

УДК 621.311.44

Н.Е. ПЕШЕХОНОВ, кандидат
технических наук, доцент
В.В. РЫБАКОВ, кандидат
технических наук
А.Е. ВОРОНИН, кандидат
технических наук

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ КОЛЬЦЕВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены основные направления экономии электроэнергии в распределительных сетях систем электроснабжения рассредоточенных объектов. Определены оптимальные по экономии электроэнергии режимы работы сетей. Представлены пути увеличения их энергоэффективности. Показана возможность применения генетических алгоритмов для определения оптимальных точек разрыва.

Ключевые слова: потери электроэнергии, кольцевые линии, баланс мощностей, точка разрыва, генетические алгоритмы.

Потери энергии характерны для всех систем распределения электроэнергии главным образом благодаря потерям активной мощности в линиях и трансформаторах.

Правильное проектирование и эксплуатация электрических систем позволяют не только свести к минимуму потери энергии, но и обеспечивают снижение затрат на электроэнергию. Потеря мощности – один из важнейших экономических и технических показателей функционирования систем электроснабжения (СЭС). Их величина отражает техническое состояние и уровень эксплуатации всех элементов СЭС, состояние систем учета и метрологическое обеспечение парка измерительных приборов. В международной практике принято считать, что общие потери мощности при ее передаче и распределении удовлетворительны, если они не превышают 4-5%. Потери мощности на уровне 10% оценивают, как максимально допустимые с точки зрения физических процессов передачи электроэнергии по сетям.

Мероприятия по снижению электрических потерь можно разделить на две группы: технические и организационные. Организационные мероприятия дополнительных материальных средств и трудозатрат не требуют. Технические мероприятия, такие как применение установок для компенсации реактивной мощности, замена загруженных трансформаторов и т.д., требуют дополнительных средств.

Достаточно часто в результате длительной эксплуатации систем электроснабжения изменяются как условия эксплуатации, так и технические характеристики элементов СЭС, что приводит к снижению качества их функционирования, увеличению потерь электроэнергии. Данные проблемы могут быть решены проведением модернизации СЭС с изменением структуры электросетей, заменой элементов и узлов оборудования на современные.

Пути повышения энергоэффективности

Очевидно, что функционирование систем электроснабжения имеет свою специфику, поэтому при акцентировании усилий на энергосбережение необходимо это учитывать. В этой связи рассмотрим более детально снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях 10 (6) кВ.

Снижение потерь электроэнергии при ее передаче и распределении является актуальной задачей организаций и одним из основных направлений энергосбережения [1]. Основным условием работы электрической сети с минимальными потерями является ее рациональное построение. При этом особое внимание должно быть уделено правильному определению точек деления в замкнутых сетях, экономичному распределению активных и реактивных мощностей, внедрению замкнутых и полузамкнутых схем сетей.

Потери энергии в рационально построенных и нормально эксплуатируемых сетях не должны превышать обоснованного технологического расхода энергии при ее передаче и распределении. Мероприятия по снижению потерь энергии должны проводиться в сетях, где есть те или иные отклонения от рационального построения и оптимального режима эксплуатации [2].

Применение современных математических методов расчета позволяет минимизировать технологические расходы электроэнергии и довести их до технически обоснованных величин. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях может быть достигнуто как в результате проведения мероприятий по общей оптимизации сети, когда снижение потерь энергии является одной из составляющих частей комплексного плана, так и в результате проведения мероприятий, направленных только на снижение потерь.

К организационным мероприятиям могут относиться:

- определение (выбор) точек оптимального деления сети 10 (6) кВ;
- уменьшение времени нахождения линии в отключенном положении при выполнении технического обслуживания и ремонта оборудования и линий;
- снижение несимметрии (неравномерности) загрузки фаз;
- рациональная загрузка силовых трансформаторов.

В данной статье мероприятия, связанные с экономией электроэнергии в силовых трансформаторах, рассматриваться не будут. Более подробно остановимся только на определении точек оптимального деления сети (точек разрыва).

Определение оптимальных точек разрыва (точек с минимально возможными потерями электроэнергии) в замкнутых сетях производится на основе анализа результатов электрического расчета сети. В настоящее время электрические сети 10 (6) кВ, как правило, эксплуатируются по разомкнутым схемам с возможностью взаимного резервирования. В этих условиях основным средством оптимизации режима эксплуатации сетей, обеспечивающим надежность электроснабжения и минимальные потери мощности и энергии электрических сетей без дополнительных капиталовложений, является правильный выбор точек разрыва, под которыми понимают места размыкания сети. Их положение обуславливает конфигурацию электрических сетей и должно обеспечивать токораспределение, максимально приближающееся к экономичному. В большинстве случаев на практике положение мест размыкания определяется эмпирически, на основе личного опыта и интуиции обслуживающего персонала так, чтобы они обеспечивали необходимые условия эксплуатации и возможность скорейшего восстановления электроснабжения при аварии.

Известно, что большая часть потерь активной мощности приходится на распределительные сети 0,4...10 кВ. Потери активной мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) [3]

$$\Delta P_{л} = 3 \cdot I_{л}^2 \cdot R_{л}, \quad (1)$$

где $I_{л}$ – ток в линии; $R_{л}$ – сопротивление одной фазы линии.

Ток в линии и ее сопротивление можно определить с использованием выражений:

$$I_{л} = P_{л} / (\sqrt{3} \cdot U_{л.ном} \cdot \cos \varphi), \quad (2)$$

$$R_{л} = \rho \cdot l_{л} / F_{л}, \quad (3)$$

где $P_{л}$ – активная мощность нагрузки, передаваемая по линии, кВт; $U_{л.ном}$ – номинальное напряжение сети, кВ; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; ρ – удельное электрическое сопротивление токопроводящего материала, ом*мм²/м; $l_{л}$ – длина линии, м; $F_{л}$ – сечение линии, мм².

С учетом вышеизложенного, потери мощности в линиях будут определяться по выражению:

$$\Delta P_{л} = \frac{\rho \cdot l_{л} \cdot P_{л}^2}{(U_{л.ном}^2 \cdot F_{л} \cdot \cos^2 \varphi)}. \quad (4)$$

Как известно, из-за сложностей построения релейной защиты кольцевую схемы принято «разрывать» в одном месте. От места разрыва кольцевой схемы зависят потери в линиях. При сравнительно небольшом количестве возможных точек разрыва используют метод прямого перебора, при этом использование сравнительно простых программ в среде Excel значительно облегчает этот процесс.

В сложных сетях (рисунок 1), когда количество разрывов должно быть несколько, этот метод не всегда работает, так как требует большого количества вычислений или применения специальных методов. При этом необходимо также учитывать ограничения по пропускной способности линий и по допустимой потере напряжения.

Определение оптимальных точек разрыва

Необходимо уточнить понятие «точка разрыва». Точкой разрыва будем считать разомкнутый коммутационный аппарат отходящей от трансформаторной подстанции (ТП) линии электропередачи. ЛЭП при

этом находится под напряжением, так как только один из коммутационных аппаратов на одной из ТП разомкнут. Передача мощности по линии не осуществляется.

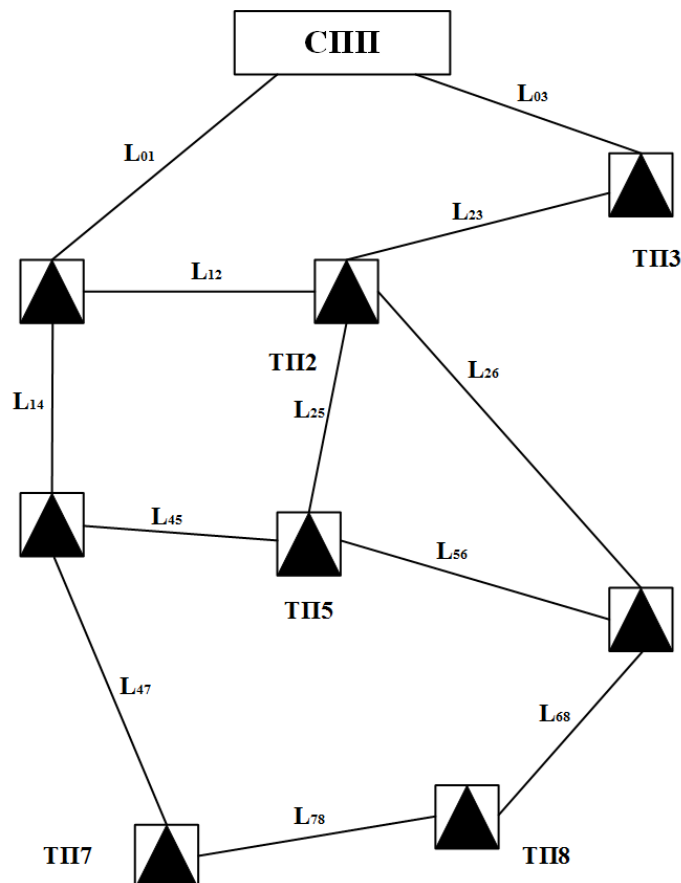


Рисунок 1 – Блок-схема кольцевой системы электроснабжения

На представленной блок-схеме (рисунок 1) возможная комбинация вариантов точек разрыва и соответственно количество вариантов подключения ТП к сетевой понижительной подстанции (СПП) значительное, поэтому решить эту задачу представляется возможным с использованием генетических алгоритмов. Как известно, основная сложность применения генетических алгоритмов состоит в формализации задачи и приведения ее к необходимому виду.

В генетических алгоритмах необходимо определиться и формализовать следующие понятия: функция жизнеспособности, популяция, особь, которая в свою очередь характеризуется геном [4]. Также все промежуточные варианты построения структуры должны проверяться по пропускной способности линий, по потерям напряжения до тупиковой

ТП, по отсутствию ТП, получающей питание с двух источников. Необходимо также проверка оптимального варианта на предмет выполнения требований по надежности электроснабжения. В данном случае будем считать это ограничением и рассматривать только варианты, которые выполняют соответствующие требования.

На рисунке 1 помечены длины соответствующих линий, которые соединяют ТП. Для потоков мощности примем такие же обозначения: P_{12} – мощность, передаваемая по линии 12 от ТП1 к ТП2; P_1 – мощность, потребляемая ТП1. Мощность ТП, длины линий и их сечение являются исходными данными, так как точки разрыва определяются для существующей структуры СЭС. Отметим, что в одной и той же линии в различных вариантах поток мощности может иметь разные величины и направления. Примем условно поток мощности со знаком плюс, если он направлен от ТП с меньшим номером к ТП с большим номером, со знаком минус, если наоборот. При наличии точки разрыва мощность по линии не передается и соответственно мощность равна нулю.

Таким образом, за отдельный ген примем линию электропередачи, состояние которой будет характеризоваться режимами работы 1, -1, 0 («1» – передача мощности от ТП с меньшим номером к ТП с большим номером, «-1» – передача мощности от ТП с большим номером к ТП с меньшим номером, «0» – линия на холостом ходу). При этом величину передаваемой мощности необходимо определять для каждой линии в ходе рассмотрения отдельного варианта при определении функции жизнеспособности. Очевидно, что любой вариант функционирования структуры СЭС можно охарактеризовать режимами линий электропередачи. Пример описания представленной на рисунке 1 структуры СЭС показан в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы работы линий электропередачи

№ ЛЭП	01	03	12	23	14	25	26	45	56	47	78	68
Состояние	1	1	0	1	1	0	1	0	-1	1	0	1

Данный вариант удовлетворяет требованию одностороннего питания для всех ТП. Он характеризуется набором состояний ЛЭП (генами). Представленная таблица позволяет от отдельного гена перейти к особи – варианту функционирования СЭС с заданными выше ограничениями к структуре (жизнеспособная особь), если ограничения не выполняются,

то особь не жизнеспособная и должна исключаться из дальнейшего рассмотрения. Вариантов, которые имеют различные точки разрыва для представленной схемы, может быть достаточно большое количество. Суммарные потери электроэнергии в линиях с учетом выражения для потерь мощности в отдельной линии (4) определяются по выражению:

$$\Delta W_{\text{лЭП}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot \tau_i, \quad (5)$$

где ΔP_i – потери мощности в i -й линии; τ_i – время потерь для i -й линии.

Задача состоит в том, чтобы определить вариант с наименьшими суммарными потерями электроэнергии в линиях электропередачи.

Выражение (5) называется функцией жизнеспособности отдельной особи. Вычисление этой функции позволяет характеризовать рассматриваемый вариант (особь) и сравнивать его с другими вариантами (особями).

Анализируемое множество вариантов (их количество задается при формировании начального множества) называется популяцией. Рассматриваемую популяцию можно характеризовать матрицей, которая определяет характеристику каждой особи (строка матрицы):

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Последовательность применения генетического алгоритма заключается в том, что после формирования исходной популяции определяют значение функции жизнеспособности каждой особи и особи, которые имеют низкое значение функции жизнеспособности, исключаются из дальнейшего рассмотрения, после этого формируется новая популяция. Новые особи могут получаться из существующих путем скрещивания, случайными мутациями и т.п. После проверки вновь полученных особей на жизнеспособность (выполнение ограничений) формируется новая популяция и вычисляются значения функции жизнеспособности, затем процесс повторяется. Условием окончания процесса принима-

ются разность значений целевой функции на предыдущем и последующем этапах или количество поколений, которое задается на этапе формирования исходных данных [5].

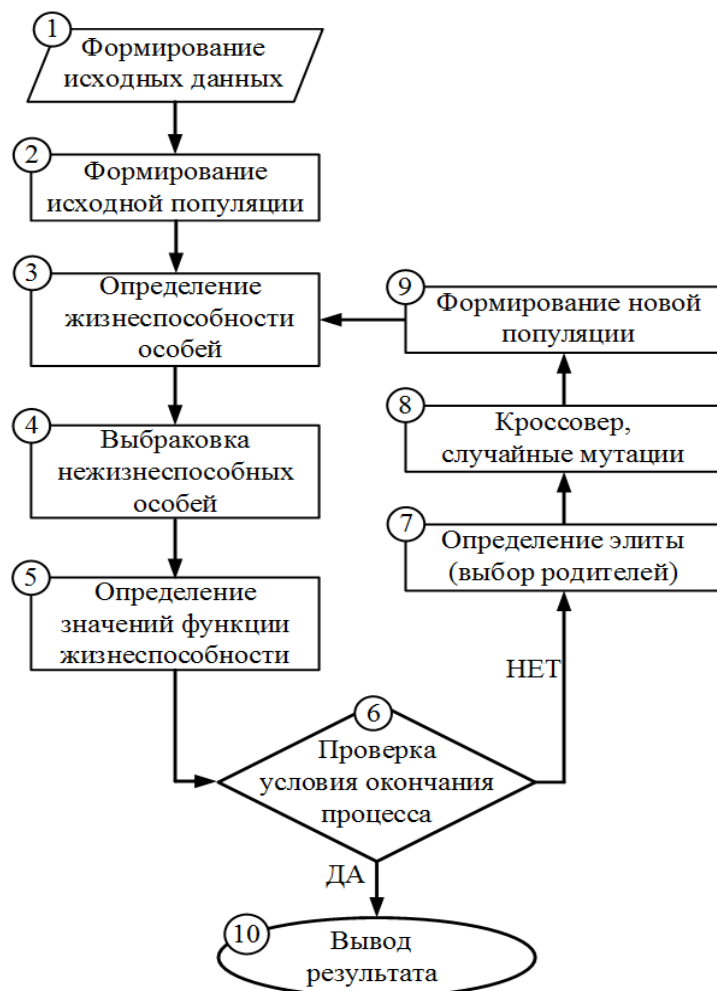


Рисунок 2 – Алгоритм определения точек разрыва

В общем случае алгоритм решения задачи определения оптимальных точек разрыва с использованием генетических алгоритмов представлен на рисунке 2. Необходимо уточнить, что блок №2 может быть реализован различными способами. Самый очевидный, но не самый простой, это в результате анализа схемы СЭС (рисунок 1) сформировать несколько вариантов точек разрыва и в дальнейшем использовать их в качестве исходной популяции. Такой способ достаточно затратный с точки зрения временных ресурсов, так как для исходной популяции требуется несколько десятков особей. Другой подход, как пра-

вило, применяется при составлении программного обеспечения и заключается в генерировании произвольных точек разрыва (особей), которые затем проверяются на выполнение ограничений (на жизнеспособность) и в дальнейшем используются для исходной популяции только жизнеспособные особи.

Одной из особенностей генетического алгоритма является то, что наилучшее значение функции жизнеспособности не потеряется в результате перехода к следующей популяции, так как на каждом этапе смены популяций используется «элита» плюс вновь полученные особи.

В качестве решения задачи имеется возможность получить несколько вариантов, а лицо, принимающее решение, будет выбирать из них, используя дополнительные критерии.

Предложенный подход к определению точек разрыва в сложно замкнутых сетях позволяет найти такой режим работы линий электропередачи между трансформаторными подстанциями, при котором потери электроэнергии в линиях будут минимальны. При изменении режимов работы трансформаторных подстанций (графиков нагрузок) предложенная методика позволяет определить новые оптимальные (с точки зрения минимума потерь электроэнергии) точки разрыва. Представленный алгоритм может быть реализован в среде MatLAB с использованием встроенных функций, реализующих генетические алгоритмы.

Список использованных источников

1. Пилипенко Н.В., Сиваков И.А. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности инженерных систем и сетей. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 274 с.
2. Лыкин А.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. Новосибирск: НГТУ, 2013. 115 с.
3. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: НЦЭНАС, 2002. 208 с.
4. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
5. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Нижний Новгород: НГУ, 2007. 85 с.