

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СНИЖЕНИЕ МОЩНОСТИ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В данной статье рассмотрены проблемы распределения мощности трансграничных линий электропередач для сопряжения рынка электроэнергии. Рассмотрены пути повышения эффективности передачи электроэнергии в магистральных электрических сетях напряжением 330-750 кВ. КПД передачи снижается из-за технологических потерь в элементах электроэнергии. Основными технологическими потерями являются нагрузочные потери в элементах сети и потери на корону в проводах ВЛ. Предлагается контролировать в режиме реального времени потери нагрузки и потери мощности на венце в магистральных воздушных линиях электропередачи. Потери мощности на корону существенно зависят от погодных условий и уровня напряжения в сети. Незначительное снижение напряжения в сети во время дождя и при отложении на проводах мороза позволит значительно снизить потери электрической энергии в проводах ВЛ.

Ключевые слова: коронный разряд, критическая электрическая плотность, потери электроэнергии, оптические информационно-измерительные системы, точность управления.

Annotation. This article discusses the problems of power distribution of cross-border power lines to interface the electricity market. The ways of increasing the efficiency of electricity transmission in the main electrical networks with a voltage of 330-750 kV are considered. The transmission efficiency decreases due to technological losses in the electric power elements. The main technological losses are load losses in network elements and corona losses in overhead lines. It is proposed to monitor in real time the load losses and power losses at the crown in the main overhead power transmission lines. Corona power losses depend significantly on weather conditions and the voltage level in the network. A slight decrease in voltage in the network during rain and when frost is deposited on the wires will significantly reduce the loss of electrical energy in the wires of overhead lines of additional voltage.

Keywords: corona discharge, critical electrical density, power losses, optical information-measuring systems, control accuracy.

Введение

Казахстан взяла на себя международные обязательства по имплементации европейского законодательства и приняла Закон о введении нового рынка электроэнергии в Казахстане [1¹]. Определенные в Законе рыночные реформы в электроэнергетике могут по-разному влиять на дальнейшее развитие электроэнергетики Казахстана

Это окажет соответствующее влияние на все отрасли украинской экономики, так как допущение ошибок на каждом этапе реформ в этой сфере имеет большую цену для страны в целом.

Формирование сопряженного трансграничного рынка мощности требует решения двух основных задач. Первый – разработка метода торговли по отдельной трансграничной передаче с учетом двунаправленного обмена электроэнергией. Второй задачей является разработка метода курсового балансирования на нескольких трансграничных передачах с учетом перетопков мощности между двумя рынками, которые проходят транзитом через третий рынок.

¹ Иванов Х.А., Блинов И.В., Парус Е.В. Имитационное моделирование функционирования балансирующего рынка электроэнергии с учетом системных ограничений на параметры режима ОЭС Казахстана // Техническая электродинамика. – 2017. – №6. – С. 72–79.

Одной из важнейших и актуальных задач обеспечения работоспособности рынка «на сутки вперед» является определение методов управления трансграничными перегрузками. На сегодняшний день существует два основных подхода к решению этой проблемы. Это разделение рынка и сцепление рынка.

В настоящее время более перспективным и активно развивающимся является рыночно-сцепленный подход. Наиболее известными реализациями рыночного сцепления являются потоковое рыночное сцепление (FBC) и децентрализованное рыночное сцепление (DMC)².

Следовательно, метод рыночного сопряжения более эффективен для разработки типового метода решения проблемы управления трансграничными перегрузками.

Сформулированы требования к методу сопряжения рынка и управления перегрузками.

Основные из них:

- решение проблемы управления трансграничными перегрузками должно осуществляться методом рыночного сопряжения, т.е. общий рынок электроэнергии, предварительно разделенный на локальные зоны торгов, которые связаны между собой потенциально проблемными трансграничными соединениями;

- оценка объемов трансграничного обмена между зонами торгов и расчет клиринговых цен должны быть разделены на отдельные подзадачи;

- метод управления трансграничными перегрузками должен обеспечивать оптимизацию с помощью дискретных переменных.

Процесс рыночного сопряжения требует определения пропускной способности межсистемных (международных) электрических сетей. Это зависит от условий, ограничений

2 Проблемы расчета потерь на корону воздушных линий.

Одной из существенных проблем электроэнергетики является снижение потерь мощности и электроэнергии в единой энергосистеме. Решение этой проблемы возможно за счет оптимизации режима работы энергосистемы по уровням напряжения и потокам реактивной мощности. Для решения этой задачи необходимо разработать систему измерения режимов работы сети сверхвысокого напряжения с учетом потерь мощности на корону.

Потери электроэнергии в воздушных линиях электропередачи складываются из нагрузочных потерь, потерь на корону и потерь от токов утечки через изоляцию, определяющими являются нагрузочные потери и потери на корону, которые в разной степени зависят от уровня напряжения: нагрузочные потери при постоянном значении мощность, сопротивление, а значит, и напряжение на стороне нагрузки, обратно пропорциональны квадрату линейного напряжения, а потери в короне пропорциональны линейному напряжению в пятой степени. Таким образом, оптимальный уровень напряжения в узлах энергосистемы зависит от соотношения потерь на венец и нагрузочных потерь воздушных линий. Если в хорошую погоду нагрузочные потери преобладают над потерями на венце, то в непогоду (снег, дождь, мороз) потери на венце увеличиваются на 1-2 порядка.

Проект ВЛ. высокого и сверхвысокого напряжения определяется путем сопоставления затрат на строительство со стоимостью потерь электроэнергии в конкурирующих вариантах. Если потери энергии определены неправильно, то сечение линии может оказаться как больше, так и меньше оптимального. В случае занижения расчетных потерь электроэнергии на строительство будет предложен вариант с уменьшенными сечениями фазных проводов. В этом случае параметры ВЛ не оптимальны и при эксплуатации такой линии будут повышенные потери энергии. Поэтому получение

² Жуйков В., Пичкалов И., Бойко И., Блинов И. Ценообразование на энергетических рынках Казахстана //Электроника и нанотехнологии (ЭЛНАНО), 2015

достоверных расчетных значений потерь электроэнергии в воздушных линиях крайне важно. Если потери энергии в проводах ВЛ можно определить, зная ожидаемую нагрузку линии,

Потери мощности на корону в ВЛ зависят от параметров погодных условий, колебания которых носят случайный характер. Поскольку характеристики изменчивости потерь мощности на корону зависят от типа погоды, обычно отдельно рассматривают потери мощности на корону в хорошую погоду, хорошую погоду с повышенной влажностью, сухой и мокрый снег, туман, дождь, мороз. Поскольку повторяемость метеорологических явлений определяется периодом солнечной активности, в течение которого выпадение короны можно считать стационарным случайным процессом, характеристиками которого являются его функция распределения и корреляционная функция. Поэтому для изучения характеристик потерь на корону необходимо иметь данные непрерывных измерений параметров погоды и потерь на корону в период солнечной активности.

В настоящее время в магистральных электрических сетях используются устаревшие методы, занижающие как удельные потери мощности на корону, так и годовые потери электроэнергии на корону³. Указанные материалы создают иллюзию благоприятной ситуации с потерями в ВЛ высокого и дополнительного напряжения. На самом деле в магистральных линиях теряется большое количество электроэнергии, а максимальные потери мощности на корону потребляют ощутимую долю установленной мощности генераторов электростанций. Применение метода занижения потерь энергии на корону при проектировании новых ВЛ многократно увеличивает количество вводимых экономически неэффективных линий.

Поэтому создание системы непрерывного измерения потерь на воздушное коронное излучение является необходимой основой для оптимизации перетоков напряжения и реактивной мощности. Учет коронных потерь может иметь значительный экономический эффект в свете изменившихся принципов расчета тарифов на услуги по передаче и распределению электроэнергии, а также принятых международных программ по энергосбережению и снижению воздействия на окружающую среду при производстве и передаче электроэнергии, проведенных в последние годы.

Снижение потерь энергии при реализации концепции Smart Grid

Сегодня при развитии электрических сетей учитывается концепция Smart Grid [21,22,23], важной частью которой являются системы FACTS. На базе современной силовой электроники разработаны эффективные устройства FACTS для гибкого управления режимами энергосистем. FACTS способны одновременно воздействовать на напряжение, реактивное сопротивление и угол напряжения. Известно, что расчеты установившихся режимов энергосистем являются наиболее часто выполняемыми задачами на всех территориально-временных уровнях управления и планирования режимов. К ФАКТАМ относятся устройства, предназначенные для стабилизации напряжения, повышения устойчивости, оптимизации распределения потоков мощности, снижения потерь в электрических сетях. Одним из типичных примеров устройств FACTS являются управляемые шунтирующие реакторы (УШР), которые в энергосистемах выполняют широкий круг задач, одним из которых является увеличение пропускной способности и снижение потерь мощности. Вышеупомянутое устройство решает задачу преобразования электрической сети из пассивного элемента передачи электроэнергии в активный, что обеспечивает управление режимами работы объемной электрической сети [28-30].

Следует отметить, что изменение индуктивности управляемого шунтирующего реактора снизит величину потерь мощности, тем самым повысив эффективность защиты

³ Иванов Х., Блинов И. Парус Е. Имитационная модель нового рынка электроэнергии в Казахстане // 6-я Международная конференция IEEE по энергетическим интеллектуальным системам (ESS): 339-34, 2019

от перегрузок.

Линия электропередачи напряжения. Передача электроэнергии по линиям электропередачи высших классов напряжения сталкивается с рядом серьезных технических проблем. Одной из таких проблем является снижение КПД при передаче малой мощности. Показано, что в высоковольтных линиях электропередачи с управляемыми и неуправляемыми шунтирующими реакторами можно значительно повысить эффективность передачи электроэнергии в режимах нагрузки меньшей собственной мощности.

$$I^2 \times R = 1002 \times 1 = 10000W = 10kW$$

где R - активное сопротивление, X - индуктивное сопротивление, Ом; G - активная проводимость, См; B - реактивная проводимость.

Эффективность применения такого устройства ФАКТС, как управляемый шунтирующий реактор показано на рис. 1. Как видим, значения потерь активной мощности варьируются в широких пределах.

В зависимости от значения индуктивности управляемых шунтирующих реакторов. Следует отметить, что в (1) общие потери состоят из технологических и коронных потерь. В случае применения управляемых шунтирующих реакторов происходит снижение технологических потерь и, следовательно, общих потерь. При плавном управлении управляемыми шунтирующими реакторами необходимо найти значение индуктивности управляемого шунтирующего реактора, при котором суммарные потери будут минимальными.

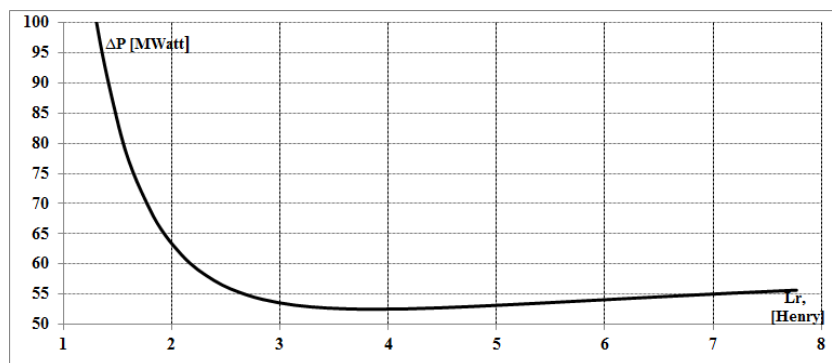


Рисунок 1

Требования к измерительной системе для измерения параметров коронного разряда

Натяжение является важной фундаментальной силовой характеристикой ВП [42]. В отличие от других электрических величин, напряженность низкочастотных электромагнитов не подтверждается ни методами, ни измерительными приборами. В связи с этим средства измерения напряженности низкочастотных электронных устройств выпали из номенклатуры приборов для измерения электрических величин⁴. Такая ситуация особенно типична для измерительных приборов электроприводов промышленной частоты на поверхности высоковольтных изоляторов и вблизи линий электропередач.

Алгоритм измерения потерь мощности на крон основан на использовании телеметрической информации о параметрах работы линии, выдаваемой системой. По

⁴ Блинов Игорь, Танкевич Сергей. Гармонизированная ролевая модель рынка электроэнергии в Украине. Интеллектуальные энергетические и энергетические системы (IEPS), 2016 2-я Международная конференция по. 2016. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521861

алгоритму расчета использованы значения текущих потерь мощности, которые определяются путем вычитания активной мощности P_2 на ее конце из активной мощности P_1 , поступающей в линию на ее конце, и это компенсирует систематическую и случайную погрешность измерения потерь.

Для реализации алгоритма измерения необходимо было решить следующие задачи:

1. Рассмотрение составляющих потерь электроэнергии в ЭЭС и существующих методов их расчета.

2. Анализ чувствительности метода при измерении малых значений потерь электроэнергии на корону (при повышенной влажности) и в проводах в режиме реального времени.

3. Исследование методических и инструментальных погрешностей заложенных в программный комплекс алгоритмов определения нагрузочных потерь и потерь кроны в режиме реального времени.

4. Анализ влияния снижения потерь электроэнергии на корону и в проводах ЛЭП при регулировании напряжения по данным о текущих значениях потерь электроэнергии.

5. Определение максимального диапазона регулирования напряжения и возможного эффекта от экономии потерь мощности на блоке 500, 750 кВ.

Рассмотренный алгоритм используется в программном комплексе измерительных систем, предназначенном для оценки активной, реактивной мощности, напряжений и линейных потерь, и позволяет оперативно отслеживать уровень коронных потерь для оперативного принятия мер по их снижению. Измерительные системы также предназначены для:

- определение класса потерь мощности коронного разряда в линиях электропередачи;

- выбор диагностических сигналов, доступных для измерения, и контрольных точек на исследуемом объекте;

- разработка математической модели объекта диагностики, анализ которой позволяет обосновать возможные параметры диагностики;

- разработка алгоритмов получения числовых значений выбранных диагностических параметров;

- построение решающих правил выявления и классификации дефектов; создание средств, реализующих определенные этапы диагностического процесса по выбранным измерительным и диагностическим сигналам до принятия диагностических решений.

Программное обеспечение системы (модуль первичной обработки данных) состоит из следующих частей: ПО обработки данных модуля измерения, модуль настройки микроконтроллера информационно-измерительного канала, модуль первичной обработки данных. Для системы управления сбором, обработкой и анализом данных используется специально разработанное программное обеспечение. Данное программное обеспечение предназначено для управления работой первичных датчиков систем измерения потерь мощности коронного разряда, для организации других программно-аппаратных модулей, для реализации первичных процессов, сбора и передачи данных от преобразователей к проектируемым устройствам для вторичная обработка, для статистического анализа данных, хранения и отображения контрольных данных в удобном для оператора виде.

Для операций расчета величины потерь мощности коронного разряда используется специальное программное решение. В свою очередь, полученные при работе модуля математической обработки и модуля автоматического контроля состояния узла электрооборудования передаются в модуль организации хранения данных для управления базой данных на основе истории измерений. В этом случае возможно создание баз знаний с диагностическими признаками, которые зависят от значения физического параметра, т.е. контроля определенного состояния энергетического оборудования.

На рис. 2 и рис. 3 показаны емкость и напряженность электрического поля коронного разряда.

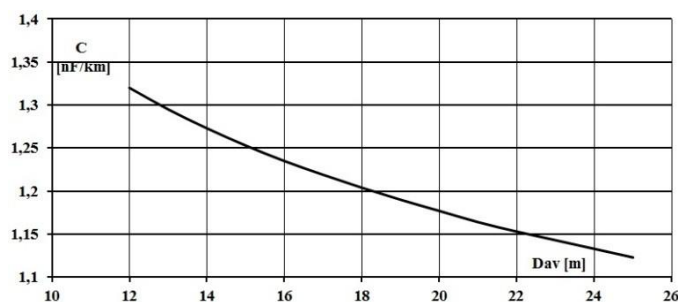


Рис. 2. Емкость и напряженность электрического поля коронного разряда.

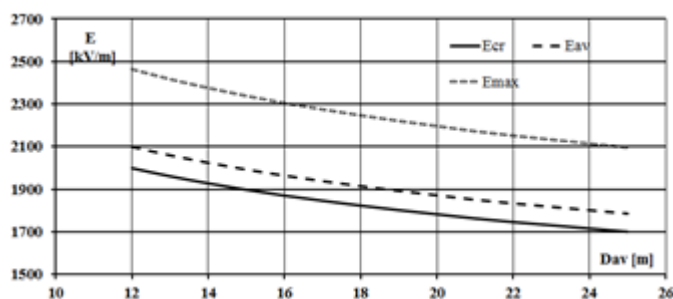


Рис. 3. Емкость и напряженность электрического поля коронного разряда.

Информационно-измерительные системы энергетических потерь с оптическими чувствительными элементами

Проблема бесконтактных измерений напряженности электрического поля весьма актуальна. Такие измерения необходимы для дистанционного контроля потерь в воздушных линиях электропередач, в том числе таких параметров линий электропередачи, как разряд на корону.

При этом средства потерь при разряде воздушных линий электропередач находятся в достаточно жесткой среде эксплуатации, которая характеризуется значительной напряженностью электромагнитных полей, высокой температурой и влажностью, а также содержанием озона.

В этом случае актуальной задачей является повышение помехозащищенности средств контроля и измерения потерь в воздушных линиях электропередачи. Решение этой задачи с применением рассмотренных выше традиционных конструкций сегодня требует применения сложной измерительной аппаратуры непосредственно на линии передачи, поэтому возникает необходимость реализации измерительных преобразователей с применением принципиально новых решений, методов и методов построения⁵.

Перспективным способом построения измерительной системы является использование оптической измерительной системы (ОМ). Эта система, обычно состоящая из оптического чувствительного элемента для измерения и блока анализатора параметров линии, совершенно инертна к воздействию полей внутренней среды мощных генераторов, хотя и имеет более высокую стоимость средств, размещаемых в ней. «безопасная зона», где нет влияния рабочей среды линии электропередачи.

⁵ Кириленко О.В., Блинов И.В., Парус Е.В. , Иванов Х.А. Имитационная модель рынка на сутки вперед с неявным учетом сетевых ограничений энергосистем // Техн. электродинамика. – 2019. – №5. – С. 60–67.

Так, в данном случае одним из необходимых условий является то, чтобы оптический чувствительный элемент или первичный преобразователь датчика вносил минимум искажений в структуру распределения поля, быть пассивными (не требующими наличия источника питания в зоне измерений), миниатюрными и обеспечивать гальванический разряд между зоной измерений и оборудованием. Этим условиям удовлетворяют волоконно-оптические датчики (ВОС⁶) на основе линейного электрооптического эффекта Поггеля. При этом в качестве чувствительных элементов могут быть использованы сегнетоэлектрические кристаллы класса 3м.

На рис. 4 представлена блок-схема конструкции системы измерения потерь мощности коронного разряда с сетью оптических датчиков в линиях передачи высоковольтных и сверхвысоковольтных линий электропередачи. Принцип работы оптических измерительных систем основан на электрооптической модуляции световой волны за счет преобразования линейно поляризованного света в эллиптически поляризованный. В этом случае используется продольный эффект Поггеля, когда электрическое поле направлено внутрь кристалла вдоль оси, параллельной направлению распространения света.

Для определения функции преобразования одного оптического датчика (рис. 5) из системы оптической сенсорной сети рассмотрим простейший случай использования указанной конструкции волоконно-оптических измерителей с амплитудной модуляцией информационного сигнала.

Для оценки величины K необходимо определить мощность светового излучения полупроводникового лазера F , который на выходе сегнетоэлектрического кристалла поступает на конец оптоволоконного пучка с диаметром сердцевины одного волокна $2a$, можно определить следующим выражением:

где L_1 – расстояние до контролируемого объекта; χ – коэффициент пропускания светового излучения, который зависит от мощности венца; ΣSOF – суммарная площадь освещаемых концов приемного кабеля волокон; $2a = 25-100$ мкм – диаметр сердцевины волокна; Φ – световой поток на выходе из кристалла.

Выражение (3) справедливо, если угловой размер лазерного пятна на выходе из кристалла меньше угла обзора приемного устройства.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Х.А., Блинов И.В., Парус Е.В. Имитационное моделирование функционирования балансирующего рынка электроэнергии с учетом системных ограничений на параметры режима ОЭС Казахстана // Техническая электродинамика. – 2017. – №6. – С. 72–79.
2. Жуйков В., Пичкалов И., Бойко И., Блинов И. Ценообразование на энергетических рынках Казахстана // Электроника и нанотехнологии (ЭЛНАНО), 2015
3. Иванов Х., Блинов И., Парус Е. Имитационная модель нового рынка электроэнергии в Казахстане // 6-я Международная конференция IEEE по энергетическим интеллектуальным системам (ESS): 339-34, 2019
4. Блинов Игорь, Танкевич Сергей. Гармонизированная ролевая модель рынка электроэнергии в Украине. Интеллектуальные энергетические и энергетические системы (IEPS), 2016 2-я Международная конференция по. 2016. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521861.
5. Кириленко О.В., Блинов И.В., Парус Е.В., Иванов Х.А. Имитационная модель рынка на сутки вперед с неявным учетом сетевых ограничений энергосистем // Техн. электродинамика. – 2019. – №5. – С. 60–67.
6. Блинов И.В. Новый подход к управлению перегрузками для децентрализованной

⁶ Блинов И.В. Новый подход к управлению перегрузками для децентрализованной рыночной связи с использованием кривых чистого экспорта // CIGRE Session 46 Paris 2016. Water and Energy International – 2018. – Том 61. Вып. 5. – С. 76

рыночной связи с использованием кривых чистого экспорта // CIGRE Session 46 Paris 2016. Water and Energy International– 2018. – Том 61. Вып. 5. – С. 76.