

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Рец В.В.¹, Прохоров А.В.²

¹ ТПУ, ИШЭ, гр. А3-42, e-mail: vlad.rets@mail.ru

² ТПУ, ИШЭ, к.т.н., доцент, e-mail: antonprokhorov@tpu.ru

Введение

Переток активной мощности по линиям электропередач и электросетевому оборудованию контролируется в диспетчерских центрах (ДЦ) АО «СО ЕЭС» с целью обеспечения надежности энергосистемы [1]. Максимально допустимый переток (МДП) в контролируемых сечениях (КС) – совокупности линий и электросетевого оборудования – является количественным показателем пропускной способности электрической сети.

Для учета ограничений пропускной способности сети в процедурах планирования и управления электроэнергетическим режимом используется минимальная величина МДП, определенная для наиболее неблагоприятных условий функционирования энергосистемы [2]. Поскольку фактические условия в подавляющем большинстве случаев легче расчетных, такой подход, с одной стороны, гарантирует обеспечение надежности энергосистемы, с другой, приводит к её менее экономичному функционированию вследствие недоиспользования пропускной способности сети.

Повышение пропускной способности достигается использованием цифровых технологий, реализующих автоматическое управление в энергосистеме [3], а также расчет МДП в фактической или наиболее приближенной к ней схемно-режимной ситуации (СРС) [4].

Другим возможным способом повышения пропускной способности является изменение способа управления напряжением и перетоками реактивной мощности. В настоящее время в отечественной практике эксплуатации энергосистем отсутствует технология определения оптимальных управляющих воздействий (УВ) на средства регулирования напряжения (СРН) в энергосистеме. Для оценки УВ требуется циклический оптимизационный расчет УВ в режиме реального времени на основе математической модели энергосистемы, включающей большое число телеизмерений от объектов электроэнергетики. Подобные функциональные возможности реализованы в системах автоматического регулирования напряжения, используемых за рубежом [5], но преследующих иные цели регулирования.

Предлагаемый метод управления напряжением был апробирован на примере Иркутско-Черемховского энергорайона и КС «Братск-Иркутск» [6]. Описанный подход учитывает специфику функционирования Единой энергетической системы России, предусматривает интеграцию с Системой мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) [4] и оперативно-информационным комплексом СК-11 [7] и может быть применен как в технологических процедурах формирования диспетчерского графика (ДГ), так и при управлении режимом. С целью оценки применимости подхода в указанных процессах необходима автоматизация расчета УВ на СРН в соответствии с описанной в [6] оптимизационной моделью.

При этом выходные данные расчетного алгоритма в составе разрабатываемого программного обеспечения (ПО) будут определяться контекстом его использования. При управлении режимом диспетчер ДЦ контролирует напряжение в отдельных узлах энергосистемы, определяющих уровни напряжения в прилегающей сети – контрольных пунктах по напряжению (КП). Результат работы разрабатываемого ПО в таком случае должен содержать информацию о целевых значениях напряжения в КП. Диспетчер сможет ориентироваться на данные значения для корректировки уровня напряжения с целью максимизации пропускной способности сети. В случае с использованием ПО при формировании ДГ, выходными данными станут не значения напряжения в КП, а значение МДП в КС на каждый час суток, для которого осуществляется планирование. Указанные значения МДП в унифицированном формате могут быть использованы и при выборе состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО), и при расчете ДГ.

Между тем, использование разрабатываемого ПО в любом из описанных вариантов предъявляет высокие требования к скорости расчета и получению наиболее оптимальных результатов. В настоящей работе представлены результаты разработки ПО для его применения при управлении режимом.

Именно в процессе управления в реальном времени, являющимся конечным результатом многоэтапного и тщательного планирования режима, возможно наиболее наглядно продемонстрировать эффективность и применимость на практике описанного ПО, а также определить актуальность расширения его функциональных возможностей для применения в технологических процедурах формирования ДГ.

Алгоритм расчета

Разрабатываемое ПО реализует поиск оптимальных УВ на СРН с целью повышения пропускной способности выбранного КС по следующему алгоритму:

1. Определение узлов, в которых производится контроль напряжения.
2. Определение СРН, наиболее эффективных для регулирования напряжения в узлах из п. 1.
3. Расчет коммутационного состояния и выработки реактивной мощности СРН из п. 2, соответствующие принятой оптимизационной модели.

Ключевым в алгоритме является шаг 3, заключающийся в поиске максимума целевой функции (ЦФ), состоящей из взвешенной суммы следующих критериев:

$$k_u = \frac{\sum_{j=1}^n U_j}{n \cdot U_{\text{наиб. раб.}}} - \text{сумма значений напряжения } U_j \text{ в } n \text{ контролируемых узлах относительно соответствующего наибольшего рабочего } U_{\text{наиб. раб.}}, \text{ о.е.,}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{пер.}}}{\sqrt{P_{\text{пер.}}^2 + Q_{\text{пер.}}^2}} - \text{коэффициент мощности, передаваемой по связи в сечении,}$$

ограничивающей пропускную способность данного сечения по току в ПАР; контролируется в случае, когда МДП определяется величиной АДТН в ПАР,

$$k_e = \sum_{i=1}^m \left| \frac{Q_{\text{рез. } i}}{Q_i - Q_{0i}} \right| - \text{величина, обратная степени использования резерва реактивной мощности } m$$

СРН ($Q_{\text{рез. } i}$ – резерв реактивной мощности i СРН, Q_i – нагрузка i СРН после оптимизации, Q_{0i} – нагрузка i СРН в исходном режиме), о.е.,

$$k_p = \frac{P_{K_{C_0}}}{P_{KC}} - \text{величина, обратная значению перетока активной мощности в рассматриваемом КС}$$

после оптимизации P_{KC} относительно данного значения в исходном режиме $P_{K_{C_0}}$, о.е.

Такая формулировка оптимизационной задачи предусматривает косвенную оценку повышения пропускной способности сети на основе данных об уровне напряжения в узлах сети. В отличие от прямой оценки на основе значения МДП в КС, такой подход имеет несоизмеримо малое время цикла расчета, что обусловлено спецификой определения МДП [2].

Оценка величины ЦФ и переменных в её составе производится на основе расчета установившегося режима энергосистемы. В современных программных комплексах (ПК), например, в отечественном ПК «RastrWin3» такой расчет реализован методом Ньютона [8].

В связи с отсутствием аналитической функции зависимости указанных параметров от выработки реактивной мощности СРН в качестве метода оптимизации был принят метод дифференциальной эволюции [9], относящийся к классу стохастических алгоритмов численной оптимизации.

Реализация ПО

Описанные функциональные возможности реализованы в составе настольного приложения, диаграмма компонентов которого представлена на рис. 1.

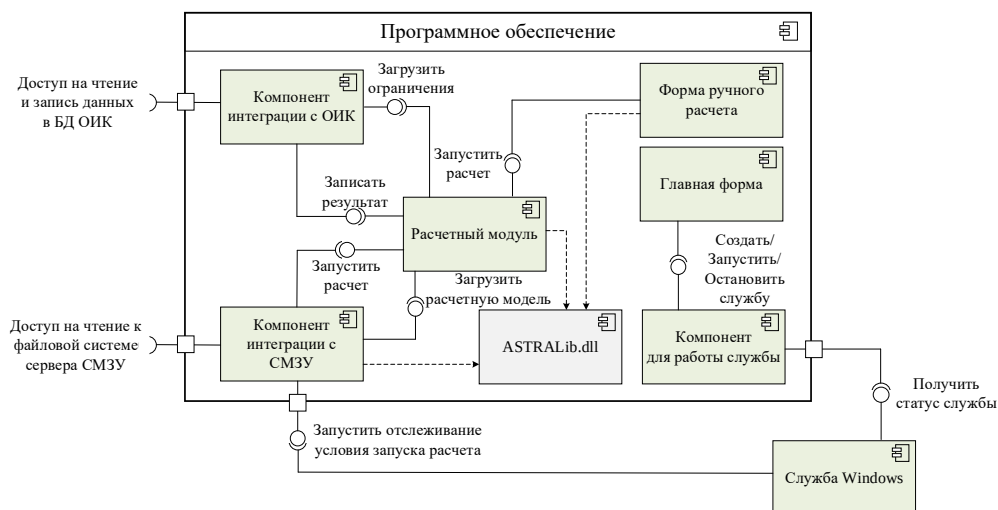


Рис. 1. Диаграмма компонентов ПО

ПО имеет графический интерфейс пользователя, который связан с Расчетным модулем, реализующим методы расчёта из библиотеки «ASTRALib.dll», поставляемой с ПК «RastrWin3». Компоненты интеграции с внешними системами необходимы для получения исходных данных для расчета и записи результата. ПО реализует оптимизационный расчет в двух режимах: по заданию пользователя и в фоновом режиме средствами Службы Windows.

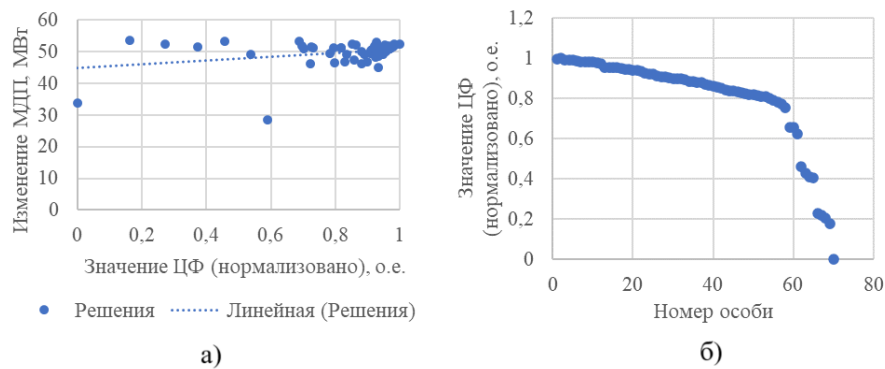
С целью контроля работы приложения и повышения скорости устранения неполадок организовано логирование.

Тестирование ПО

Тестирование ПО заключалось в оценке корректности взаимодействия с внешними системами для получения исходных данных, скорости расчета и достоверности получаемых результатов. Для этого были использованы ретроспективные данные о работе объединенной энергетической системы (ОЭС) Сибири с наблюдаемой перегрузкой КС «Братск-Иркутск». Расчетная модель ОЭС включает в себя 1938 узлов и 3160 ветвей. Параметры метода оптимизации на данном этапе исследования принимались стандартные рекомендуемые [9]. В дальнейшем с целью повышения сходимости и скорости расчета необходимо совершить подбор указанных параметров. Характеристика используемой вычислительной машины: операционная система Windows 11 x64, процессор с базовой частотой 1,7 ГГц имеет 10 ядер и 12 потоков, оперативная память DDR4 16 ГБ.

Область допустимых решений в терминах применяемого метода оптимизации определяется числом генов особи. В рассматриваемой задаче особью является совокупность значений выработки реактивной мощности СРН, а геном – значение выработки отдельной СРН. Таким образом, число генов равно числу СРН, которое в рамках тестирования было определено заранее для ограничения области поиска решений. Оптимизируемыми принимались генераторы Братской ГЭС, Иркутской ТЭЦ-11, Ново-Иркутской ТЭЦ, Усть-Илимской ГЭС, а также синхронные компенсаторы на подстанциях (ПС) 500 кВ Иркутская и Ново-Зиминская. Нагрузка остальных СРН определялась режимом работы внешней сети.

По результатам 100 запусков однотипных расчетов, представленных на рис. 2, а, среднее значение повышения МДП в КС равно 50 МВт, что составляет 50 % величины нерегулярных колебаний в рассматриваемом КС. С учетом повышения пропускной способности КС в среднем на 150 МВт за счет СМЗУ, предлагаемый подход позволит повысить эффективность использования электрической сети с применением цифровых технологий на 33 %. Среднеквадратичное отклонение повышения МДП составило 3,2 МВт, что говорит о высокой сходимости решения. Из рис. 2, б видно, что используемый метод оптимизации производит корректную сортировку получаемых в ходе расчета решений: особи с наибольшим значением ЦФ имеют меньший порядковый номер в популяции. Среднее время расчета с момента получения расчетной модели СМЗУ составило 205,2 секунд со среднеквадратичным отклонением 10,1 секунд.



*Рис. 2. Результаты вычислительных экспериментов:
а – зависимость изменения МДП от значения ЦФ для 100 запусков однотипных расчетов;
б – распределение значения ЦФ между особями одной популяции*

Описанные результаты тестирования говорят об удовлетворительной скорости поиска решения и его сходимости для его применения с целью выдачи рекомендаций о регулировании напряжения и реактивной мощности диспетчеру в режиме реального времени.

Заключение

Разработанное ПО позволяет передавать пользователю рекомендации о регулировании напряжения и реактивной мощности для максимизации пропускной способности электрической сети. Результаты компонентного тестирования ПО показали корректность его взаимодействия с СМЗУ и СК-11, удовлетворительные для практического применения скорость расчета и его сходимость. В рамках дальнейших исследований предстоит системное тестирование ПО и расширение его функциональных возможностей для оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности в процедурах краткосрочного планирования электроэнергетического режима.

Список использованных источников

1. Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем». Утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 №630.
2. Стандарт организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.010.004-2020 «Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях, а также допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях при работе в вынужденном режиме». Утвержден приказом АО «СО ЕЭС» от 09.07.2020 №149.
3. Основы противоаварийной автоматики в электроэнергетических системах : учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Е.А. Понамарев, В.А. Наумов, Р.В. Разумов. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Чебоксары : Изд-во РИЦ «СРЗАУ», 2022. – 392 с.
4. Костоглодова С.Л., Лоцман Д.С., Максименко Д.М. и др. Интеграция системы мониторинга запасов устойчивости с технологическими инструментами рынка электроэнергии и мощности // Научно-технический журнал «Известия НТЦ Единой энергетической системы». – 2021. – №. 1 (84). – С. 89–95.
5. Shi B., Wu C., Sun W., и др. A Practical Two-level Automatic Voltage Control System: Design and Field Experience // 2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2018 – Proc. – 2018. – С. 1397–1407.
6. Рец В.В., Прохоров А.В., Останин А.Ю. Разработка метода управления напряжением и реактивной мощностью для максимизации пропускной способности контролируемого сечения по активной мощности // Электроэнергетика глазами молодежи – 2023 : Материалы XIII Международной научно-технической конференции – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 114–117.
7. Пакет SCADA СК-11 // Монитор Электрик [Электронный ресурс]. URL: <https://monitel.ru/applications/scada> (дата обращения: 10.10.2024).
8. Аннотация // RastrWin3 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rastrwin.ru/rastr/anno/index.php> (дата обращения: 10.10.2024).
9. Differential evolution // SciPy documentation [Электронный ресурс]. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.differential_evolution.html (дата обращения: 10.10.2024).