

Т. Л. Кацадзе, к. т. н., доц.

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ РЕЖИМОВ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Статья посвящена исследованию возможности использования аппарата генетических алгоритмов в решении задач оптимизации режимов неоднородных электрических сетей. Предложена математическая модель принятия решений по рациональному регулированию режимов электроэнергетических систем с высокой степенью неоднородности сетей.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, неоднородность, принятия решений, оптимизация, интеллектуальный поиск, генетический алгоритм.

Введение

Современные электроэнергетические системы объединяют в своём составе электрические сети разных классов номинального напряжения, состоящие из линий электропередач воздушного и кабельного исполнений, выполненных проводами разного сечения с различным взаимным расположением проводов в пространстве и т. д. Перечисленные факторы определяют неоднородность электрических сетей электроэнергетических систем. Формально неоднородность электрических сетей определяют различием импедансных углов участков электрической сети. Известно, что неоднородность электрических сетей связана с дополнительными паразитными перетоками мощности в электрической системе, вызывающими дополнительные потери мощности и ухудшающими технико-экономические показатели работы электроэнергетической системы. К тому же паразитные потоки мощности в замкнутых контурах неоднородных электрических сетей разгружают линии электропередачи высших классов номинального напряжения и перегружают электропередачи низшего напряжения, что приводит к неэффективному использованию электрических сетей сверхвысокого номинального напряжения и снижению пропускной способности электрической сети в целом [1 – 4].

На данный момент известен целый спектр средств, направленных на частичную или полную компенсацию неоднородности электрических сетей, в том числе изменение геометрических характеристик воздушных линий электропередачи, использование устройств продольной компенсации параметров электропередач, использование дополнительных источников реактивной мощности, применение фазоповоротных трансформаторов и линейных регуляторов, изменение коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов, а также другие современные технологии гибких электропередач [1, 5, 6]. Насыщенность электрических сетей разнообразными средствами компенсации неоднородности определяет задачу их рационального использования. Тут следует рассматривать оптимизационную задачу минимизации некоторой функции параметров устройств компенсации, которая определяет наименьшие возможные затраты ресурсов на оправданную компенсацию неоднородности электрических сетей. Традиционные методы решения таких задач базируются на минимизации технико-экономических показателей функционирования электрических систем, например, суммарных потерь активной мощности, затрат условного топлива на электрических станциях, дисконтированных приведенных затрат на строительство и эксплуатацию электрической сети и т. п. [1, 6, 7]. Укажем, что использование традиционных методов оптимизации многофакторных функций ограничено рядом факторов. Так, принятая практика технико-

экономического обоснования решений на основе экономических показателей базируется на объективизированных косвенных показателях функционирования энергосистем и не обеспечивает всестороннего оценивания альтернативных вариантов возможных решений [8]. К тому же следует иметь ввиду дискретный характер целевой функции, что требует использования дополнительных приёмов при решении оптимизационной задачи.

Материалы и результаты исследований

Задачу принятия решения по выбору оптимального состава и параметров устройств компенсации неоднородности электрических сетей в общем случае можно представить как задачу поиска оптимального (или приемлемого) решения в многофакторном пространстве состояний. Тут использование моделей интеллектуального поиска [9] ограничено рядом факторов. Методы неинформативного (слепого) поиска гарантируют определение оптимального решения поставленной задачи только после полного перебора и сравнения всех возможных решений. Однако вследствие высокой размерности многофакторного пространства поиска использование таких методов часто связано с проблемой комбинаторного и в реальных условиях не может быть реализовано. Другая группа эвристических методов базируется на искусственном ограничении пространства поиска и дальнейшем сопоставлении экономической эффективности ограниченного объёма альтернативных решений. «Слабым звеном» в использовании эвристических методов поиска является человеческий фактор, когда недостаток практического опыта принимающего решение человека приводит к тому, что наиболее перспективное решение может оказаться откинутым ещё на предварительном этапе искусственного ограничения пространства поиска.

Генетические алгоритмы, предлагаемые автором для решения задачи оптимизации режима неоднородной электрической сети в многомерном пространстве поиска [10 – 13], существенной мерой лишены указанных недостатков. Классический генетический алгоритм, предложенный Дж. Голландоти, имитирует адаптацию популяции к заданной функции приспособленности. При этом под приспособленностью генотипа понимают среднее количество потомков, рожденных за время жизни особи данного генотипа в определенных условиях окружающей среды. В общем случае процесс работы классического генетического алгоритма представляет собой последовательную смену популяций (поколений), состоящих из фиксированного количества особей. Чем больше значение фитнес-функции особи, тем больше шансов она имеет оставить потомков в следующем поколении и тем больше приспособленность соответствующего генотипа (этот принцип легко адаптируется применительно к задачам минимизации). При формировании следующего поколения часть потомков полностью идентична родительским особям, а часть меняется некоторым случайным образом под действием операторов мутации и кроссинговера (скрещивания). Очевидно, что классический генетический алгоритм легко приспособить к решению оптимизационных задач, в частности задач поиска оптимального состава параметров устройств компенсации неоднородности электрических сетей.

Основная идея предлагаемого подхода состоит в представлении характеристик и свойств возможных решений с помощью двоичного кода и формировании вектора, содержащего бинарные цепочки свойств варианта решения. Очевидно, что такой вектор в определенной степени соответствует упрощенной математической модели генотипа биологического организма, содержащего полную информацию об этом организме. Указанное обстоятельство позволяет применить основные генетические операции скрещивания, приводящие к формированию новых решений с новыми свойствами.

Здесь формируют оценочную функцию, определяемую параметрами устройств компенсации неоднородности, которая соответствует оценке приспособляемости биологического организма к условиям окружающей среды. Формирование возможных

решений осуществляют циклически на основании предыдущих поколений с использованием генетических операций кроссинговера (скрещивания), инверсии и мутации, применяемых случайным образом по стохастическим законам. При этом приоритет при скрещивании имеют решения, характеризующиеся наибольшими значениями оценочной функции эффективности, что гарантирует постепенное улучшение качества предлагаемых решений.

Использование генетических алгоритмов поиска гарантирует рассмотрение различных, зачастую не типичных решений представленных задач [11 – 14], что является основным преимуществом предлагаемого автором подхода. Укажем также еще на некоторые дополнительные положительные свойства методов генетического поиска [12]:

- 1) простота и прозрачность реализации;
- 2) возможность распараллеливания процесса поиска;
- 3) простота кодирования и декодирования информации;
- 4) пониженная вероятность заикливания процесса поиска в локальных оптимумах.

Вместе с тем использование генетических алгоритмов поиска оптимального решения связано со следующими недостатками методов, которые необходимо учитывать в процессе решения практических задач:

- 1) высокая итеративность алгоритмов;
- 2) существенная зависимость эффективности генетического поиска от его параметров;
- 3) высокая вероятность преждевременной сходимости циклического поиска.

Математические модели метода

Решение задач принятия решений по определению состава и параметров устройств компенсации неоднородности электрических сетей с использованием аппарата генетических алгоритмов заключается в последовательном выполнении следующих основных процедур [11 – 14].

1. Определение состава ограничений, определяющих прагматические аспекты функционирования электроэнергетической системы и формирования состава признаков, характеристик и свойств, позволяющих персонифицировать различия между порождаемыми проектными решениями.

2. Определение способа кодирования генетической информации, определяющей характеристики конкретного возможного решения. Здесь каждый атрибут устройств компенсации неоднородности кодируют битовой бинарной цепочкой (вектором) – хромосомой

$$h = \frac{x - \min}{(\max - \min)(2^n - 1)},$$

где x – числовое значение параметра устройства компенсации неоднородности в формате с плавающей запятой; \min , \max – минимальное и максимальное значения параметра соответственно; n – длина хромосомы, то есть количество бит бинарного вектора для хранения закодированного атрибутивного параметра.

Объединение всех хромосом, определяющих свойства возможного решения, образует геном, содержащий всю генетическую информацию в целом. Здесь для формирования бинарных цепочек обычно используют код Грея, обеспечивающий единичное расстояние Хемминга между смежными значениями параметров решений, что гарантирует отсутствие порождения «тупиков» в поисковом процессе [11].

3. Формирование оценочной фитнес-функции, определяющей целесообразность и эффективность порождаемых решений

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

где x_1, x_2, \dots, x_m – варьируемые параметры, определяющие конкретное решение.

В качестве оценочной может быть использована функция приведенных дисконтированных затрат, определяющая экономическую эффективность предлагаемого решения, функция суммарных потерь мощности или расхода условного топлива на электростанциях и т. п. Ранее было отмечено, что принятые в практике экономические критерии эффективности решений являются объективизированными и не отражают в полной мере оценку целесообразности предлагаемого решения. Здесь, по мнению автора, могут быть использованы другие критерии эффективности, моделирующие, например, вербальные оценки качества порождаемых решений и построенные с использованием аппарата нечеткой логики [9, 13].

4. Определение состава исходной популяции возможных решений и заполнения с помощью генератора случайных чисел их генотипов.

5. Расчет значений фитнес-функции эффективности предложенных решений текущего поколения, а также среднего значения фитнес-функции всей популяции в целом. Здесь также рассматривают вопрос о достижении сходимости генетического алгоритма. Дальнейшие процедуры выполняют при отсутствии сходимости.

6. Селекция генетического материала, направленная на выбор предлагаемых решений, характеризующихся высокими значениями фитнес-функции. В результате выполнения операции селекции формируют родительские пары предлагаемых решений. При этом приоритет имеют решения, которые характеризуются высокими значениями фитнес-функции.

7. Реализация операции кроссинговера, заключающейся в скрещивании информационных цепочек генетического материала всех родительских пар и формировании дочерних решений, наследующих характеристики обоих «родителей». Здесь случайным образом определяется тип кроссинговера и точки разрыва геномов при формировании дочернего генотипа.

8. Реализация операции мутации, заключающейся в случайном изменении генотипа дочерних элементов, определенных на предыдущем этапе выполнения алгоритма. Здесь случайным образом определяется тип мутации (простая мутация или инверсия). В случае простой мутации случайно определяется ген, который меняет свое бинарное значение на противоположное. Инверсия состоит в случайном определении двух точек разрыва и «переворачивании» части генома дочернего элемента между этими точками.

9. Определение случайным образом элемента популяции, замещаемого образованным дочерним генотипом в следующем поколении. Здесь приоритет в замещении имеют решения, характеризующиеся наименьшими значениями фитнес-функции.

Далее управление будет передано процедуре 5 для выполнения очередного шага генетического алгоритма и формирования нового поколения возможных решений.

Отметим, что рассмотренный алгоритм не является единственно возможным, часто используют различные его модификации, например, на этапе выполнения селекции состав родительских пар можно определять путем отбрасывания наименее эффективных решений или методом организации турниров.

Существенной проблемой, связанной с использованием генетических алгоритмов в задачах оптимизации режимов неоднородных электрических сетей, является настройка алгоритма. Здесь выбору подлежат такие характеристики алгоритма, как количество элементов начальной популяции; продолжительность жизненного цикла элементов; способ формирования родительских пар на каждом этапе работы алгоритма; определение вероятностных настроек операций кроссинговера и мутаций и тому подобное. Задача настройки генетического алгоритма является многофакторной и не имеет типового однозначного решения. Так, например, пониженное значение объема популяции

характеризуется недостаточным разнообразием генотипов и может привести к преждевременной сходимости алгоритма к локальному оптимуму, не соответствующему желаемому решению задачи оптимизации. Наоборот, чрезмерно завышенное количество элементов популяции часто приводит к неэффективному скрещиванию неперспективных решений, что затрудняет и существенно замедляет сходимость алгоритма. Похожая ситуация наблюдается и с настройкой характеристик мутаций. Основное назначение мутаций здесь заключается в обеспечении достаточного разнообразия генотипов, что позволяет вывести процесс поиска из локальных оптимумов многофакторного пространства, поэтому недостаточная интенсивность мутаций не обеспечивает необходимого разнообразия генотипов. Напротив, чрезмерное увлечение мутациями при выполнении генетических алгоритмов может ухудшить качественные характеристики порождаемых проектных решений и существенно затормозить процесс эволюции.

По мнению автора, для настройки генетических алгоритмов поиска эффективного решения компенсации неоднородности электрических сетей весьма полезным может оказаться аппарат нечеткой логики, обеспечивающий «тонкую» настройку алгоритма в многомерном пространстве регулирования [9, 13].

Отметим, что предложенный алгоритм оптимизации неоднородных электрических сетей можно применять как на этапе проектирования электроэнергетических систем, в частности выбора состава и определения мест размещения устройств компенсации неоднородности [15], так и на этапе определения текущих параметров таких устройств в процессе эксплуатации электрических систем.

Выводы

1. Электрические сети современных электроэнергетических систем характеризуются высокой степенью неоднородности, что определяет применения специальных мер, направленных на компенсацию неоднородности, уменьшение потерь мощности и повышение пропускной способности электрической сети. Широкий спектр возможных средств компенсации неоднородности определяет постановку задачи определения оптимального состава и параметров таких устройств на этапах проектирования электрической системы и её эксплуатации. Целевая функция такой задачи носит дискретный характер, что требует применения специальных приемов и модификаций оптимизационных методов.

2. Разработаны математическая модель и алгоритм принятия решений по определению состава и параметров устройств компенсации неоднородности электрических сетей, основанные на аппарате генетических алгоритмов. Предложенный подход обеспечивает рассмотрение различных, особенно нетиповых решений оптимизационных задач, гарантирует выявление наиболее эффективного решения в многофакторном пространстве поиска.

3. Применение генетических алгоритмов оптимизации режима неоднородных электрических сетей характеризуется высокой эффективностью и лучшими свойствами по сравнению с методами неинформативного и эвристического поиска, обеспечивает выявление оптимального решения во всем пространстве поиска за приемлемое число шагов.

4. Эффективное использование математического аппарата генетических алгоритмов в задачах принятия решений по определению состава и параметров устройств компенсации неоднородности электрических сетей требует решения проблемы настройки параметров алгоритма – объема начальной популяции, продолжительности жизненного цикла порождаемых решений, способа формирования родительских пар, вероятностных характеристик генетических операций и тому подобное. Для решения такой задачи автор предполагает использование аппарата нечеткой логики, что обеспечивает выполнение

«тонкой» настройки генетического алгоритма на основе вербальных оценок его функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
2. Сулейманов В. М. Электричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8.
3. Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч ; под ред. Г. Е. Поспелова. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 216 с
4. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических системах / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с. – ISBN 5-93196-364-6.
5. Экономия энергии в электрических сетях / [И. И. Магда, С. Я. Меженный, В. Н. Сулейманов и др.] ; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Технік, 1986. – 167 с.
6. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування потоками потужності і напругою у неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 188 с.
7. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.
8. Кацадзе Т. Л. Принятие оптимальных проектных решений по развитию электроэнергетических систем/ Т. Л. Кацадзе // Материалы III ежегодной Международной научно-практической конференции "Повышение эффективности энергетического оборудования - 2013", Москва. – 2013. – Том 1. – С. 257 – 274.
9. Бондарев В. Н. Искусственный интеллект: учеб. пособ. / В. Н. Бондарев, Ф. Г. Аде. – Севастополь : Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2002. – 616 с.
10. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence / J. H. Holland. – London: Bradford book edition, 1992 – 211 p.
11. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / [Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев]. – Х.: ОСНОВА, 1997. – 112 с.
12. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
13. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
14. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы: учебн. пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. – Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2004. – 400 с.
15. Кацадзе Т. Л. Применение аппарата генетических алгоритмов для принятия проектных решений по развитию электроэнергетических систем / Т. Л. Кацадзе, В. Н. Сулейманов, В. А. Баженов // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 58 – 65.

Кацадзе Теймураз Луарсабович – к. т. н., доцент кафедры электрических сетей и систем НТУУ «КПИ», teymuraz@ukr.net.

Национальный технический университет «Киевский политехнический институт».