета степени очистки дымовых газов в электрофильтрах в основном основывались на прямом осаждении поступающих на вход частиц золы. Только в последние годы были предприняты попытки учесть вторичные процессы, однако используемые физико-математические модели этих процессов недостаточно обоснованы. В статье представлена обобщенная модель, которая в равной степени учитывает и процессы прямого осаждения, и вторичный унос возвращенной пыли. Модель характеризуется тремя интегральными параметрами: коэффициентами прямого осаждения и осаждения возвращенных в промежуток частиц, а также коэффициентом возврата – долей возвращенных в промежуток частиц по отношению к потоку осаждения. Предложена уточненная методика расчета прямого осаждения (метод струй), позволяющая учесть разброс значений заряда частиц, связанный с турбулентным характером потока газа. Учтено также влияние турбулентности на другие параметры процесса. Коэффициент вторичного осаждения также рассчитывается по методу струй, однако должны быть учтены и особенности процесса вторичного осаждения. Наибольшие проблемы возникают при определении коэффициента возврата. Для этого предлагается использовать результаты периодических испытаний промышленных электрофильтров. Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует о том, что важную роль играет слой золы на осадительном электроде. Показано, что удельный поток частиц в бункер пропорционален массе (толщине) слоя на осадительном электроде. На основании

экспериментальных данных построены графики распределения по длине потоков осаждения, потоков в бункер, вторичного уноса и проскоков, которые используются для тестирования результатов расчетов. Предложена модель процессов в электрофильтре, которая основана на балансе материальных потоков для каждого элемента длины электрофильтра. Она отражает связь между процессами на предыдущем и рассматриваемом элементах длины. Сопоставление с экспериментальными распределениями свидетельствует о том, что модель в целом правильно отражает общий характер распределений.

Ключевые слова: электрофильтр, методика расчета, эффективность очистки, вторичный унос.

Most of existing approaches to computation of electrostatic precipitator (ESP) efficiency don't take into account particle re-entrainment from collecting electrodes. First attempts to take into consideration particle re-entrainment weren't made until recently. However, existing models of re-entrainment in ESP aren't sufficiently substantiated. A general model which takes into account precipitation of particles entered the ESP inlet (direct precipitation) as well as precipitation of re-entrained particles (secondary precipitation) is presented in the paper. The model describes physical processes in ESP using three integral parameters. These parameters are a direct precipitation coefficient, a secondary precipitation coefficient and a re-entrainment coefficient which is a ratio of re-entrained particle flux to precipitation flux. An improved technique for computation of direct precipitation that takes into account particle charge distribution function is proposed. Influence of gas flow turbulence on charge distribution function parameters as well as on other parameters of precipitation phenomena was taken into account. The technique has low computational costs. The secondary precipitation coefficient is also computed using this technique. The most difficult task is calculation of the re-entrainment coefficient. To determine the re-entrainment coefficient we suggest using data of periodical ESP testing. The analysis of experimental data indicates that fly ash layer on collecting electrodes is of paramount importance. It is shown that flux per unit length of particles falling into hoppers is proportional to weight (thickness) per unit length of fly ash layer. Distributions of precipitation flux, flux into hoppers, re-entrained particle flux along the ESP duct and particle penetration through ESP were computed using experimental data. A novel model that is based on a flux balance equation for each length element of ESP duct is presented. The model represents connection between physical phenomena that take place on two successive length elements of the collecting electrode. The model qualitatively agrees with experimental data. However, correction of the secondary precipitation coefficient and the re-entrainment coefficient is

required for quantitative agreement. In this regard a model of layer growth and determination of functional relations between layer weight, hopper flux and particle penetration play a key role.

Key words: electrostatic precipitator, modelling, particle collection efficiency, re-entrainment.

Электротехника 08-2016, стр. 52-57

Исследование ветвления катодонаправленного стримера в воздухе средствами трехмерного математического моделирования

БЕЛОГЛОВСКИЙ А.А.

Статья посвящена математическому моделированию катодонаправленного стримера в воздухе. Гипотеза о том, что к его ветвлению ведет развитие крупных электронных лавин в сильном поле перед стримерной головкой, основана на трехмерной математической модели стримерного разряда, с помощью которой проведена серия вычислительных экспериментов. Показана возможность ветвления стримера в результате его взаимодействия с двумя электронными лавинами, которые появляются перед его головкой, в стороны от направления его распространения. Реализация такого механизма ветвления обусловлена тем, что к моменту контакта со стримером лавины уже совершили лавинно-стримерный переход или близки к нему. Не столь важно, одинаково ли число электронов в этих лавинах к моменту контакта или нет. Если оно различается, ветвление будет несимметричным. Если одна из взаимодействующих со стримером лавин далека от лавинно-стримерного перехода, то она не может положить начало полноценному ветвлению, но может лишь породить слабую недоразвитую ветвь, которая в дальнейшем не развивается. Тогда траектория первичного стримера отклонится в сторону большей из взаимодействующих с ним лавин.

Ключевые слова: катодонаправленный стример, электронная лавина, лавинно-стримерный переход, ветвление, математическое моделирование.

A cathode-directed streamer branching is discussed in the paper. The streamer develops in air on normal atmosphere conditions here. This work is based on the hypotheses that the branching phenomena is initiated by large electron avalanches which are developing in a strong electric field in front of a streamer head. The author used the three-dimensional numerical model. He created this model in High Voltage Technique and Electrophysics Department of National Research University "MPEI". He carried out some numerical experiments to research streamers branching conditions. He has demonstrated that branching is possible when a streamer interacts

with two large electron avalanches in a strong electric field in front of the streamer head. This avalanches have to appear from different sides of the streamer propagation direction. The avalanches have to be near of avalanche-to-streamer transition at the moment of contact with the streamer head. This is the main condition of a streamer branching on the mechanism. It is not vary possible if electron numbers in the avalanches are different: the branching will be asymmetrical in the case. An electron avalanche can't initiate a streamer branching if it is far from avalanche-to-streamer transition. It can produce a weak branch without any progress potential. A primary streamer propagates to the side of larger avalanche in the case.

Key words: cathode-directed streamer, electron avalanche, avalanche-to-streamer transition, branching, numerical modeling.

Электротехника 08-2016, стр. 57-62

Распределение электрического и магнитного полей на открытых распределительных устройствах 110 кВ

КОВАЛЕВ Д.И., БОРИСОВ Р.К.

Представлены результаты экспериментальных исследований распределения напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых ошиновкой линейного разъединителя на открытом распределительном устройстве (ОРУ) 110 кВ. Исследования проведены непосредственно под фазными проводами малого радиуса и большой протяженности, отходящими от разъединителя. Исследование проводилось для двух линейных разъединителей ОРУ 110 кВ, находящихся на большом расстоянии друг от друга. Высота от земли до ошиновки линейного разъединителя составляла от 0,5 до 2 м. Для ошиновки линейного разъединителя, расположенной на высоте 5 м, были проведены исследования распределения напряженности магнитного поля под средней и крайними фазами. Исследования проводились на расстоянии 1 м от линейного разъединителя для высот от 0,5 до 2 м. Определены параметры устройства индикации напряженности электрических и магнитных полей. Даны рекомендации по расположению средств индикации под элементами ОРУ. Определен характер изменения напряженности электрического и магнитного полей под ошиновкой линейного разъединителя и уточнен принцип индикации электрических и магнитных полей под элементами ОРУ.

Ключевые слова: открытое распределительное устройство, линейный разъединитель, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, индикация.

The article presents the results of research of electric and magnetic fields placed under the elements of open switchgear of 110 kV. Experimental studies of the distribution of the electric and magnetic fields in the open switchgear of 110 kV, produced by busbar of linear disconnecter, were held. The studies were carried out directly under phase conductors of a small radius and a solid length, coming off from the disconnecter. The experimental study was held for two linear disconnecters, placed on the considerable distance from each other. Altitudes from the earth up to the busbar of linear disconnecter – starting from 0,5 to 2 meters. For the busbar of linear switchgear, placed on the altitude of 5 meters, there were experimental studies of magnetic field intensity both under middle and utmost phases. The studies were held at a distance of 1 meter from linear disconnecter for the altitudes from 0,5 to 2 meters. Parameters of electric and magnetic fields intensity indication device were defined. Recommendations for disposing of indication means under the elements of open switchgears were given. As a result of the studies held the change character of electric and magnetic intensity under the busbar of linear disconnecter was defined and the principle of indication of electric and magnetic fields under the elements of open switchgears was specified.

Key words: switchgear, linear disconnecter, electric field strength, magnetic field strength, indication.

Электротехника 08-2016, стр. 62-67

Экспресс-методика измерения параметров технологических электронных пучков

ЩЕРБАКОВ А.В., ГОНЧАРОВ А.Л., КОЖЕЧЕНКО А.С., ПОГРЕБИССКИЙ М.Я.,
РУБЦОВ В.П., ДРАГУНОВ В.К.

Предложена экспресс-методика прямого измерения распределения плотности тока аксиально-симметричных электронных пучков. Показано, что применение методики актуально для повышения воспроизводимости результатов электронно-лучевой обработки. Выполнен сравнительный анализ существующих методов измерения параметров электронных пучков, применяемых в технологических целях. Разработаны методика восстановления радиального распределения плотности тока электронного пучка и устройство для ее реализации. Проведен анализ результатов восстановления радиального распределения для случая, когда исходное распределение задано в виде модельной функции нормального распределения. Разработан алгоритм определения размеров расчетной области, в пределах которой осуществляется дискретизация

пространственного распределения. На основании анализа результатов экспериментальных зависимостей показано, что предложенный численный метод применим для любых типов аксиально-симметричных распределений. Проанализирована природа погрешностей, возникающих при восстановлении функций распределения, и дан прогноз развития систем экспресс-диагностики технологических электронных пучков с учетом характеристик существующей компонентной базы.

Ключевые слова: электронно-лучевая технология, измерительные устройства, система сбора данных, метод диагностики пучков частиц.

Express method of direct measurement of the current density distribution is axially symmetric electron beams is proposed. It is shown that the use of relevant techniques is useful to improve the reproducibility of the electron-beam processing results. A comparative analysis of the existing methods for measuring the parameters of technology of electron beams used for technological purposes was carried out. A method for restoring a radial distribution of the electron beam current density and device for its implementation both are developed. An analysis of the radial distribution recovery results was carried out for the case when the initial distribution is given in the form of a model function of the normal distribution. The algorithm for determining the estimated size of the region within which the spatial distribution of sampling is developed. Based on the results of the analysis of experimentally obtained dependences it is shown that the proposed numerical method is applicable to all types of axial-symmetric distributions. The nature of the errors arising from the recovery of the distributions was analyzed. The forecast of technological development of express-diagnostic systems for the processing of electron beams is given on the existing element base characteristics.

Key words: electron-beam technology, measuring devices, data acquisition system, the diagnosis method of particle beams.