

На правах рукописи



Петров Вячеслав Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРЕДЕЛАХ ЗАДАННОЙ ПРОПУСКНОЙ
СПОСОБНОСТИ СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель — доктор технических наук, доцент
Полищук Владимир Иосифович

Официальные оппоненты: **Русина Анастасия Георгиевна**,
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Электрические станции», заведующий кафедрой

Беляевский Роман Владимирович,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», институт энергетики, кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий, доцент

Ведущая организация — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 18 сентября 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660049, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан ___ ___ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Несмотря на большую степень разработки вопросов планирования и управления электроэнергетическими режимами системные аварии, связанные с недопустимыми перегрузками сетевых элементов, все еще возникают как в отечественной в энергетике, так и за рубежом. Регулярно в электро-энергетических системах по всему миру происходят различные процессы, способные привести к недопустимой перегрузке межсистемных сетевых элементов, что накладывает существенные ограничения на их пропускную способность. Это влечет за собой угрозу возникновения аварийных ситуаций, а также значительные финансовые убытки и социальные последствия. В то же время постоянное наращивание генерирующих и потребляющих мощностей, сопровождающее все развивающиеся экономики, приводит к кратному росту загрузки электрических сетей, развитие которых зачастую производится далеко не в первую очередь. Электрические сети находятся в условиях постоянно снижающихся резервов пропускной способности при одновременном росте требований к качеству электроснабжения потребителей.

Для обеспечения бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией заданного качества персоналом сетевых организаций решается ряд задач управления транспортом электроэнергии, к которым принадлежит задача предупреждения и ликвидации перегрузок сетевых элементов как в отдельности, так и в составе сечения. Залогом успешного ее решения является постоянное развитие и совершенствование методов и методик планирования и оперативного управления режимами энергосистем.

Несмотря на обширные исследования, методики оперативного управления, основанные на регулирующем эффекте нагрузки по напряжению (РЭНН), персоналом сетевых организаций не используются, что связано как с несовершенством самих методик, так и с общепринятой стратегией оперативного управления.

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что совершенствование методик оперативного управления электроэнергетическими режимами, позволяющих снизить объемы вынужденных погашений потребителей, безусловно, является актуальным для российской энергетики.

Степень разработанности проблемы. Большой вклад в проработку данных вопросов внесли многие ученые, среди которых – Аюев Б. И., Веников В. А., Идельчик В. И., Файницкий О. В., Хозяинов М. А., Пономаренко И. С., Панасецкий Д. А., Фролов О. В., Илюшин П. В., Денисов В. В., Сатанин В. В., Батраков Р. В., Воронин В. А., Андреев А. В., Наровлянский В. Г., Mazi A. A., Makram E. B., Bakirtzis A. J., Sakis Meliopoulos A. P. и др. Их работы содержат исследования по формированию новых и совершенствованию текущих концепций, методов и методик управления электрическими режимами энергосистем, основанными на использовании устройств FACTS (Flexible AC Transmission System), применении различных оптимиза-

ционных алгоритмов, а также привлечении потребителей к решению задач оперативного управления. При этом РЭНН затрагивается слабо либо вовсе не принимается во внимание. В то же время крупными иностранными сетевыми организациями, такими как Hydro-Quebec, Northwest Energy Efficiency Alliance (NEEA), BC Hydro, ESB Networks, Electricity North West Limited, производятся исследования возможности использования Conservation Voltage Reduction (CVR), основанного на статических характеристиках нагрузки (СХН). Однако данные работы не поднимают вопрос использования РЭНН в практике оперативного управления режимами энергосистем, что увеличивает значимость и актуальность работ, посвященных данной задаче.

Объектом исследования являются электроэнергетические системы, связанные между собой с помощью межсистемных сетевых элементов.

Предметом исследования выступают методики снижения недопустимых перегрузок межсистемных элементов.

Целью настоящей работы является совершенствование методик оперативного управления электроэнергетическими режимами, позволяющих снизить или полностью избежать ввода графиков ограничений электроснабжения.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ методик оперативного управления режимами энергосистем и оценка возможности использования регулирующего эффекта нагрузки по напряжению, обусловленного их статическими характеристиками.

2. Создание алгоритмов оптимизации значений напряжений в узлах рассматриваемой части электроэнергетической системы по критерию минимума отклонения токовой загрузки межсистемного элемента и критерию минимума отклонения сальдо-перетока активной мощности межсистемного элемента от заданных значений.

3. Совершенствование методик оперативного управления токовой загрузкой и сальдо-перетоком активной мощности межсистемного элемента.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлены и оценены характерные особенности регулирующего эффекта нагрузки, предоставляющие возможность практического использования статических характеристик нагрузки в оперативном управлении электрическими режимами энергосистем.

2. Созданы алгоритмы, позволяющие в допустимых диапазонах получить значения напряжения в узле-генераторе и коэффициента трансформации системообразующей подстанции, при которых будет достигаться требуемая разгрузка межсистемной связи.

3. Усовершенствованы методики оперативного управления электрическими режимами энергосистем, позволяющие решить задачу оперативной разгрузки межсистемной связи за счет использования регулирующего эффекта нагрузки по напряжению, не прибегая к вводу графиков ограничения электроснабжения.

Практическая значимость. Получены методики, которые можно применять в практике оперативного управления электрическими режимами энергосистем.

Методология и методы исследования. Математическое и компьютерное моделирование, статистический анализ. Моделирование электроэнергетических систем производилось в программных комплексах Mathcad и RastrWin. Расчеты установившихся электрических режимов производились с помощью систем алгебраических уравнений в соответствии с известной теорией и общепринятыми методами расчета электрических режимов и решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные особенности оперативного управления режимами энергосистем и статических характеристик нагрузки, подтверждающие техническую возможность использования регулирующего эффекта нагрузки по напряжению.

2. Алгоритмы оптимизации значения напряжения в узле-генераторе и коэффициента трансформации системосвязующей подстанции по критерию минимума отклонения токовой загрузки межсистемного элемента и критерию минимума отклонения сальдо-перетока активной мощности межсистемного элемента от заданных значений.

3. Методики оперативного управления токовой загрузкой и сальдо-перетоком активной мощности элемента сечения.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата, теории электротехники, теории расчетов электрических режимов, программных комплексов и согласованием результатов вычислений в программном комплексе Mathcad с расчетами в сертифицированном программно-вычислительном комплексе RastrWin, используемом сетевыми организациями в практике планирования и управления электрическими режимами.

Реализация результатов работы. Результаты исследований были использованы в рабочем процессе АО «СО ЕЭС», а также в учебном процессе электротехнического факультета Самарского государственного технического университета. Акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы приведены в приложениях.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на V Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2014» (г. Томск); на X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», 2015 г. (г. Казань); на VI Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2015» (г. Иваново); на X Открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», 2015 г. (г. Казань); на VII Международной молодежной научно-технической конференции

«Электроэнергетика глазами молодежи – 2016» (г. Казань); на VIII Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017» (г. Самара).

Личный вклад автора. Все основные положения диссертации разработаны автором лично. Автору принадлежат методика, основные решения и научное редактирование изданий полностью. В публикациях, выполненных в соавторстве, личный вклад оценивается на уровне 75 %.

Публикации. Содержание диссертации нашло отражение в 13 работах, в том числе трех статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, двух статьях в профильных журналах, восьми докладах на международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов и заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста. Содержит 26 рисунков, 45 таблиц, список использованных источников из 85 наименований и пять приложений на 14 страницах, которые содержат материалы, относящиеся к практической реализации.

Благодарности. Автор благодарит старшего диспетчера ОДС филиала АО «СО ЭЭС» – Самарское РДУ к.т.н. Альмендеева Андрея Аркадьевича за неоценимую информационную поддержку, оказанную в процессе подготовки диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и цель работы. Отражена ее научная новизна и практическая ценность. Указаны методы исследований и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы задачи и методики оперативного управления режимами крупных электроэнергетических систем. Показано, что несмотря на множество различных инструментов, используемых диспетчером при ликвидации недопустимых перегрузок сетевых элементов, поиск новых методов разгрузки является актуальной задачей.

Изучение крупных аварий XX и XXI века обнаружило недостаточную проработанность методов ликвидации в вопросах учета известных свойств электрооборудования, ввиду чего эффективность управления электроэнергетической системой оказывается ниже, чем она могла бы быть.

Анализ отечественных и зарубежных исследований в области планирования и управления утяжеленными режимами и ликвидации аварийных ситуаций выявил недостаточную разработанность методов управления энергосистемами, использующих РЭНН, несмотря на результаты исследований СХН, показывающие значительную корреляцию между изменением напряжения на шинах нагрузки и ее электропотреблением. Объекты исследований сторонних авторов ограничиваются маломасштабными электрическими сетями (конкретные предприятия, подстанционные объекты, сельские сети) и не затрагивают вопроса оперативного управления электрическим режимом энергосистемы в целом.

Во второй главе диссертационной работы представлены СХН и обусловленный ими РЭНН. Показано, что особый интерес с точки зрения управления электрическими режимами представляет регулирующий эффект по напряжению (далее РЭНН) для активной и реактивной мощности, который характеризует изменение потребления при малых отклонениях напряжения.

Выявлено, что РЭНН сильно различается для разного типа электроприемников. Ввиду этого СХН комплексного узла нагрузки представляются в виде полиномов второй степени, позволяющих с достаточной достоверностью учесть РЭНН потребителей, входящих в состав узла. Для разных комплексных узлов нагрузки значения коэффициентов полиномов могут сильно различаться. В настоящее время персоналом системного оператора при отсутствии уточненных данных о составе узла нагрузки используются полиномы со следующими коэффициентами (рис. 1):

$$P(U) = P_{ном} \left[0,83 - 0,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + 0,47 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_{ном} \left[3,7 - 7 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + 4,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность нагрузки; $P(U)$ – расчетная активная мощность нагрузки; $Q_{ном}$ – номинальная реактивная мощность нагрузки; $Q(U)$ – расчетная реактивная мощность нагрузки; $U_{ном}$ – номинальное напряжение узла; U – расчетное напряжение в узле.

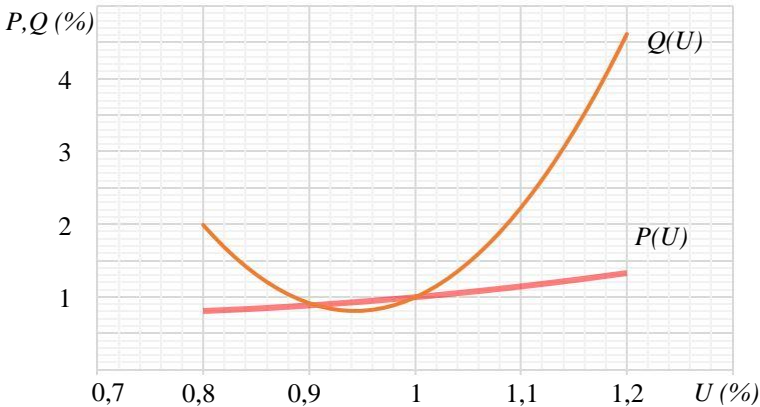


Рис. 1. СХН по напряжению комплексного узла нагрузки

Как видно из рис. 1, на интервале значений напряжения $\pm 15\% U_{ном}$ СХН характеризуются пологой зависимостью и отсутствуют резкие изменения режима потребления, что позволяет использовать РЭНН с целью снижения не-

допустимой перегрузки межсистемных элементов.

Если РЭНН $k_P, k_Q > 0$, то снижение потребляемой мощности будет достигаться за счет снижения напряжения на шинах электроприемника, а если РЭНН $k_P, k_Q < 0$, то снижение потребления будет достигаться при увеличении напряжения.

Согласно стандартам организации АО «СО ЕЭС», ведение режима по напряжению в рамках нижнего и верхнего предупредительных пределов (рис. 2) считается нормальным и не приводит к негативному влиянию на потребителя. Существование режима по напряжению в интервале от минимального значения напряжения до нижнего предупредительного значения считается допустимым и ограничивается по времени (среднеквадратичное значение) $t = 20$ мин. При этом регулирующий эффект электроэнергии, который является реакцией потребителя на изменение напряжения, будет проявляться слабо.

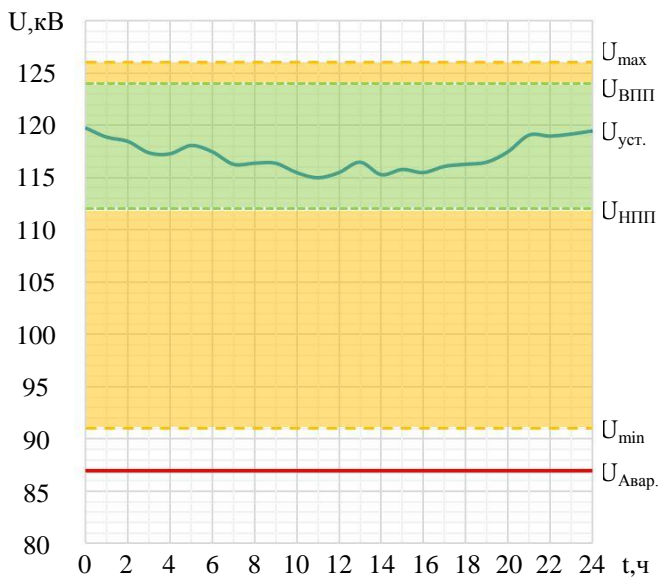


Рис. 2. График изменения напряжения узла 110 кВ

Таким образом, можно воздействовать на электропотребление узлов нагрузки путем изменения напряжения в некоторых точках энергосистемы, что предоставляет дополнительный инструмент по оперативному управлению электрическим режимом.

Для эффективного использования РЭНН необходимо определить оптимальные значения напряжений контрольных пунктов дефицитной электроэнергетической системы. В качестве критерия оптимальности предлагается использовать минимум отклонения токовой загрузки межсистемного элемен-

та от заданного значения с учетом ряда ограничений:

$$I_{i,j_y} < I_{i,j_{\max}}; \quad (3)$$

$$U_{n_{\min}} < U_{n_y} < U_{n_{\max}}; \quad (4)$$

$$k_{\min} < k_{mp} < k_{\max}, \quad (5)$$

где $U_{n_{\min}}$ – минимальное допустимое значение напряжения в контрольном пункте; $U_{n_{\max}}$ – максимально допустимое значение напряжения в контрольном пункте; U_{n_y} – установившееся значение напряжения в контрольном пункте; I_{i,j_y} – ток, протекающий по сетевому элементу в установившемся режиме; $I_{i,j_{\max}}$ – длительно допустимый ток сетевого элемента; k_{mp} – текущее значение коэффициента трансформации; k_{\min} , k_{\max} – нижний и верхний пределы регулирования устройства РПН соответственно.

Таким образом, формируется задача оптимизации, целевой функцией которой является минимум отклонения токовой загрузки межсистемного элемента от заданного значения:

$$I_{\Delta_{свн}}(k_{mp}, U_{БВ-Q_n}) = \left| \frac{S_{\text{ЭЭС}_{н\text{сх}}}(U)}{U_l} - \frac{S_{\text{ЭЭС}_y}(U)}{U_l} - \Delta I \right| \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $S_{\text{ЭЭС}_y}(U)$ – мощность электроэнергетической системы в установившемся режиме, определяемая с учетом СХН; $U_{БВ-Q_n}$ – напряжение узла, где осуществляется регулирование напряжения; ΔI – разница между длительно допустимым и установившимся значениями тока элемента; U_l – напряжение системной линии:

$$\Delta I = I_{ycm} - I_{\max}; \quad (7)$$

$$S_{\text{ЭЭС}}(U) = \sum S_n(U_n) =$$

$$\sum \sqrt{P_{н\text{о}M_n} \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{н\text{о}M_n}} + 0,47 \cdot \left(\frac{U_{y_n}}{U_{н\text{о}M_n}} \right)^2 \right]^2 + Q_{н\text{о}M_n} \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{н\text{о}M_n}} + 4,3 \cdot \left(\frac{U_{y_n}}{U_{н\text{о}M_n}} \right)^2 \right]^2}, \quad (8)$$

где I_{ycm} – ток межсистемного элемента в установившемся режиме; I_{\max} – длительно допустимое значение тока этого элемента.

Для решения данной оптимизационной задачи разработан алгоритм, базирующийся на известных методах расчета и оптимизации режимов электроэнергетических систем, в основе которого лежит метод приведенного градиента:

1. Расчет электрического режима методом Ньютона.

1.1. Формирование таблицы ветвей.

1.2. Формирование матрицы уравнений небалансов мощностей для каждого узла.

$$W(X) = 0; X = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_{n-1} \\ U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_{n-1} \end{pmatrix}; W(X) = \begin{pmatrix} w_{P_1}(x) \\ w_{P_2}(x) \\ \dots \\ w_{P_{n-1}}(x) \\ w_{Q_1}(x) \\ w_{Q_2}(x) \\ \dots \\ w_{Q_{n-1}}(x) \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$w_{P_k} = P_k - g_{k,k} U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_j (g_{k,j} \cos \delta_{k,j} - b_{k,j} \sin \delta_{k,j}); \quad (10)$$

$$w_{Q_k} = Q_k - b_{k,k} U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_j (b_{k,j} \cos \delta_{k,j} + g_{k,j} \sin \delta_{k,j}), \quad (11)$$

где X – вектор-столбец искоемых переменных; $W(X)$ – система уравнений балансов мощностей для каждого узла; δ – угол отклонения между фазами напряжений; U – напряжение в узле; $w_P(x)$ – уравнение небаланса активной мощности узла; $w_Q(x)$ – уравнение небаланса реактивной мощности узла (не записывается для узлов-генераторов реактивной мощности); n – количество узлов схемы; P, Q – активная и реактивная мощности узла; g, b – активная и реактивная проводимости ветви; k, j – номера узлов.

1.3. Выбор начальных приближений для искоемых переменных.

Для нулевого шага итерации $\delta_k^0 = 0$; $U_k^0 = U_{ном}$. Для последующих шагов в качестве начальных приближений используются значения, полученные в результате решения системы уравнений методом Гаусса в шаге 1.5. Значение напряжений узлов-генераторов является неизменным.

1.4. Формирование матрицы Якоби:

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial \delta} & \frac{\partial W_P}{\partial U} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} & \frac{\partial W_Q}{\partial U} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где $\frac{\partial W_P}{\partial U}, \frac{\partial W_Q}{\partial U}$ – частные производные небаланса активной и реактивной мощности соответственно по модулю напряжения узла; $\frac{\partial W_P}{\partial \delta}, \frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$ – частные производные небаланса активной и реактивной мощности соответствен-

но по фазе напряжения узла.

1.5. Определение неизвестных переменных методом Гаусса:

$$W(X^i) + \frac{\partial W}{\partial X}(X^i)(X^{i+1}) = 0, \quad (13)$$

где i – шаг итерации.

Итерационный процесс Ньютона в матричной форме:

$$X^{(i+1)} = X^i - \left\| \frac{\partial W}{\partial X}(X^i) \right\|^{-1} W(X^i). \quad (14)$$

Результатом выполнения данного шага алгоритма являются новые значения напряжений и углов отклонений фаз напряжений в соответствии с выбранными на шаге 1.3 приближениями. Поэтому для расчета электрического режима с заданной точностью необходимо повторить шаги 1.2–1.5 вплоть до достижения допустимой погрешности расчета.

2. Определение токовой нагрузки ветвей схемы.

На текущем шаге определяется токовая нагрузка ветвей схемы в соответствии с результатами вычислений предыдущего шага для контроля выполнения установленных ограничений по длительно допустимому току элемента в полученном электрическом режиме.

3. Определение уточненного значения ΔI :

$$\Delta I = I_{уст} - I_{max}, \quad (15)$$

где $I_{уст}$ – установившееся значение тока через элемент сечения; I_{max} – максимально допустимое значение тока через данный элемент сечения.

4. Формирование целевой функции:

$$II[X'(Y'), Y'], \quad (16)$$

где X' – вектор зависимых переменных: U , δ узлов нагрузки; Y' – вектор независимых переменных: U узлов-генераторов и k_{mp} трансформаторных узлов, участвующих в регулировании.

5. Проверка выполнения установленных ограничений:

$$U_{\min} < U_n < U_{\max}; \quad (17)$$

$$I_{i,j} < I_{\max,i,j}; \quad (18)$$

$$k_{mp_min} < k_{mp} < k_{mp_max}. \quad (19)$$

6. Определение градиента неявной функции:

$$\frac{\partial II}{\partial Y'} = \frac{\partial II}{\partial Y'} \Big|_0 + \frac{\partial II}{\partial W} \cdot \frac{\partial W}{\partial Y'}, \quad (20)$$

где $\frac{\partial II}{\partial Y'}$ – градиент неявной функции по вектору независимых переменных;

$\frac{\partial II}{\partial Y'} \Big|_0$ – вектор, определяемый из явной зависимости $II(Y')$; $\frac{\partial W}{\partial Y'}$ – матрица

частных производных $\frac{\partial w_{Pk}}{\partial Y'_j}, \frac{\partial w_{Qk}}{\partial Y'_j}$, определяемых из явных зависимостей

$w_{Pk}(Y'), w_{Qk}(Y')$; $\frac{\partial I}{\partial W} = \left(\frac{\partial I}{\partial W_P} \quad \frac{\partial I}{\partial W_Q} \right)$ – вектор-строка частных производных, причем $\frac{\partial I}{\partial W}$ определяется из следующего выражения:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial \delta} & \frac{\partial W_P}{\partial U} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} & \frac{\partial W_Q}{\partial U} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial W_P} \\ \frac{\partial I}{\partial W_Q} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial \delta} \\ \frac{\partial I}{\partial U} \end{pmatrix}. \quad (21)$$

7. Определение независимых переменных:

$$Y'^i = Y'^{i-1} - \frac{\partial I}{\partial Y'} \cdot t_0, \quad (22)$$

где Y'^i – значение вектора независимых переменных на шаге итерации i .

8. Определение зависимых переменных.

С помощью расчета электрического режима методом Ньютона в соответствии с шагами 1.2–1.5 производится определение зависимых переменных в соответствии с новыми значениями независимых переменных.

В итоге оптимизационный алгоритм состоит из двух частей (рис. 3).

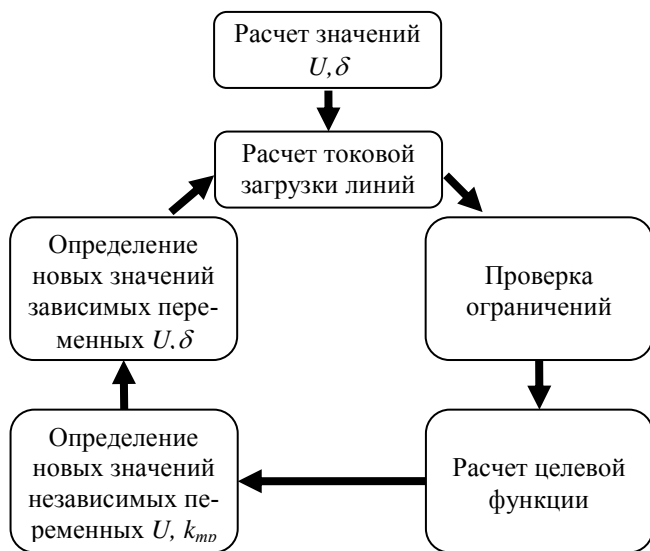


Рис. 3. Структурная схема алгоритма

Выполнение вышеописанного алгоритма производится вплоть до достижения необходимой точности расчетов. В результате определяются такие значения независимых переменных U узлов-генераторов и k_{mp} трансформаторных узлов, участвующих в регулировании, при которых достигается минимум отклонения токовой загрузки межсистемного элемента от заданного значения. Данный эффект достигается за счет снижения потребляемой дефицитной энергосистемой мощности, что при $U_{связи} = const$ приводит к снижению токовой загрузки межсистемной связи.

В третьей главе диссертационной работы с помощью созданных моделей электроэнергетических систем (рис. 4–5) совершенствуются методики оперативного управления электрическими режимами.

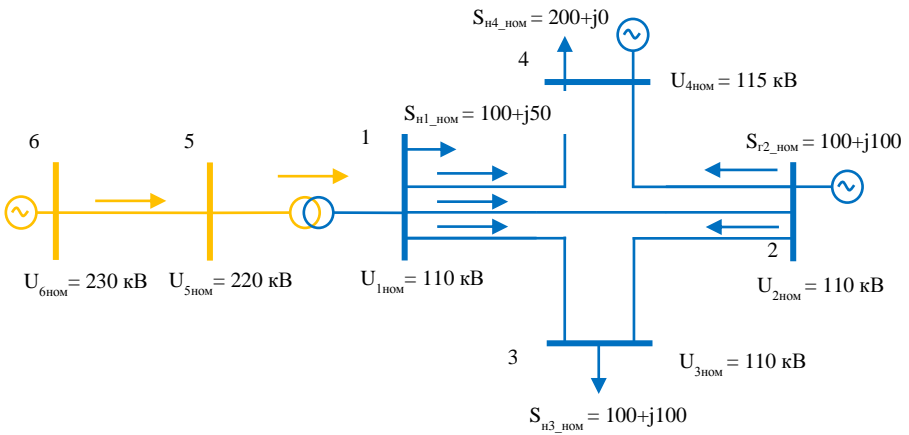


Рис. 4. Принципиальная схема тестовой модели электроэнергетической системы

Совершенствование методик заключается в применении алгоритма оптимизации, позволяющего активно использовать РЭНН для разгрузки межсистемной связи.

В случае постановки задачи по токовой разгрузке межсистемной связи целевой функцией выступает минимум отклонения ее токовой загрузки от заданного значения. Однако в практике оперативного управления электрическими режимами электроэнергетических систем нередкой является задача ввода сальдо-перетока активной мощности контролируемого сечения в область допустимых значений. При этом критерий по длительно-допустимой токовой нагрузке оборудования является лишь одним из шести критериев, используемых при определении максимально допустимого перетока. Поэтому на основании разработанного алгоритма оптимизации и методики снижения недопустимой токовой перегрузки сетевого элемента была разработана методика ввода сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении в область допустимых значений с применением разработанного алгоритма.

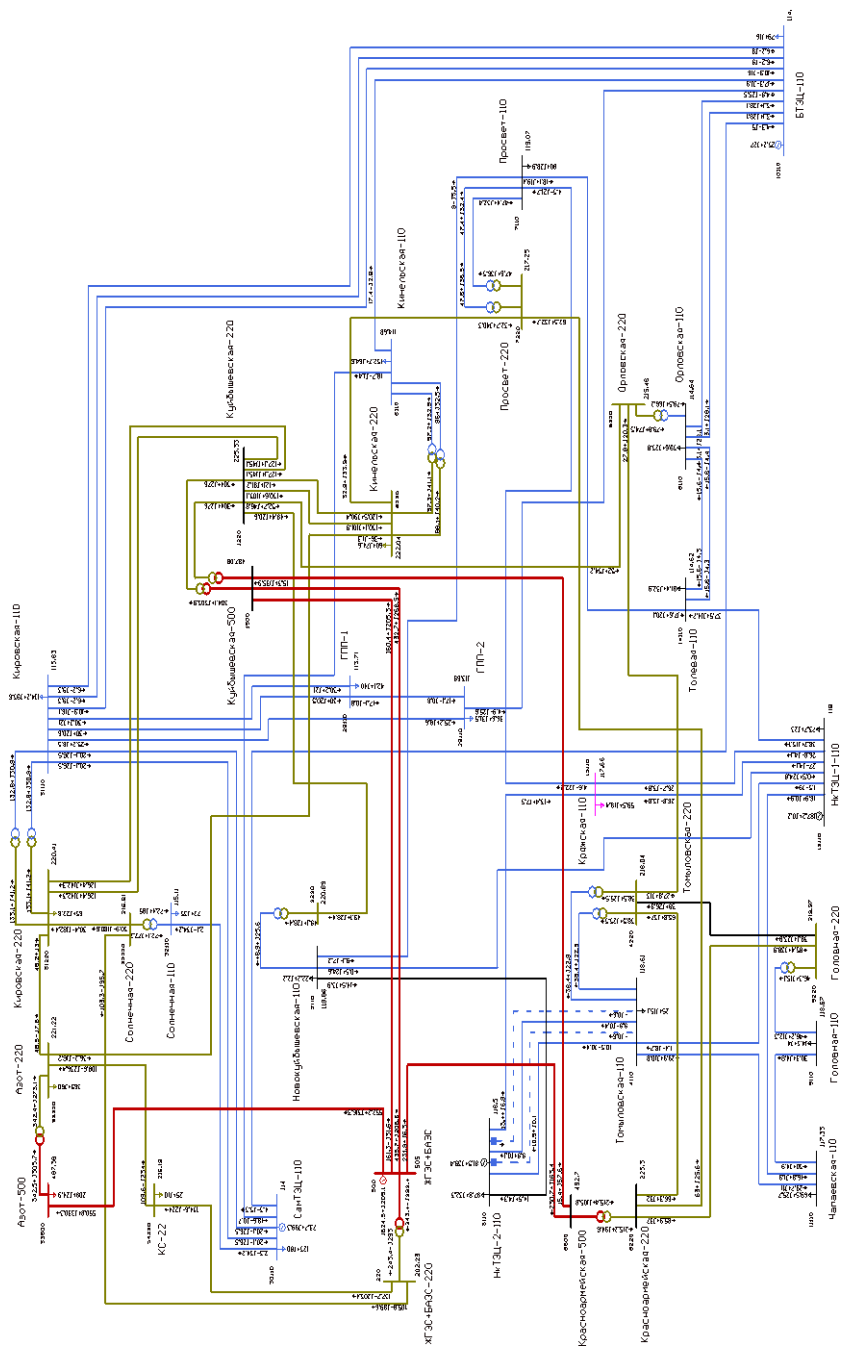


Рис. 5. Принципиальная схема Самарской электроэнергетической системы

Отличительной особенностью данной методики является целевая функция алгоритма $I_{\Delta P_{связи}}$ – минимум отклонения сальдо-перетока активной мощности межсистемного элемента от заданного значения:

$$I_{\Delta P_{связи}}(k_{тр}, U_{БУ-Q_n}) = P_{сальдо_исх} - \Delta P_{сальдо} - P_{сальдо_расч} \rightarrow \min, \quad (23)$$

где $P_{связи}$ – целевое значение сальдо-перетока активной мощности связи; $P_{сальдо_исх}$ – исходное значение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении; $P_{сальдо_расч}$ – расчетное значение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении; $\Delta P_{сальдо}$ – необходимое значение снижения сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении. Согласно нормативным документам АО «СО ЕЭС» значение сальдо-перетока должно быть меньше максимально допустимого перетока активной мощности $P_{МДП}$ в контролируемом сечении для рассматриваемой схемы:

$$P_{сальдо} < P_{МДП}. \quad (24)$$

Формула для расчета $\Delta P_{сальдо}$ выглядит следующим образом:

$$\Delta P_{сальдо} = P_{сальдо_исх} - P_{МДП}; \quad (25)$$

$$P_{сальдо_расч} = \sum \left[P_{н\text{юм}_n} \cdot \left[a_0 - a_1 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{н\text{юм}}} + a_2 \cdot \left(\frac{U_{y_n}}{U_{н\text{юм}}} \right)^2 \right] - P_{ген} \right]. \quad (26)$$

Для расчета исходного значения сальдо-перетока активной мощности $P_{сальдо_исх}$ используются данные исходного режима, а определение расчетного значения $P_{сальдо_расч}$ производится после каждого шага итерации в соответствии с новыми расчетными значениями напряжений в узлах нагрузки.

В итоге целевая функция алгоритма примет следующий вид:

$$I_{\Delta P_{связи}}(k_{тр}, U_{БУ-Q_n}) = \left| \begin{array}{l} P_{сальдо_исх} - \Delta P_{сальдо} - \\ - \sum \left[P_{н\text{юм}_n} \cdot \left[a_0 - a_1 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{н\text{юм}}} + a_2 \cdot \left(\frac{U_{y_n}}{U_{н\text{юм}}} \right)^2 \right] - P_{ген} \right] \end{array} \right| \rightarrow \min. \quad (27)$$

Благодаря этому будет производиться поиск таких значений напряжения и коэффициента трансформации в узлах-регуляторах, при которых достигается минимум отклонения сальдо-перетока активной мощности межсистемного элемента от заданного значения, с учетом установленных ограничений.

Методика снижения перегрузки межсистемной связи:

1. Выявление недопустимой перегрузки межсистемного элемента оперативным персоналом организации, осуществляющей управление и контроль за режимом электроэнергетической системы с помощью средств телеизмерений и телесигнализации.

2. Определение необходимого снижения ΔI или $\Delta P_{сальдо}$ в зависимости от поставленной задачи.

3. Определение уровней напряжения на шинах станций и коэффициентов трансформации системосвязующих подстанций, участвующих в регулировании, в соответствии с алгоритмом, при которых будет обеспечиваться минимум отклонения токовой загрузки межсистемного элемента от заданного значения.

4. Оценка эффективности по объему потенциально не отключенной нагрузки $P_{НОН}$:

$$P_{НОН} = P_{сальдо_исх} - P_{сальдо_уст}, \quad (28)$$

где $P_{сальдо_исх}$ – исходное значение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении; $P_{сальдо_уст}$ – установившееся значение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении.

5. Формирование команд на изменение режимов работы оборудования в соответствии с результатами оптимизации.

В результате использования разработанной методики снижения недопустимой токовой перегрузки элемента сечения на примере тестовой модели электроэнергетической системы (см. рис. 4) успешно решается задача разгрузки межсистемного элемента № 6–5 без применения ввода ограничений электроснабжения.

С помощью алгоритма были определены $k_{mp} = 2,1087$, $U_4 = 109,557$ кВ, при которых значение тока, протекающего через данную линию, уменьшается на 3,08 %. Остановка расчета вызывается нарушением одного из ограничений по напряжению в контрольных пунктах 110 кВ $U_{min} = 106$ кВ. После расширения установленных ограничений по напряжению в контрольных пунктах напряжением 110 кВ до значения $U_{min} = 96$ кВ были определены новые значения независимых переменных $k_{mp} = 2,158$, $U_4 = 105,659$ кВ, при которых достигается снижение тока $I_{6,5}$ на 4,49 %, что для рассматриваемого примера составляет 46,9 А (см. рис. 5), и обеспечивается решение поставленной задачи.

С помощью методики ввода сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении в область допустимых значений на примере тестовой модели электроэнергетической системы (см. рис. 4) успешно решается задача снижения недопустимого значения сальдо-перетока активной мощности, протекающего по межсистемному элементу № 6–5, без применения ввода ограничений электроснабжения. В результате выполнения алгоритма были определены $k_{mp} = 2,1069$, $U_4 = 109,519$ кВ, при которых значение тока, протекающего через данную линию, уменьшается на 2,86 %. После расширения установленных ограничений по напряжению до значения $U_{min} = 96$ кВ на 535-м шаге итерации были определены новые значения независимых переменных $k_{mp} = 2,16$, $U_4 = 103,177$ кВ, при которых достигается снижение перетока активной мощности $P_{6,5}$ на 5,71 % (рис. 6).

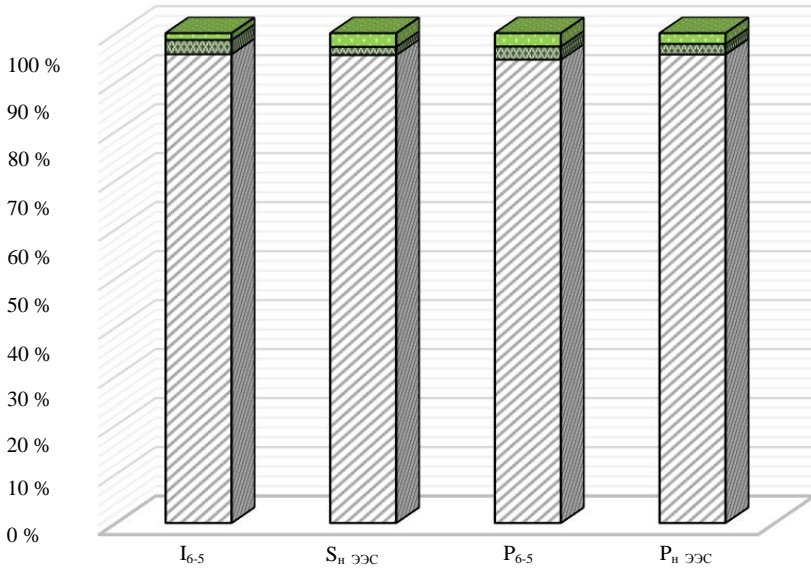


Рис. 6. Результаты оптимизации

Данная методика была адаптирована для решения задачи ввода сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении в область допустимых значений на примере модели части Самарской электроэнергетической системы (см. рис. 5). Согласно условию, необходимо было снизить значение сальдо-перетока активной мощности в сечении на 25 МВт. За счет изменения уровней генерации на станции дефицитной энергосистемы до значения $U_{30} = 112$ кВ было достигнуто снижение условного среднего напряжения в рассматриваемой части электроэнергетической системы на 4,47 %. Потребляемая активная мощность снизилась на 29,604 МВт, а токовая нагрузка наиболее нагруженного элемента сечения снизилась на 33 А, что составляет 6,2 % от исходного значения. Применение данной методики привело к решению поставленной задачи по снижению сальдо-перетока активной мощности в сечении, а эффективность достигла $\Delta P_{НОН} = 28,851$ МВт, что составляет 8,5 % от исходного значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения в виде методик и алгоритмов управления транспортом электроэнергии при заданной пропускной способности сетевых элементов. Выполненные в диссертации исследования вносят существенный вклад в решение задачи оперативного управления режимами электроэнергетических систем.

1. В результате анализа методик оперативного управления режимами энергосистем и статических характеристик нагрузки были получены результаты, подтверждающие возможность использования регулирующего эффекта нагрузки по напряжению при решении задач оперативного управления. Показано, что на интервале изменения значений напряжения в $\pm 15\%$ $U_{ном}$ СХН характеризуются пологой зависимостью и отсутствуют резкие изменения режима потребления.

2. На основе метода приведенного градиента разработаны алгоритмы оптимизации значения напряжения в узле-генераторе и коэффициента трансформации системосвязующей подстанции по критерию минимума отклонения токовой загрузки межсистемного элемента и критерию минимума отклонения сальдо-перетока активной мощности межсистемного элемента от заданных значений с учетом установленных ограничений.

3. Получены методики оперативного управления, применение которых позволяет снизить объемы ввода необходимых ограничений электроснабжения.

3.1. В результате применения методики снижения недопустимой токовой перегрузки межсистемного элемента на примере тестовой модели электроэнергетической системы достигнуто снижение токовой нагрузки связи на 4,49 % за счет использования регулирующего эффекта нагрузки по напряжению.

3.2. При использовании методики ввода сальдо-перетока активной мощности в сечении в область допустимых значений на примере тестовой модели достигнуто снижение значения сальдо-перетока на 5,71 %.

3.3. Результатом применения адаптированной методики ввода сальдо-перетока активной мощности в сечении в область допустимых значений для модели части Самарской электроэнергетической системы стало снижение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении на 8,5 %.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Петров В. В. Совершенствование методов ликвидации недопустимых токовых перегрузок сетевых элементов в крупных энергосистемах / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Полищук // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2016. – № 1. – С. 83–90.

2. Петров В. В. Анализ влияния изменения уставок по напряжению на электростанциях на значения сальдо-перетока активной мощности в сечении / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Полищук // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – № 5. – С. 35–44.

3. Петров В. В. Разработка алгоритма поиска уровней напряжений в контрольных узлах, обеспечивающих снижение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении / В. В. Петров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 148–157.

Статьи, опубликованные в иных рецензируемых изданиях:

4. Петров В. В. Использование статических характеристик крупных узлов нагрузки при ликвидации аварийных режимов энергосистем / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Котенев // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

5. Петров В. В. Влияние уровней напряжения в контрольных пунктах энергосистемы на значения максимально допустимого перетока мощности в сечении / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Полищук // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2017. – № 6. – С. 54–56.

6. Петров В. В. Повышение эффективности ведения режимов энергосистем с учетом регулирования уровней напряжения в узлах нагрузки / В. В. Петров, А. А. Альмендеев // Электроэнергетика глазами молодежи 2014: материалы конф. – Томск, 2014. Т. 1. – С. 285–287.

7. Петров В. В. Использование регулирующего эффекта по напряжению для крупных узлов нагрузки / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Котенев // Тинчуринские чтения: материалы конф. – Казань, 2015. Т. 1. – С. 116.

8. Петров В. В. Использование статических характеристик крупных узлов нагрузки при ликвидации аварийных режимов энергосистем / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Котенев // Электроэнергетика глазами молодежи 2015: материалы конф. – Иваново, 2015. Т. 1. – С. 163–166.

9. Петров В. В. Управление перетоками мощности при работе электрической системы в послеаварийном режиме / В. В. Петров, А. А. Альмендеев, В. И. Котенев // Электроэнергетика глазами молодежи 2015: материалы конф. – Иваново, 2015. Т. 1. – С. 167–170.

10. Петров В. В. Моделирование системы автоматического управления напряжением системы электроснабжения с короткозамкнутыми асинхронными двигателями / В. В. Петров, В. И. Котенев, В. В. Кочетков // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI международной научно-практической конференции. – Саратов, 2015. – С. 126–127.

11. Петров В. В. Влияние уровней напряжения в контрольных пунктах энергосистемы на значения максимально допустимого перетока мощности в сечении / В. В. Петров, А. А. Альмендеев // Электроэнергетика глазами молодежи 2016: материалы конф. – Казань, 2016. Т. 2. – С. 351–352.

12. Петров В. В. Ликвидация токовой перегрузки оборудования путем изменения напряжения в узлах, балансирующих по реактивной мощности / В. В. Петров, А. А. Альмендеев // Электроэнергетика глазами молодежи 2016: материалы конф. – Казань, 2016. Т. 2. – С. 353–356.

13. Петров В. В. Анализ влияния уровней напряжения в энергосистеме на значение сальдо-перетока активной мощности в сечении / В. В. Петров, А. А. Альмендеев // Электроэнергетика глазами молодежи 2017: материалы конф. – Самара, 2017. Т. 2. – С. 169–170.