

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.051.24+621.311.16

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ АВТОМАТИКИ НА ВЕДЕНИЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
КРУПНОГО ГОРОДА РОССИИ***А.С. Дюндин, К.Б. Корнеев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Дюндин А.С., Корнеев К.Б., 2024

Аннотация. В статье представлены результаты расчета влияния установки автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН) на ведение электроэнергетического режима работы энергосистемы крупного города, имеющего дефицит мощности собственных электростанций. Обоснованы места расположения и необходимость установки АОСН. Приведены примеры расчета электроэнергетического режима работы энергосистемы города.

Ключевые слова: контролируемое сечение, максимально допустимый переток, аварийное отключение, электроэнергетический режим.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-32-38

Основу обеспечения надежного диспетчерского управления и выполнения основных задач планирования электроэнергетических режимов на всех этапах составляет определение области допустимых параметров электроэнергетического режима энергосистемы.

Одним из главных инструментов анализа статической аperiodической устойчивости энергосистемы является анализ перетоков мощности по линиям электропередачи в сечениях. Под сечением понимается совокупность электросетевых элементов (трансформаторов, линий электропередачи), осуществляющих связь двух частей энергосистемы между собой или электростанции с энергосистемой [5]. Сечением может выступать как одиночная линия электропередачи, так и группа линий и трансформаторов.

Поиск «опасных» сечений (так называемое «бутылочное горлышко») предлагается производить путем расчетного утяжеления режима в соответствии с выбранными траекториями развития электроэнергетического режима.

На практике расчеты по определению предельных по статической аperiodической устойчивости энергосистемы и поиск области допустимых электроэнергетических режимов в целом выполняются на компьютере в специализированных программных средствах.

Для того чтобы обеспечить надежный и эффективный процесс передачи мощности по электрическим сетям, отслеживаются перетоки активной мощности в контролируемых сечениях. В сечениях электрической сети определяются величины максимально

допустимых перетоков активной мощности (МДП), соблюдение которых должно обеспечиваться на всех этапах планирования и управления электрическим режимом. Расчет максимально допустимых перетоков представляет собой трудоемкую задачу, так как необходимо учесть множество факторов (топологию прилегающей сети, состав и загрузку генерирующего оборудования, состояние и настройку устройств противоаварийной автоматики, температуру окружающей среды и др.), влияющих на величину допустимых перетоков. Для того чтобы учесть все факторы, необходимо выполнять расчет максимально допустимых перетоков в режиме реального времени в темпе изменения условий работы энергосистемы [2].

В настоящее время в условиях широкомасштабного внедрения информационных технологий стало возможным определение МДП в цикле обработки телеметрии. Точное и соответствующее текущей режимной ситуации в энергосистеме определение МДП позволяет максимально полно использовать пропускную способность существующих линий электропередачи при выполнении требований нормативной документации к надежности электроснабжения потребителей.

В диспетчерских центрах АО «Системный оператор Единой энергетической системы» в цикле расчета МДП выполняется:

- расчет параметров установившегося режима (УР);
- утяжеление полученного УР для определения предельного перетока по статической устойчивости для заданных контролируемых сечений;
- определение перетоков в контролируемых сечениях, соответствующих нормативным запасам по статической аperiodической устойчивости [8, 9].

В связи с постепенным увеличением износа основных фондов электроэнергетики, а также по причине сложной геополитической ситуации в 2023 году исследование выполнялось на основе укрупненной модели энергосистемы города европейской части России, в которой присутствует единое городское кольцо на высоком напряжении, одна или две узловые подстанции, обеспечивающие связь данного городского кольца и нескольких центров питания, обеспечивающих поступление электроэнергии на напряжении 220–500 кВ. Кроме того, в модели города имеется несколько радиальных и кольцевых элементов на напряжении 35–110 кВ.

Как правило, для областей европейской части России характерно наличие одной или нескольких магистральных линий электропередач на напряжении 500 или 750 кВ (рис. 1). Кроме того, для областных центров и крупных промышленных городов, как правило, подходят линии напряжением 220–330 кВ [3]. При этом для городов, расположенных на равнинной части страны без больших рек, формирующих значительный пространственный разрыв между частями города, характерно наличие замкнутого городского кольца электроснабжения. Для городов, стоящих на крупных реках (это в первую очередь города Поволжья), характерно наличие полукольца электроснабжения, так как строительство линии электропередач вдоль берега реки сопряжено как с необходимостью прохода через историческую городскую застройку, так и с трудностями, связанными с размещением опор линий электропередачи в затопляемой пойме [1, 7].

Высоковольтные линии 220–330 кВ входят в транзит соответствующего напряжения, проходящий по территории области и соединяющий между собой энергосистемы соседних областей и регионов [6]. Переток мощности по такому транзиту направлен преимущественно в сторону энергодефицитных областей и районов. По этим линиям подключены городские узловые линии, предназначенные для электроснабжения

городов. Было установлено, что городские центры питания (внутригородские электростанции) не могут в полной мере покрыть потребности города. Для многих крупных городов характерно достаточно близкое (не далее 100 км) расположение больших электростанций – АЭС, ГРЭС или ГЭС. Такая станция выступает крупным энергоузлом, питающим как сам город, так и прилегающие к нему районы, собственная генерация которых (без учета указанных больших электростанций) незначительна. При этом потребление этих районов составляет ориентировочно от 120 % летом до 250 % зимой от собственной генерации районов и города. Таким образом, указанные районы являются дефицитными; примерно половина их нагрузки покрывается за счет внешнего перетока по узловой подстанции. При отключении линии, питающей такую узловую подстанцию от расположенного рядом центра питания, электроснабжение города будет осуществляться по второй линии, так как энергосистеме страны присуще наличие кольцевых схем. Тем не менее такое изменение питания сопряжено с некоторыми сложностями в управлении новым режимом энергосистемы. Однако в этом случае при наложении аварийного отключения одной или двух линий 220–330 кВ, подходящих к узловой подстанции, на ремонт двух или одной других линий 220–330 кВ возможна потеря питания на шинах распределительного устройства данной подстанции.



Рис. 1. Карта европейской части России с нанесенными на нее линиями напряжением 750 кВ (синие) и 500 кВ (красные). По данным сайта «Схемы ЛЭП и электроснабжения России» (<https://frexosm.ru/power/>)

В данной ситуации произойдет недопустимое снижение напряжения в обширном районе городской электросети 110 кВ, прилегающей к узловой подстанции. Таким

образом, необходимо принимать меры для обеспечения допустимости параметров такого послеаварийного режима.

С этой целью потребуется организация контролируемого сечения (КС) городской электросети. Контроль перетока в сечении осуществляется исключительно в случае питания распределительного устройства узловой подстанции только по одной из линий 220–330 кВ.

В состав такого КС войдут элементы, ограничивающие район сети 110 кВ с пониженными уровнями напряжения в послеаварийном режиме, а именно:

автотрансформаторы или силовые трансформаторы, расположенные непосредственно на узловой подстанции;

воздушная линия, отходящая от узловой подстанции в сторону по часовой стрелке обхода городского кольца;

воздушная линия, отходящая от узловой подстанции в сторону против часовой стрелки обхода городского кольца;

воздушная линия (или линии), ведущая к наиболее ответственным и мощным потребителям, не входящим в городское кольцо;

воздушные линии, соединяющие рассматриваемый район расположения крупного города и соседних районов, не подключенных к исследуемой городской узловой подстанции;

проходящие по исследуемой области воздушные линии на напряжении 110 кВ, предназначенные для связи с магистральными линиями другого напряжения и не имеющие связи с питающими линиями, выход которых из строя рассматривается в данном исследовании.

Расчетные условия. Под расчетными условиями понимается набор характерных схемно-режимных ситуаций, а именно состав включенного оборудования: генераторов городских источников электроэнергии (ТЭС и/или ТЭЦ) и батарей статических конденсаторов (БСК). При проведении предварительных расчетов выявлено, что наибольшее влияние на величину МДП в модели КС оказывают генераторы наиболее мощных ТЭС и ТЭЦ, а также БСК, расположенные на смежных подстанциях, не имеющих прямых связей с отключаемой узловой подстанцией. Таблицы расчетных условий получаются в результате перебора всех возможных комбинаций состояния данного оборудования. Величины МДП и аварийно допустимого перетока для каждого случая будут свои, особенно с учетом изменяющихся режимов потребления (по суточному графику нагрузки, по дням недели и по сезону).

Расчет допустимых перетоков должен осуществляться в соответствии с методикой, изложенной в [4]. При этом величина МДП должна удовлетворять сразу нескольким критериям. В рассматриваемом примере определяющим критерием для контролируемого сечения является обеспечение 10%-го запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки в послеаварийном режиме. При расчетах МДП напряжение в контрольном пункте на шинах напряжения городского кольца узловой подстанции 110 кВ может заметно снизиться и составить для аварийного режима величину в 92 кВ, что является недопустимым с учетом возможного диапазона регулирования напряжения на трансформаторах подстанций, входящих в городское кольцо.

Для предотвращения развития такой ситуации предлагается установить автоматику ограничения снижения напряжения (АОСН) на узловой подстанции крупного города для увеличения МДП, от действия которой должны отключаться выключатели линий,

питающих больших единичных потребителей (как правило, это отдельные заводы с категорией надежности электроснабжения не выше II) со стороны узловой подстанции, а также линий, питающих внутригородские подстанции со стороны городских ТЭС и ТЭЦ. При этом величина МДП в КС увеличится на объем нагрузки, отключаемой от действия АОСН, который суммарно составляет до 25 % от городского энергопотребления. В качестве уставки по напряжению принято аварийно допустимое напряжение на шинах 110 кВ узловой подстанции, составляющее 98 кВ.

Данная мера позволит предотвратить каскадное отключение воздушных линий, питающих прилегающие к узловой подстанции энергорайоны, вызванное срабатыванием автоматики ограничения перегрузки оборудования, устанавливаемой на этих линиях, и, как следствие, предотвратить полное обесточение города и прилегающих районов.

Полученные результаты можно использовать при планировании электроэнергетического режима и при управлении им, что повысит надежность электроснабжения потребителей областей европейской части России [10].

Обратное включение отключенных потребителей будет возможно после включения в работу любой линии, питающих узловую подстанцию, либо после замещения объема отключенных от АОСН потребителей вводом графиков временного отключения потребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минэнерго России от 28.02.2023 № 108 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2023–2028 годы». URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/24125/204377> (дата обращения: 04.11.2023).
2. Об утверждении Правил вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации, а также о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросу совершенствования порядка вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации: постановление Правительства РФ от 30 января 2021 г. № 86. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573476473> (дата обращения: 30.10.2023).
3. Инструкция по проектированию городских электрических сетей РД 34.20.185-94. М.: Энергоатомиздат, 1995. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004921> (дата обращения: 30.10.2023).
4. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 40–50.
5. Ерошенко С.А., Егоров А.О., Самойленко В.О., Хальясмаа А.И. Расчеты допустимых перетоков мощности в энергосистемах. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2017. 86 с.
6. Высокоскоростные магистрали. Земельно-имущественный комплекс // Российские железные дороги (РЖД). URL: <http://www.hsrail.ru/Projects-vsm/ZIO/> (дата обращения: 04.11.2023).
7. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Приложение 1 к решению Совета директоров ПАО «Россети» (протокол заседания от 02.04.2021 № 450). URL: https://rosseti-lenenergo.ru/upload/_about/tehniceskay_politika/Положение%20о%20ЕТП.pdf (дата обращения: 04.11.2023).

8. СТО 59012820.27.010.002-2020. Правила перехода на работу в вынужденном режиме (с изменениями на 7 июля 2023 г.). URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st_forced_2023.pdf (дата обращения: 04.11.2023).
9. Методические указания по устойчивости энергосистем (утверждены приказом Минэнерго России от 3 августа 2018 г. № 630). 15 с.
10. Степанов А.А., Осеи-Овусу Р. Перспективное планирование развития электроэнергетического сектора // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 48–56.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЮНДИН Андрей Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ddrey86@rambler.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: energy-tver@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Дюндин А.С., Корнеев К.Б. Анализ влияния работы автоматики на ведение электроэнергетического режима работы энергосистемы крупного города России // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 1 (21). С. 32–38.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE AUTOMATION ON THE MAINTENANCE OF THE ELECTRIC POWER MODE OF OPERATION OF THE POWER SYSTEM OF A LARGE RUSSIAN CITY

A.S. Dyundin, K.B. Korneev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article describes the results of calculating the impact of the installation of voltage reduction limitation automation on the maintenance of the electric power mode of operation of the power system of a city with a shortage of its own power plants. The locations and the need to install voltage reduction limitation automation are justified. Examples of calculating the electric power mode of operation of the city's power system are given.

Keywords: controlled cross-section, maximum allowable overflow, emergency shutdown, electric power mode.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

DYUNDIN Andrey Sergeevich – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ddrey86@rambler.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Dyundin A.S., Korneev K.B. Analysis of the effect of the automation of voltage reduction limitation on the maintenance of the electric power mode of operation of the power system of a large Russian city // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 32–38.

УДК 537.523

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ОЗОНАТОРА

Д.В. Максудов

Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа)

© Максудов Д.В., 2024

Аннотация. Разработана математическая модель физических процессов, протекающих в озонаторе, а также представлены результаты численных расчетов, выполненных при реализации указанной модели при помощи программного пакета Scilab. Для верификации результатов численных экспериментов проведены натурные экспериментальные исследования зависимости концентрации озона от времени.

Ключевые слова: озонатор, газоразрядные процессы, численные методы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-38-45

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается значительный интерес исследователей к вопросам получения и применения озона. Высокая окислительная способность данной модификации кислорода делает привлекательной ее использование в различных областях человеческой деятельности, в том числе в нефтегазовой, химической и пищевой промышленности, в санитарии и медицине, а также для очистки воды, воздуха и выхлопных газов.

Как показывают экспериментальные исследования, эффективность образования озона зависит от различных факторов: амплитуды питающего напряжения [1]; плотности мощности барьерного разряда [2, 3]; температуры, давления, состава газа и скорости его потока [2–5]; формы электродов и диэлектрического барьера [7, 8]. При этом многие из этих параметров являются взаимозависимыми, что усложняет моделирование.

Таким образом, существенную проблему представляет необходимость разработки модели физических процессов в озонаторе, учитывающей большое количество взаимозависимых параметров, таких как температура, концентрация озона, мощность барьерного разряда и ряд других, что необходимо для решения задачи оптимизации