

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

АХМЕДОВА С.Т.

*Азербайджанский Научно-Исследовательский и Проектно-Изыскательский
Институт Энергетики.*

На данном этапе развития энергетических связей между энергосистемами соседних стран и создания условий их надежной параллельной работы важным является участие всех электростанций в первичном и вторичном регулировании частоты и мощности в энергообъединении. Особенность современных условий синхронной параллельной работы энергосистем состоит в том, что каждая из них в процессе эксплуатации обеспечивает собственные наивыгоднейшие затраты на производство и передачу электроэнергии своим потребителям с учетом планируемых договорных перетоков по межсистемным электропередачам.

В настоящей работе описываются метод и алгоритм оптимального распределения активной нагрузки между электростанциями в процессе оперативного управления мощностью в энергосистеме. Решение задачи основано на применении математического аппарата эволюционного программирования (ЭП). Приводится алгоритм реализующий метод ЭП, в котором нет ограничения на вид целевой функции (стоимость расхода топлива на станциях). Для учета разрывности в характеристике расхода топлива предложена модель, которая адаптируется к текущим изменениям режима.

В соответствии с предложенным алгоритмом ЭП проведены расчеты оптимального распределения нагрузки в системе с 4-мя электростанциями (пример системы «Азеренержи»).

Сравнительная оценка результатов полученных алгоритмом ЭП и алгоритмом основанном на классическом подходе (метод Лагранжа) показывает преимущество ЭП для решения задач оперативного управления мощностью в энергосистеме.

Экономичное распределение нагрузки является основной проблемой при эксплуатации и управлении режимом в энергосистеме. Решение задачи оптимального распределения нагрузки является неотъемлемой частью таких задач, как выбор числа включенных в работу генераторов, определение оптимального потокораспределения в энергосистеме. Большинство современных генерирующих агрегатов имеет различные нелинейности их характеристик стоимости затрат топлива, которые имеют место при комбинированном цикле эксплуатации, с разрывами характеристики. Решения оптимального распределения нагрузки с помощью традиционных методов, кроме метода динамического программирования, предполагают выпуклость характеристик затрат на топливо и соответственно получение глобального оптимума и, тем самым, приводят к аппроксимации этих характеристик с сохранением выпуклости.

В алгоритме эволюционного программирования только оператор мутации используется для создания нового поколения. Оператор мутации реализуется путем добавления к варьированному поколению случайного числа с распределением Гаусса. Важным параметром Гауссовского распределения является стандарт отклонения, известный как стратегический параметр.

В традиционных методах эволюционного программирования мутация реализуется созданием нового поколения совокупности мощностей в энергосистеме. Эффективность любого эволюционного алгоритма при оптимизации зависит от того, как используемая мутация придерживается исследуемой поверхности оптимизации. Степень оптимизации может быть сравнительно высокой, если оператор мутации будет правильно настроен в соответствии с искомой поверхностью оптимизации. Эта идея лежит в развиваемом методе адаптивного эволюционного программирования, в котором определение стратегического параметра мутации более развито, чем в ранее предлагаемых методах ЭП.

Эволюционное программирование с Гауссовской мутацией называется классическим (КЭП). Эволюционное программирование с быстрым оператором мутации позволяет приблизиться к точке глобального оптимума некоторой заданной функции. Некоторые из этих алгоритмов применены для задач энергосистемы. Применение таких аппроксимирующих моделей для характеристик стоимости затрат топлива приводят к сокращению годового дохода от реализации режимов оптимизации в энергосистеме. С другой стороны метод динамического программирования, хотя и не налагает ограничение на форму характеристик затрат топлива, но страдает от увеличения размерности оптимизируемой энергосистемы. За последнее время произошли существенные изменения в условиях эксплуатации энергосистем, вызванные изменчивостью стоимости топлива, не прогнозируемостью роста нагрузки и сложностью адаптации к окружающей среде. В то же время, имеется необходимость в решении проблемы экономичного распределения нагрузки, полагаясь на более реалистичные модели представления генерирующих агрегатов. Для этого необходимы более мощные и надежные алгоритмы, которые имеют достаточное быстроедействие и, в то же время, способны определить глобальный оптимум, если даже при этом кривые затрат топлива не имеют выпуклую форму. В этом плане алгоритм эволюционного программирования, основанный на моделировании естественной генетики и селекции, является наиболее перспективным, поскольку не накладывает ограничений на кривые стоимости затрат топлива.

Формулирование задачи экономического распределения нагрузки в энергосистеме

В настоящей работе экономичное распределение нагрузки рассматривается как оптимизационный процесс, описываемый в виде следующей целевой функции

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n FC_j(P_j) \quad (1.1)$$

где $FC_j(P_j)$ - функция стоимости затрат на топливо на j -том агрегате; (P_j) - мощность генерируемая этим агрегатом.

Для выполнения условий (1.1) должны соблюдаться следующие ограничения:

- баланса мощностей

$$D = \sum_{j=1}^n P_j + P_I - P_L \quad (1.2)$$

где D – суммарная нагрузка системы;

P_I - суммарный переток в энергосистему из соседних систем;

P_L - потери мощности в линиях электропередач.

- технические ограничения на мощности генерирующих агрегатов

$$P_{j\min} \leq P_j \leq P_{j\max} \quad (1.3)$$

$$j=1,2,\dots,n$$

где $P_{j\min}, P_{j\max}$ -соответственно минимальная мощность и располагаемая мощность j-ой установки.

Для генерирующего агрегата без учета положения направляющего агрегата функция стоимости топливных затрат от мощности агрегата будет

$$FC_j(P_j) = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2 \quad (1.4)$$

При учете разрывов в кривых расходных характеристик генерирующих агрегатов эта функция может быть представлена

$$FC_j(P_j) = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2 + |e_j \sin(f_j(P_{j\min} - P_{j\max}))| \quad (1.5)$$

где a_j, b_j, c_j - коэффициенты расходных характеристик j-го генератора;

e, f – те же коэффициенты с учетом разрыва в характеристиках.

Из-за прерывистости подачи пара в турбину кривые удельного расхода тепла имеют разрывы. В точках разрыва при одной и той же нагрузке турбины расход тепла не постоянен.

Экономичное распределение активной мощности в энергосистеме на основе ЭП с адаптацией стратегии эмпирического обучения

Использование ЭП основано на технике, предложенной в [6].

1. Генерируется исходная популяция из N генерирующих агрегатов. Каждый элемент этой популяции задается в виде пары векторов:

$$P_i, S_i, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\},$$

где P_i является целевой переменной и определяется выбором j-ой компоненты

$$P_j \sim U(P_{j\min}, P_{j\max}), \quad j=1, 2, \dots, n.$$

$U(P_{j\min}, P_{j\max})$ указывает на равномерное случайное распределение переменной вне интервала $(P_{j\min}, P_{j\max})$. А S_i стандартное отклонение для Гауссовской мутации (известный как параметр стратегии в самоадаптивных эволюционных алгоритмах). Здесь S_i придают приемлемое значение.

2. Определяется адекватность оценки для каждого индивидуума $P_i, S_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$ популяции, основанной на функции цели $f_i \cong f(P_i)$

3. Для воспроизводства потомков используются две схемы мутации:

а) В мутации по Гауссу (классическое эволюционное программирование) вектор потомков создается от каждого родителя по формуле

$$S'_j = S_j \exp \{ \tau' N(0,1) + \tau N_j(0,1) \} \quad (1.6)$$

$$P'_j = P_j + S'_j N_j(0,1) \quad (1.7)$$

где S_j, S'_j, P_j и P'_j означает j-ую компоненту векторов S_i, S'_i, P_i и P'_i соответственно. $N(0,1)$ представляет собой случайное число с нормальным распределением, средним значением 0 и стандартным отклонением 1. $N_j(0,1)$ представляет собой случайное число вновь сгенерированного для каждого значения j. Факторы τ и τ' являются параметрами обучения.

б) выбирается лучший из двух потомков, порождаемых: один от применения Гауссовской мутации, другой от [6] (улучшенное быстрое эволюционное программирование ИЕЕР)

$$P'_{1j} = P_j + S'_j N_j (0,1) \quad (1.8)$$

$$P'_{2j} = P_j + S'_j C_j (0,1) \quad (1.9)$$

где C_j – случайная переменная с масштабным коэффициентом $t=1$ и вновь сгенерированная для каждого значения j . А P'_{1j} и P'_{2j} – два потомка, порожденные Гауссовской и [6] мутацией соответственно. Значение целевой функции для обоих потоков оценивается, сравнивается и в качестве потомка выбирается наилучший из них. S'_j обновляется в схеме б) точно также, как и в схеме а).

4. Вычисляется пригодность каждого потомка $P'_i, S'_i, \forall_i \in \{1, 2, \dots, N\}$.

Сравнение и выбор

Каждый индивидуум в общей популяции из N испытываемых родительских векторов и соответствующие им N потомков должны сравниваться с некоторыми другими индивидуумами с тем, чтобы выжить для следующего воспроизводства. В соответствии с этим, сравнением каждому индивидууму прививается весовое значение:

$$w_i = \sum_{r=1}^R w_r \quad (1.10)$$

$$w_r = 1, \quad \text{если} \quad u_1 > \frac{f_i}{f_r + f_i} = 0$$

r – количество соревнующихся; f_r – значение пригодности каждого случайно выбранного r -того участника из $2N$ испытываемых на основании

$$r = [2Nu_2 + 1]$$

f_i – величина пригодности i ; u_1 и u_2 – равномерно распределенные в диапазоне $(0, 1)$.

После оценки пригодности для каждого индивидуума они ранжируются в порядке убывания значения пригодности w_i . Выбираются наиболее существенные индивидуумы (с наибольшими коэффициентами пригодности f_i) для образования популяции для следующего воспроизводства новых потомков.

Результаты моделирования и их оценки

Все предложенные самоадаптивные ЭП алгоритмы были применены на базе использования программного комплекса MATLAB 5.2 для решения экономического распределения нагрузки в энергосистеме. Рассматривалась тестовая схема энергосистемы из 4 электростанций.

Типовая схема ЭС из четырех станций

Характеристики расхода топлива приняты в виде квадратичной зависимости с учетом ступенчатости функции. Различные значения параметров стратегии были опробованы, наилучшим оказался $S=1,5$. Из исходных экспериментов была выбрана популяция размерностью $N=60$. Результаты моделирования ЭП с адаптацией путем эмпирического обучения показаны в Табл. 1, 2 и Рис. 1-2.

В Табл.1 показаны наилучшее время решения и минимум стоимости затрат, полученные на основе применения обоих алгоритмов. Табл.2 показывает сходимость решения по двум алгоритмам. Из Табл.1, 2 видно, что сходимость и время решения по алгоритму IEEE значительно лучше, чем по КЭП.

Для оценки эффективности обоих методов при эксперименте использованы 100 различных пробных решений. Оба метода обеспечивают сходимость и достижение глобального оптимума.

Таблица 1.

Расчет для случая разрывности функции затрат

Эволюционный метод	Среднее время, сек	Оптимальное время, сек	Минимум затрат, у.е.
Классический метод ЭП	14,54	12,95	24262,02
Улучшенный метод	9,00	5,64	24262,374

Таблица 2.

Оценка сходимости по числу поколений в популяции.

Метод ЭП	Число поколений в популяции					
	10	20	30	40	50	60
Классический метод ЭП	48,8	43,6	51,2	44,6	49,1	51,8
Улучшенный метод ЭП	50,9	49,7	-	-	-	-

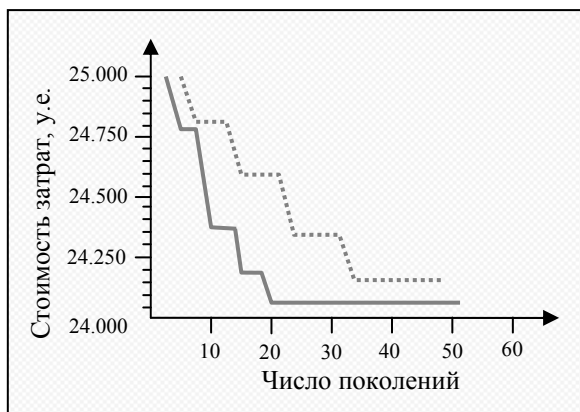


Рис.1 Сходимость по методам КЭП и УЭП

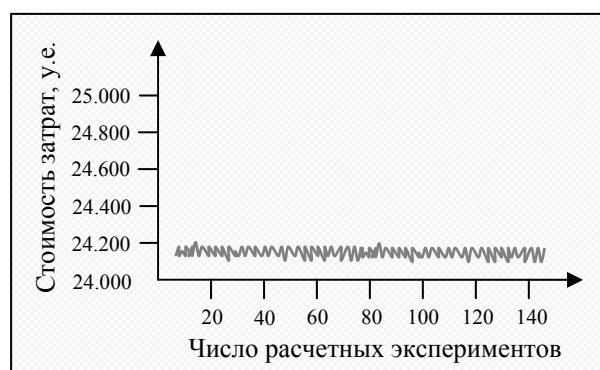


Рис.2. Распределение оптимизированных значений стоимости расхода топлива при различных числах расчетных экспериментов.

Выводы

1. Разработан алгоритм эволюционного программирования для оптимального распределения активной мощности в энергосистеме с учетом разрывности в характеристике расхода топлива на ТЭС.
2. Результаты исследований алгоритма ЭП показывают ее значительные преимущества по сравнению с классическими методами.
3. На основе алгоритма ЭП проведены расчеты оптимального распределения нагрузки в системе «Азерэнержи».

1. Филиппова Т.А., Русин Г.Л., Сулова А.Ю., Матвеев А.А. Основы коммерческого диспетчирования в электроэнергетических системах. Электроэнергетика. Сборник науч. трудов. Новосибирск: НГТУ, 2000. с. 206-219

2. Глуз И.С., Летун В.М., Меленцов М.А., Сызганов Н.А., Волкова Т.В., Спиринов М.Н., Дыскин А.В. Проблемы оптимального управления режимом работы электростанций и энергосистемы в целом в условиях ФОРЭМ. Сборник докл. Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ – УПИ. 2001. с. 26-28
3. Мамедяров О.С., Алиева А.Ф. Оперативное построение эквивалентных характеристик тепловых электростанций для оптимизации их режимов. Повышение эффективности функционирования электроэнергетической системы и ее элементов: Сб. науч. трудов. АЗНИИ Э и ЭП. Баку, 1997, с.50-57
4. Гусейнов Ф.Г., Рахманов Н.Р. Оценка параметров и характеристик энергосистем. М.: Энергоиздат, 1988. 169с.
5. K.P. Wong and J. Yuryevich." Evolutionary Programming Based Algorithm for Environmentally-constrained Economic Dispatch." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 13, no 2, May 1998, pp 301-306.
6. H.T. Yang, P.C. Yang and C.L. Huang. "Evolutionary Programming Based Economic Dispatch for Units with Non-smooth Fuel Cost Functions." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 11, no 1, February 1996, pp 112-118.

ENERJİSİSTEMDƏ YÜKÜN OPTİMAL PAYLANMASI MƏSƏLƏSİ ÜÇÜN TƏKAMÜL PROQRAMLAŞDIRMASININ TƏTBİQİ

ƏHMƏDOVA S.T.

Tədqiqat obyektı – İES-da yanacaq sərfinə aid əyrinin qırılmasını nəzərə almaqla enerjisiyemdə yükün paylanmasının optimallaşdırılmasıdır. Optimallaşdırma məsələsinin həlli üçün təkamül proqramlaşdırma (TP) metodunu modelləşdirən alqoritm hazırlanıb.

Təkamül proqramlaşdırma alqoritminin tətbiqinin effektivliyini təsdiqləyən, hesablanma təcrübəsi ilə enerjisiyemdə yük paylanması zamanı yanacaq sərfinin minimallaşdırılmasının nəticələri alınıb.

TP-in köməyilə optimallaşdırma modelinə əsaslanan enerjisiyemdə gücün tənzimləməsi vasitəsi təklif olunub.

EVOLUTIONARY PROGRAMMING APPROACH FOR ESTIMATION OF OPTIMAL LOAD FLOW IN ENERGY SYSTEM

AHMEDOVA S.T.

The optimal load flow problem considering discontinuity of fuel consumption function is investigated. For optimal dispatch algorithm modeling evolutionary programming is developed. Results of fuel cost minimization have confirmed the efficiency of evolutionary programming based algorithm application. For Energy system modeled with evolutionary programming approach the method of power control is offered.