Многокритериальный подход к выбору проводников и построению распределительных электрических сетей при проектировании систем передачи электроэнергии

Головня Иван Ильич
магистрант, кафедра экономики и цифровых бизнес-технологий, Иркутский национальный технический исследовательский университет, ivashkagolovnya@yandex.ru

В статье рассматривается проблема выбора проводников и формирования конфигурации распределительных электрических сетей при проектировании систем передачи электроэнергии в условиях роста электрических нагрузок, вызванного урбанизацией и расширением промышленного производства. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки проектных решений, обеспечивающих не только снижение капитальных и эксплуатационных затрат, но и повышение надежности, энергетической эффективности и качества электроснабжения. Целью работы является обоснование многокритериального подхода к выбору оптимального варианта построения распределительной сети с учетом совокупности технических, экономических и эксплуатационных параметров. В качестве методической основы предложена мультиметодика принятия решений, базирующаяся на методе CRITIC, позволяющем объективно определить значимость анализируемых критериев. Для оценки альтернатив сформированы сценарии проектирования с различными типами проводников, для каждого из которых выполнен расчет потокораспределения мощности. По результатам моделирования определены профили напряжения, потери активной и реактивной мощности, токовые нагрузки, а также затраты, связанные с применением соответствующих проводников. Апробация предложенного подхода проведена на 34-узловой тестовой системе IEEE с использованием программного комплекса MATPOWER в среде Matlab. На основе матрицы решений, включающей 210 альтернатив, установлен вариант, обеспечивающий наилучшее совокупное сочетание критериев качества, эффективности и стоимости. Полученные результаты подтверждают, что многокритериальный подход является эффективным инструментом поддержки проектных решений при развитии распределительных электрических сетей.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, выбор проводников, распределительные электрические сети, проектирование электроэнергетических систем, радиальные сети, потокораспределение мощности, метод CRITIC, моделирование в MATPOWER, потери мощности, профиль напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Рост спроса на электроэнергию, обусловленный урбанизацией, промышленным развитием и усложнением структуры нагрузок, требует от электросетевых компаний своевременного расширения и модернизации распределительных сетей [10]. При этом проектирование новых участков и совершенствование существующей инфраструктуры осложняются как территориальными и техническими ограничениями, так и необходимостью обеспечения экономической эффективности, нормативной надёжности и требуемого качества электроснабжения [8, с. 7-12]. В этих условиях задачи выбора проводников и построения конфигурации распределительных электрических сетей приобретают ключевое значение, поскольку именно данные элементы в значительной степени определяют капитальные вложения, эксплуатационные издержки, уровень потерь мощности и устойчивость режимов работы сети [4, с. 4021-4026].

Современная практика сетевого планирования показывает, что ориентация исключительно на минимизацию первоначальных затрат уже не отвечает требованиям энергетики. При принятии проектных решений необходимо одновременно учитывать технические, экономические и эксплуатационные критерии, включая потери активной и реактивной мощности, отклонения напряжения, токовые нагрузки, надёжность схемы и стоимость используемых проводников [2]. Поэтому в исследованиях всё более активно применяются методы математической оптимизации, эвристические и метаэвристические алгоритмы, модели линейного и нелинейного программирования, а также подходы, основанные на анализе множества альтернатив [9, с. 2213-2220; 10].

Проведённые исследования подтверждают значительный интерес к данной проблематике. В научной литературе рассматриваются модели смешанного целочисленного нелинейного и линейного программирования, методы поиска Табу, эволюционные и эвристические алгоритмы, а также подходы, ориентированные на соблюдение радиальной структуры сети и достижение компромисса между стоимостью и режимной эффективностью. Вместе с тем большинство существующих решений сосредоточено либо на минимизации затрат, либо на отдельных технических показателях, что ограничивает полноту оценки проектных альтернатив.

В связи с этим актуальным является применение многокритериального подхода, позволяющего рассматривать проектирование распределительной сети как задачу комплексного выбора на основе совокупности взаимосвязанных показателей.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рост электрических нагрузок, усложнение конфигурации распределительных сетей и ужесточение требований к качеству и надёжности электроснабжения обусловливают необходимость совершенствования подходов к проектированию систем передачи и распределения электроэнергии. Особое значение в этой связи приобретает выбор проводников и конфигурации радиальной сети, поскольку именно данные решения определяют уровень потерь мощности, профиль напряжения, допустимые токовые нагрузки и величину капитальных затрат [6].

Анализ существующих исследований показывает, что большинство подходов ориентировано либо на минимизацию стоимости, либо на решение частных задач — снижения потерь, улучшения напряжения или оптимизации отдельных параметров сети. При этом недостаточно разработаны методы, позволяющие одновременно учитывать совокупность технических, эксплуатационных и экономических критериев в рамках единой процедуры выбора. Именно это обстоятельство образует методологический разрыв между традиционными оптимизационными моделями и реальными задачами проектирования распределительных сетей [3, с. 48-61].

Научная проблема исследования заключается в отсутствии универсального инструмента, который позволял бы обоснованно выбирать тип проводников и конфигурацию распределительной сети на основе одновременного учёта режимных, технико-экономических и эксплуатационных показателей.

Гипотеза исследования. Предполагается, что применение многокритериального подхода, сочетающего расчёт потокораспределения в радиальной сети с объективным взвешиванием критериев методом CRITIC, позволит повысить обоснованность проектных решений и определить вариант построения сети, обеспечивающий наилучшее сочетание стоимости, энергетической эффективности и качества электроснабжения.

Целью статьи является разработка методического подхода к выбору проводников и построению распределительных электрических сетей при проектировании систем передачи электроэнергии на основе многокритериальной оценки альтернатив.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

охарактеризованы особенности радиальных распределительных сетей как объекта проектирования;

определены критерии оценки альтернативных вариантов проводников;

выполнен расчёт потоков мощности и потерь в радиальной сети;

сформирована матрица решений по совокупности технических и экономических показателей;

проведено ранжирование альтернатив на основе метода CRITIC.

Научная новизна статьи заключается в следующем:

Предложен интегрированный подход к выбору проводников, объединяющий расчёт режимных параметров сети и многокритериальную оценку альтернатив.

Обосновано использование метода CRITIC для объективного определения весов критериев без задания экспертных коэффициентов.

Сформирована система критериев, одновременно учитывающая потери активной мощности, уровни напряжения, токовые ограничения и стоимостные параметры.

Показано, что выбор проводника должен рассматриваться как задача комплексного проектирования сети, а не как локальная процедура минимизации сопротивления линии.

Материалом исследования служат радиальные распределительные сети, имеющие древовидную структуру, в которой передача мощности осуществляется от подстанции к нагрузочным узлам по единственному пути. Такая топология широко применяется в распределительных системах благодаря конструктивной простоте и удобству эксплуатации. Типовая структура включает питающие линии, трансформаторы, коммутационные аппараты и устройства защиты. На рисунке 1 представлена классификация распределительных систем, позволяющая определить место радиальной схемы среди других вариантов сетевого построения.



Рисунок 1. Классификация распределительных систем.

Особенность радиальной сети состоит в однонаправленном характере потоков мощности, что повышает чувствительность системы к падению напряжения, техническим потерям и перегрузке отдельных участков. Поэтому на стадии проектирования особую значимость приобретает корректный выбор проводников, от которого зависят как капитальные затраты, так и эксплуатационная эффективность сети [5, с. 3-15].

В качестве альтернатив рассматриваются различные типы проводников, отличающиеся активным сопротивлением, реактивными параметрами, токовой нагрузочной способностью и стоимостью. Их сопоставление осуществляется не по одному показателю, а по совокупности критериев, что соответствует реальным условиям инженерного проектирования [1].

Для оценки проектных решений используется расчёт потокораспределения в радиальной сети. На рисунке 2 приведена типовая схема участка радиальной сети, включающая отправляющий узел m1, принимающий узел m2 и параметры ветви между ними.

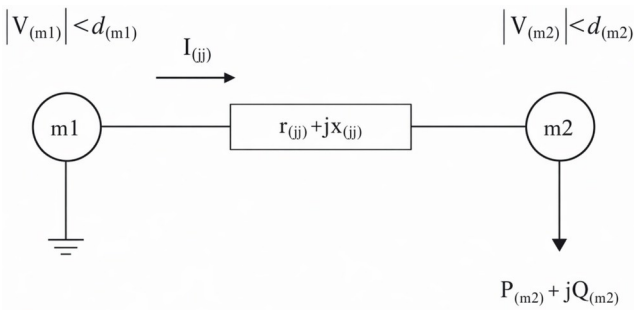


Рисунок 2. Типовая радиальная сеть.

Ток в ветви определяется выражением

$$Ijj = \frac{P_{m2} - jQ_{m2}}{V_{m2}}, \quad (1)$$

где Pm и Qm2 — активная и реактивная мощности в принимающем узле; Vm2 — напряжение узла; Ijj— ток в ветви.

Потери активной и реактивной мощности в линии рассчитываются по формулам:

$$\Delta Pjj = R_{jj} * \frac{P_{m2}^2 + Q_{m2}^2}{|V_{m2}|^2}, \quad (2)$$

$$\Delta Qjj = X_{jj} * \frac{P_{m2}^2 + Q_{m2}^2}{|V_{m2}|^2}, \quad (3)$$

где Rjj и Xjj— активное и реактивное сопротивления ветви.

Расчёт выполняется итерационно по всем участкам сети до достижения допустимой погрешности. Для каждого типа проводника kkk определяются значения токов, напряжений и потерь, после чего вычисляются суммарные потери активной мощности:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{jj=1}^{Nl} \Delta P_{jj.k}, \quad (4)$$

где Nl — число ветвей сети.

Экономическая оценка альтернатив основывается на сумме затрат на проводник и стоимости потерь электроэнергии:

$$F_{jj.k} = C_{jj.k}^{cap} + C_{jj.k}^{loss}. \quad (5)$$

Допустимость решения проверяется по ограничениям на минимальное напряжение и предельный ток:

$$|Vm2,k| \geq Vminn, \quad (6)$$

$$|Ijj,k| \leq Imax. \quad (7)$$

Таким образом, метод расчёта позволяет сформировать исходные данные для дальнейшей многокритериальной оценки альтернатив.

Для выбора наилучшего варианта проводников используется метод CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation), основанный на анализе вариативности критериев и степени их взаимной корреляции [7, с. 68853–68871]. Его применение позволяет определить веса критериев объективным способом, без привлечения экспертных оценок.

На первом этапе формируется матрица решений MMM, в которой строки соответствуют критериям, а столбцы — альтернативным вариантам проводников. Далее выполняется нормализация показателей:

$$z_{ji} = \frac{x_{ji} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}}. \quad (8)$$

После этого для каждого критерия рассчитывается информационная мера:

$$C_j = \sigma_j \sum_{l=1}^{m} (1 - r_{jl}), \quad (9)$$

где σj — стандартное отклонение критерия, rjl — коэффициент корреляции между критериями.

Вес критерия определяется как

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^{m} C_j}. \quad (10)$$

Интегральная оценка каждой альтернативы вычисляется по формуле:

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} w_j z_{ji}. \quad (11)$$

Наиболее предпочтительным признаётся вариант с минимальным значением Si, поскольку в рамках исследования критерии ориентированы на минимизацию затрат, потерь и отклонений режимных параметров. Алгоритм применения метода представлен в алгоритме 1 смотреть рисунок 3.



Алгоритм 1. Последовательность применения метода CRITIC для выбора проводников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования выполнена многокритериальная оценка вариантов выбора проводников для радиальной распределительной сети IEEE с 34 узлами. Постановка задачи была ориентирована на определение такой конфигурации сети, которая обеспечивала бы наилучшее сочетание режимных и экономических показателей. В качестве критериев рассматривались отклонения напряжения по узлам, потери активной и реактивной мощности, токовые параметры и стоимость реализации выбранной схемы.

Для вычислительного эксперимента было использовано 31 типоразмерное исполнение проводников, на основе которых сформировано 210 альтернативных сценариев проектирования. Все варианты были рассчитаны в среде MATPOWER, что позволило получить массив данных по режимным параметрам для последующего многокритериального ранжирования. Обработка результатов осуществлялась методом CRITIC, обеспечивающим объективное взвешивание критериев и выбор предпочтительной альтернативы.

Расчёты показали, что наилучший интегральный результат соответствует сценарию 210, в котором используется комбинация проводника варианта 10 для участков меньшего сечения и варианта 21 для магистральных ветвей. Для данного решения итоговая стоимость составила 640 условных единиц. При этом преимущество сценария 210 проявилось не по одному локальному параметру, а по совокупности критериев, что подтверждает корректность применения многокритериального подхода.

На рисунке 3 представлены профили отклонения напряжения по узлам сети для анализируемых вариантов. Полученные зависимости показывают, что улучшение параметров проводников на магистральных участках положительно влияет на распределение напряжения по всей структуре сети. Наилучшие профили формируются в сценариях с повышенной проводимостью основных ветвей, что особенно важно для удалённых узлов.

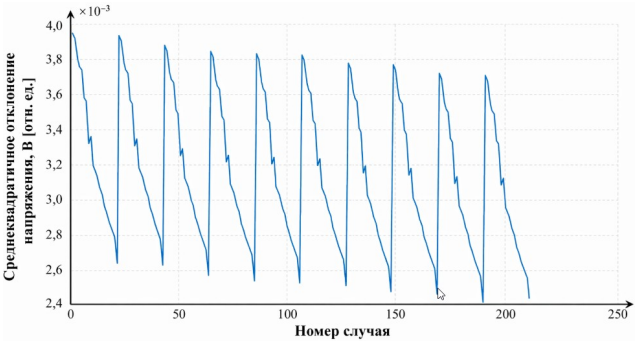


Рисунок 3. Отклонение напряжения по узлам для рассматриваемых сценариев

Итоговые значения взвешенных сумм, рассчитанные методом CRITIC для 210 сценариев, приведены на рисунке 4. Именно этот график позволяет увидеть общую картину ранжирования альтернатив и установить, что минимальное значение интегрального критерия соответствует сценарию 210. Следовательно, он является наиболее эффективным с точки зрения совокупного влияния технических и стоимостных факторов.

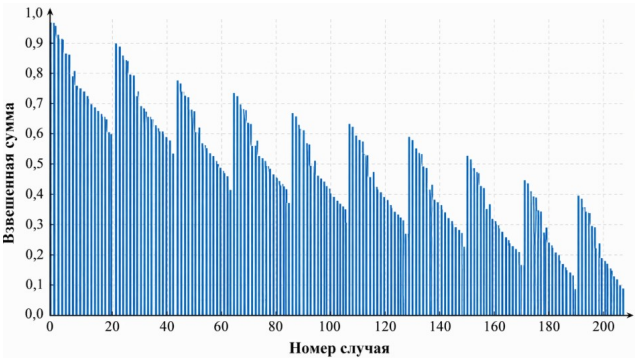


Рисунок 4. Взвешенные суммы для 210 сценариев исследования.

Особый интерес представляет сопоставление двух наиболее близких альтернатив — сценариев 209 и 210. Несмотря на минимальное различие итоговых оценок, анализ профилей напряжения показывает, что сценарий 210 обеспечивает более благоприятное распределение напряжения в сети. Это отражено на рисунке 5, где видно, что улучшение параметров проводников даже в пределах близких вариантов оказывает заметное влияние на качество напряжения. Следовательно, чувствительность метода достаточна для выявления различий между почти эквивалентными по стоимости и структуре решениями.

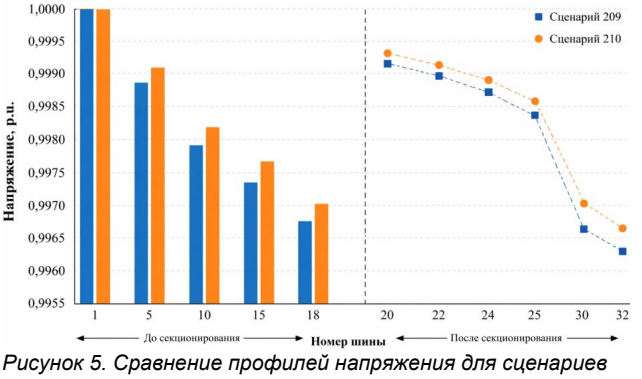


Рисунок 5. Сравнение профилей напряжения для сценариев 209 и 210.

Дополнительная оценка потерь активной мощности подтвердила преимущество выбранной конфигурации. По мере перехода к лучшим вариантам проектирования наблюдается тенденция к снижению потерь, причём минимальное значение также соответствует сценарию 210. Это означает, что выбранная альтернатива не только улучшает напряжённый режим сети, но и повышает её энергетическую эффективность, сокращая эксплуатационные издержки, связанные с потерями электроэнергии. Соответствующая динамика представлена на рисунке 6.

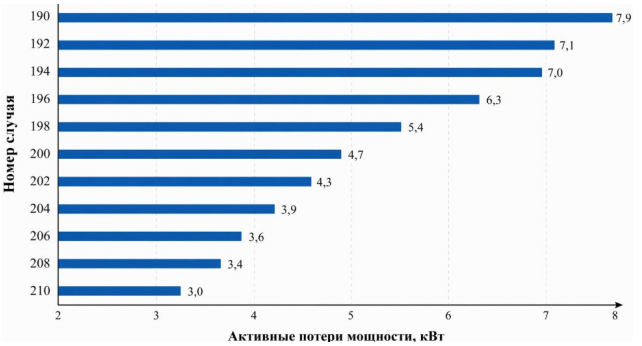


Рисунок 6. Потери активной мощности по сценариям исследования

Сопоставление лучших альтернатив по ключевым критериям сведено в таблицу 1. Из неё следует, что сценарий 210 характеризуется наименьшими потерями активной и реактивной мощности, а также минимальным отклонением напряжения, хотя и обладает несколько большей стоимостью по сравнению с ближайшими вариантами. Однако разница в цене между сценариями 189 и 210 составляет лишь одну условную единицу, тогда как выигрыш по режимным характеристикам делает последний вариант более предпочтительным.

Таблица 1
Сравнение лучших альтернатив для 34-узловой системы

Сценарий	Отклонение напряжения	Активные потери, кВт	Реактивные потери, кВА	Стоимость
147	0,0314	3,2375	14,7975	637
168	0,0313	3,2242	14,7208	638
189	0,0307	2,9701	14,7190	639
210	0,0305	2,9603	14,6563	640

Для проверки устойчивости предложенной методики она была дополнительно апробирована на радиальной 13-узловой системе. Несмотря на меньшее число критериев отбора и более компактную топологию, алгоритм вновь выявил сценарий 210 как наилучший вариант по напряжению и потерям. Это свидетельствует о воспроизводимости результатов и возможности применения метода в сетях разного масштаба. Время расчёта для этой системы составило около 9,5 с, что подтверждает вычислительную приемлемость предложенного подхода.

Основные результаты для 13-узловой системы приведены в таблице 2.

Таблица 2
Лучшие альтернативы для 13-узловой системы

Сценарий	Отклонение напряжения	Активные потери, кВт	Реактивные потери, кВА	Стоимость
190	0,0183	0,9261	2,0622	10,000
198	0,0157	0,5771	1,9485	78,5714
210	0,0120	0,2429	1,6564	181,42

На рисунке 7 показан профиль напряжения, полученный для 13-узловой системы в оптимальном сценарии. Видно, что даже при последовательном снижении напряжения по мере удаления от узла питания выбранная конфигурация обеспечивает наиболее устойчивый режим по сравнению с альтернативами.

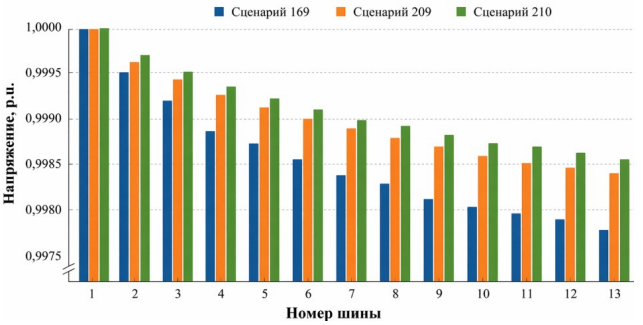


Рисунок 7. Профиль напряжения для лучшего сценария в 13-узловой системе.

Таким образом, результаты исследования показывают, что применение многокритериального подхода, основанного на совместном использовании расчёта потокораспределения и метода CRITIC, позволяет выявлять

проектные решения, обеспечивающие рациональный компромисс между стоимостью, уровнем потерь и качеством напряжения. В обеих исследованных системах — 34-узловой и 13-узловой — наилучшей признана альтернатива 210, что подтверждает устойчивость предложенной методики и её применимость для задач выбора проводников при проектировании распределительных электрических сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подтвердило, что многокритериальный подход к выбору проводников и построению распределительных электрических сетей обладает высокой методической и практической значимостью при проектировании систем передачи электроэнергии. Применение метода CRITIC позволяет сопоставлять разнородные технические и экономические показатели в едином аналитическом пространстве, что делает возможной комплексную оценку проектных альтернатив по напряжению, потерям мощности и стоимости.

Предложенный подход расширяет традиционные методы оптимизации, поскольку ориентирован не на выбор единственного типоразмера проводника для всей сети, а на формирование более гибкой конфигурации с учётом различий между магистральными и ответвительными участками. Это повышает точность проектных решений и обеспечивает более обоснованный выбор структуры сети. Несмотря на анализ значительного числа сценариев и критериев, метод сохраняет вычислительную эффективность, что подтверждает его пригодность для задач планирования.

Результаты расчётов показали, что наилучшей альтернативой является сценарий 210, для которого достигнуто наиболее благоприятное сочетание минимального отклонения напряжения, сниженных потерь активной и реактивной мощности и приемлемого уровня затрат. Хотя данный вариант характеризуется наибольшей стоимостью среди ближайших альтернатив, улучшение режимных параметров и повышение общей эффективности сети подтверждают его оптимальность с многокритериальной точки зрения.

Вместе с тем следует отметить, что экономическая составляющая модели в данном исследовании представлена в укрупнённом виде, через штрафную оценку применения проводников большего сечения. В дальнейшем целесообразно дополнить методику детализированным расчётом капитальных и эксплуатационных затрат на основе реальных стоимостных данных. Кроме того, веса критериев могут быть адаптированы в зависимости от приоритетов проектировщика или сетевой компании. Это означает, что при усилении значимости стоимостного критерия итоговый выбор может измениться, что подтверждает гибкость предложенного подхода и его применимость к различным условиям проектирования.

Литература

1. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.
2. Ананичева, С. С. Проектирование электрических сетей : учебное пособие / С. С. Ананичева, Е. Н. Котова. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с.
3. Гусев, Ю. П. Разработка усовершенствованной методики выбора параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях / Ю. П. Гусев, П. В. Субботин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 48–61.
4. Линь, Т. Метод планирования структуры высоковольтной распределительной сети, основанный на оптимальном разделении блоков питания / Т. Линь, Г. Ву, Дж. Чжэн [и др.] // Материалы 4-й конференции IEEE 2020 года по интеграции энергетического Интернета и энергетических систем (EI2), Ухань, Китай, 30 октября — 1 ноября 2020 г. — New York, NY : IEEE, 2020. — С. 4021–4026.
5. Паздерин, А. В. Потоковая модель оценивания состояния и оптимизации режимов работы распределительных сетей / А. В. Паздерин, Н. Д. Мухлынин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2016. — № 9–10. — С. 3–15.
6. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. — Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2019. — 576 с.
7. Aguila, A. T. Optimal location of reclosers in electrical distribution systems considering multicriteria decision through the generation of scenarios using the Montecarlo method / A. T. Aguila, L. M. Ortiz, M. Ruiz [et al.] // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 68853–68871.
8. Chen, Q. Research on optimal planning of distribution network with multi-microgrids based on the improved minimum spanning tree algorithm / Q. Chen, W. Hao, P. Zeng // Proceedings of the 2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE), Shanghai, China, 21–23 October 2022. — New York, NY : IEEE, 2022. — P. 7–12.
9. Montoya, O. D. Optimal conductor size selection in radial distribution networks using a mixed-integer nonlinear programming formulation / O. D. Montoya, A. Garces, C. A. Castro // IEEE Latin America Transactions. — 2018. — Vol. 16. — P. 2213–2220.
10. Ponce, D. Optimal selection of conductors in distribution system designs using multi-criteria decision / D. Ponce, A. Aguila Téllez, N. Krishnan // Energies. — 2023. — Vol. 16. — Art. 7167.

A multi-criteria approach to the selection of conductors and the construction of distribution electrical networks in the design of power transmission systems

Golovnya I.I.
Irkutsk National Technical Research University

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

This article examines the selection of conductors and the configuration of distribution networks for power transmission systems designed to meet growing electrical loads caused by urbanization and industrial expansion. The relevance of this study lies in the need to develop design solutions that not only reduce capital and operating costs but also improve reliability, energy efficiency, and power supply quality. The aim of this study is to substantiate a multi-criteria approach to selecting the optimal distribution network design option, taking into account a combination of technical, economic, and operational parameters. A multi-methodology for decision making based on the CRITIC method is proposed as a methodological basis, allowing for an objective determination of the significance of the analyzed criteria. To evaluate alternatives, design scenarios with different conductor types were generated, for each of which a power flow distribution calculation was performed. Based on the modeling results, voltage profiles, active and reactive power losses, current loads, and costs associated with the use of the corresponding conductors were determined. The proposed approach was tested on a 34-node IEEE test system using the MATPOWER software package in the Matlab environment. Based on a decision matrix comprising 210 alternatives, the option providing the best overall combination of quality, efficiency, and cost criteria was identified. The results confirm that the multi-criteria approach is an effective tool for supporting design decisions in the development of distribution power grids.

Keywords: multicriteria analysis, conductor selection, electrical distribution networks, electric power system design, radial networks, power flow distribution, CRITIC method, MATPOWER modeling, power losses, voltage profile.

References

1. RD 153-34.0-20.527-98. Guidelines for Calculating Short-Circuit Currents and Selecting Electrical Equipment.
2. Ananicheva, S. S. Design of Electrical Networks: A Tutorial / S. S. Ananicheva, E. N. Kotova. - Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2017. - 164 p.
3. Gusev, Yu. P. Development of an Improved Methodology for Selecting Parameters and Locations for Electric Power Storage Systems in Distribution Electrical Networks / Yu. P. Gusev, P. V. Subbotin // Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering. - 2019. - Vol. 19, No. 2. - P. 48-61.
4. Lin, T. A Method for High-Voltage Distribution Network Structure Planning Based on Optimal Power Supply Separation / T. Lin, G. Wu, J. Zheng [et al.] // Proceedings of the 2020 IEEE 4th Conference on Integration of Energy Internet and Power Systems (EI2), Wuhan, China, October 30 - November 1, 2020. - New York, NY : IEEE, 2020. - Pp. 4021-4026.
5. Pazderin, A. V. A Flow Model for Estimating the State and Optimizing the Operating Modes of Distribution Networks / A. V. Pazderin, N. D. Mukhlynin // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. - 2016. - No. 9-10. - Pp. 3-15. 6. Energy: Management, Quality, and Efficiency of Energy Resources Use: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference. Blagoveshchensk: Amur State University, 2019, 576 p.
7. Aguila, A. T. Optimal Location of Reclosers in Electrical Distribution Systems Considering Multicriteria Decisions Through the Generation of Scenarios Using the Montecarlo Method / A. T. Aguila, L. M. Ortiz, M. Ruiz [et al.] // IEEE Access. - 2023. - Vol. 11. - P. 68853–68871.
8. Chen, Q. Research on optimal planning of distribution network with multi-microgrids based on the improved minimum spanning tree algorithm / Q. Chen, W. Hao, P. Zeng // Proceedings of the 2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE), Shanghai, China, October 21–23, 2022. — New York, NY : IEEE, 2022. — P. 7–12.
9. Montoya, O. D. Optimal conductor size selection in radial distribution networks using a mixed-integer nonlinear programming formulation / O. D. Montoya, A. Garces, C. A. Castro // IEEE Latin America Transactions. — 2018. — Vol. 16. - P. 2213–2220.
10. Ponce, D. Optimal selection of conductors in distribution system designs using multi-criteria decision / D. Ponce, A. Aguila Téllez, N. Krishnan // Energies. — 2023. — Vol. 16. - Art. 7167.