

УДК 681.3.001.63

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

МАНУСОВ В.З., ПАВЛЮЧЕНКО Д.А.

Новосибирский государственный технический университет

В работе рассмотрено применение генетического алгоритма для решения задачи определения оптимального местоположения устройств регулирования потоков мощности. Изложены основные особенности использования устройств FACTS. Предложен генетический алгоритм поиска оптимального размещения регуляторов. Решение задачи выполнено на примере стандартной 30-узловой схемы IEEE. Моделирование выполнено с помощью пакета прикладных программ среды MATLAB.

Введение. В условиях либерализации рынка электрической энергии происходит отмена государственного контроля и разделение генерирующих и передающих систем. В итоге каждый потребитель имеет возможность покупать электроэнергию у любого поставщика. Такие страны как Норвегия, Великобритания, Чили и США уже встали на путь либерализации тарифов на услуги энергетических компаний. Каждая из них имеет свою собственную модель маркетинга, но в любом случае экономический эффект проявляется в следующем:

- уменьшение стоимости киловатт-часа, особенно для крупных клиентов;
- сокращение различий в региональных затратах.

С технической точки зрения, в результате конкуренции между энергокомпаниями происходит увеличение незапланированной мощности, что влечет за собой перегрузку некоторых линий и увеличение потерь мощности. В условиях рынка необходимое регулирование потоков мощностей представляется труднодостижимым.

Параллельно данному процессу происходит постепенное увеличение электропотребления. Поскольку этот рост устойчив в развитых странах, то некоторые линии передачи уже близки к их тепловому пределу. В связи с тем, что строительство новых линий электропередачи наносит ущерб окружающей среде, энергокомпании вынуждены совершенствовать существующие сети.

Благодаря этому, активно разрабатываются и внедряются средства регулирования потоками мощностей с целью более эффективного использования ЛЭП. Появление устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transformer Systems) – устройств регулирования потоков мощности и компенсации реактивной мощности – связано с усовершенствованием технологии изготовления полупроводников, позволяющих устранить основные недостатки электромеханических устройств. Это открыло новые возможности для управления потоками мощностей и позволило рационально использовать существующие линии электропередачи.

Устройства FACTS могут использоваться для управления потоками активной и реактивной мощностей, а также для регулирования уровня напряжения [1-3]. Для сетей с большим количеством линий оптимальное местоположение устройств FACTS позволяет управлять потоками мощности и таким образом увеличивать пропускную способность. Однако, существует предел установленному количеству устройств, за которым нагрузочная способность не может быть улучшена.

Моделирование устройств. В электроэнергетических системах устройства

FACTS могут быть использованы для достижения нескольких целей. В сложносвязанных сетях применение данных устройств позволяет функционировать ЛЭП в режимах, близких к пределу термической стойкости, а также уменьшить уравнивающие токи. С учетом этого, устройства могут действовать как источники или потребители реактивной мощности, регуляторы напряжения, устройства продольной компенсации или вольтодобавочные трансформаторы. Применение при их создании полупроводниковой техники дает им ряд преимуществ в обеспечении динамической устойчивости. В частности, данное устройство позволяет уменьшать колебания частоты, поддерживать заданный уровень напряжения и контролировать распределение мощности. Кроме того, FACTS могут выполнять функции ограничителя тока короткого замыкания.

В соответствии с типом компенсации выделяются три типа устройств:

- продольный контроллер;
- шунтирующий (поперечный) контроллер;
- комбинированный контроллер.

Внутри каждой категории существует ряд устройств, используемых в соответствии со своими свойствами. Выбор соответствующего устройства является одной из важнейших целей [3].

Как известно, в сложной электрической сети распределение мощности определяется законами Кирхгофа. Обычно при этом активное сопротивление значительно меньше реактивного сопротивления. С учетом этого активная и реактивная мощности, передаваемые по линии, соединяющей узлы 1 и 2, могут быть найдены по следующим известным выражениям

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin(\delta_{12}), \quad (1)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{x_{12}} (U_1^2 - U_1 U_2 \cos(\delta_{12})), \quad (2)$$

где U_1 и U_2 – напряжения на шинах 1 и 2 соответственно;

X_{12} – реактивное сопротивление линии 12;

δ_{12} – угол между U_1 и U_2 .

При нормальных условиях для высоковольтной линии электропередачи $U_1 \approx U_2$ и угол δ очень мал. В этом случае можно разделить управление потоками активной и реактивной мощности. Активная мощность определяется углом δ , а реактивная мощность – разностью $U_1 - U_2$. Управление значением X воздействует как на P , так и на Q .

В связи с этим можно выделить четыре различных типа устройств по управлению потоком распределением:

- устройство продольной компенсации, позволяющее изменять сопротивление линии X_{12} ;
- вольтодобавочный трансформатор, управляющий углом δ ;
- силовой трансформатор с устройством РПН, регулирующий уровень напряжений U_1 и U_2 ;
- устройство поперечной компенсации, используемые для генерации или потребления реактивной мощности.

Каждое из этих устройств позволяет изменять вышеприведенные параметры.

Как предложено в [3], для упрощенного представления устройств FACTS в задачах оптимизации могут быть использованы следующие модели (рис. 1).

Средство продольной компенсации моделируется тремя идеальными элементами, расположенными параллельно: емкость, индуктивность и провод (закоротка). В определенный момент времени может быть включен только один из элементов. Максимальные значения емкости и индуктивности выбираются в связи с конкретной задачей (рис. 1а).

Модель второго устройства представляет собой идеальный линейный регулятор с продольным сопротивлением, равным нулю (рис. 1б). Включается такой аппарат последовательно и может принимать дискретное значение угла в заданном диапазоне.

Моделью трансформатора с РПН является идеальный трансформатор без последовательного сопротивления (рис. 1в). Значение коэффициента трансформации изменяется в соответствии с конкретным типом данного устройства.

Поперечный компенсатор может быть представлен как емкостью, так и индуктивностью. При этом в первом случае осуществляется генерация реактивной мощности, а во втором ее потребление (рис. 1г).

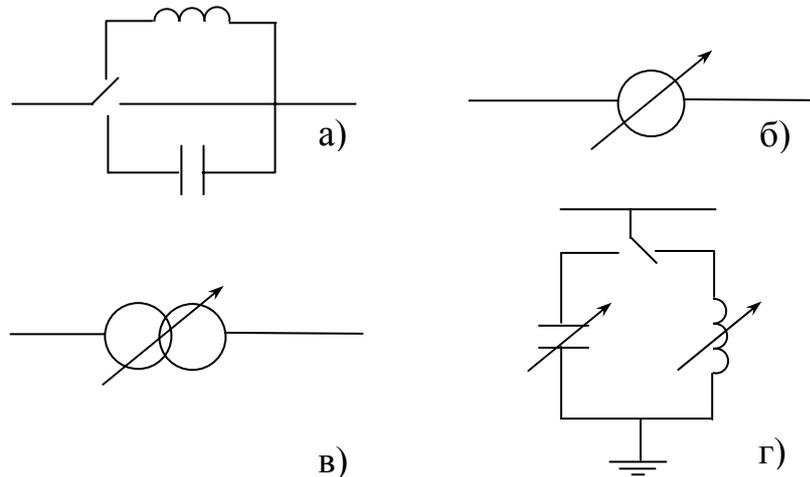


Рис. 1 Модели устройств FACTS

Предложенная методология. Выбор оптимального местоположения данного количества FACTS – комбинаторная задача, для решения которой целесообразно использовать эвристические методы, в частности генетические алгоритмы [4]. Среди основных особенностей, определяющих эффективность применения генетических алгоритмов в оптимизационных задачах электроэнергетики, следует отметить возможность использования различных символьных моделей представления решений исходной задачи оптимизации, что в большой мере определяет эффективность и качество применяемых генетических алгоритмов. Последние, как известно, являются универсальными методами направленного перебора и, следовательно, лучше всего подходят к проблемам, имеющим переборную природу и дискретный характер переменных. Их применение позволяет избежать нежелательных особенностей традиционно используемых методов нелинейного программирования: чувствительность к начальному приближению решения, неэффективность в задачах с дискретным характером переменных, невозможность определять глобальный экстремум зависимости, реализация сложной процедуры вычислений (дифференцирование целевой функции), неспособность учитывать любые виды ограничений.

В работе выполнено определение оптимального расположения заданного заранее количества устройств регулирования потоков мощности на основе генетического подхода. Причем в данном случае рассматривалось размещение однотипных элементов – идеальных линейных регуляторов.

С учетом вышесказанного, математическая формулировка проблемы может быть сведена к следующему:

$$F = \Delta P(\phi) \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^m P_{Hi} - \Delta P_{\Sigma} = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{G_i} - \sum_{i=1}^m Q_{H_i} - \Delta Q_{\Sigma} = 0, \quad (5)$$

$$\phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}, \quad (6)$$

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}, \quad (7)$$

где ϕ – вектор углов линейных регуляторов. Значения углов принимают дискретные значения в заданном диапазоне (6). Следовательно, задача имеет нелинейную дискретную комбинаторную природу, что определяет применение генетических алгоритмов для ее решения.

Как видно из (3-7), рассматривается постановка задачи, не учитывающая капитальные вложения на установку средств регулирования, т.е. критерием оптимизации является минимум потерь активной мощности. В данном случае исследуется влияние размещения линейных регуляторов на режимные параметры энергосистемы. При этом необходимо учитывать балансовые (4-5) и технические (6-7) ограничения, задающие допустимые пределы изменения напряжения в узлах, а также диапазон регулирования углов линейных регуляторов.

На основе приведенной модели предложен алгоритм, реализующий выбор оптимального местоположения линейных регуляторов основе простого генетического алгоритма:

Шаг 1 – формирование начальной популяции. Выполняется случайным образом в диапазоне допустимых значений переменной. Хромосома, определяющая решение задачи, представляет собой совокупность дискретных переменных, соответствующих значению углов используемых устройств.

Шаг 2 – вычисление значения приспособленности для хромосом начальной популяции по выражению (3). Для учета ограничений (4-7) на каждом поколении производится расчет установившегося режима электрической сети методом Ньютона-Рафсона.

Шаг 3 – жизненный цикл популяции реализован в виде набора генетических операторов.

Шаг 3.1 – выбор родительской пары. Производится выбор хромосом, участвующих в формировании новой популяции, с помощью оператора «турнир».

Шаг 3.2 – скрещивание выбранных хромосом с целью получения новых решений. Для этого с вероятностью P_{cr} применяется целочисленный кроссовер.

Шаг 3.3 – мутация одного случайно выбранного гена в каждой хромосоме с заданной вероятностью P_{mut} в соответствии с оператором целочисленной мутации. При этом значение данного гена принимает новое значение, случайным образом выбранное из допустимого диапазона его изменения.

Шаг 3.4 – расчет целевой функции для хромосом новой популяции и формирование популяции следующего поколения с помощью отбора хромосом с минимальным значением целевой функции.

Шаг 4 – проверка условия окончания цикла (максимальное количество поколений). При выполнении условия работа алгоритма завершена, иначе возвращение на Шаг 2.

Результаты расчета. Для тестовой 30-узловой схемы IEEE программным путем было установлено оптимальное расположение устройств FACTS, и получены оптимальные углы данных устройств. Заранее было задано количество используемых регуляторов – 5 и пределы изменения углов регулирования от –5 до 5 градусов. Полученные результаты представлены на рис. 2.

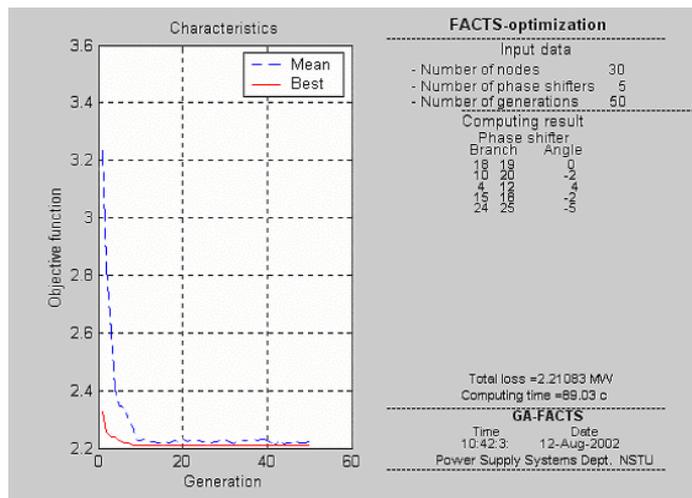


Рис. 2 Результаты оптимального размещения FACTS

Как видно, средства регулирования потоков мощности следует устанавливать в следующие ветви: 18-19, 10-20, 4-12, 15-18 и 24-25. Причем регулятор в ветви 18-19 не вносит дополнительную ЭДС (угол регулирования равен нулю), а в остальных ветвях – 2, 4, –2 и –5 соответственно. При этом суммарные потери составляют 2,21083 МВт, а время расчета 89,03 с.

Получено, что установка устройств регулирования потоков мощности позволяет снизить суммарные потери активной мощности по сети, что составляет $\Delta P_{\Sigma A} = 2,211$ МВт. При этом суммарные потери активной мощности для исходного режима 30-узловой схемы $\Delta P_{\Sigma \text{исх.}} = 2,444$ МВт. С учетом этого экономия потерь активной мощности достигает около 10%.

Исходя из характера полученных зависимостей (рис.2), можно сделать вывод о достаточно быстрой сходимости данного процесса. Кроме того, следует отметить независимость предлагаемого подхода к значению начального приближения, а также возможность применения целочисленной системы кодирования переменных, что исключает необходимость в округлении до ближайшего целого числа.

Также были проведены исследования по анализу влияния количества устройств, устанавливаемых в системе, и диапазона углов регулирования на суммарные потери в данной схеме. В результате были получены значения целевой функции, которые использовались для построения соответствующих зависимостей (рис. 3-4).

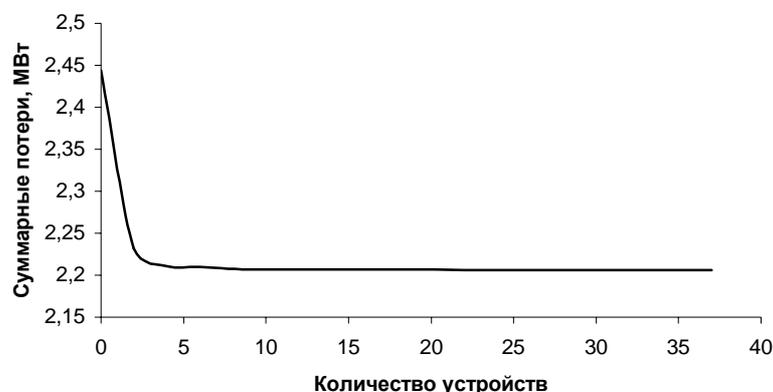


Рис. 3 Оценка влияния количества установленных устройств

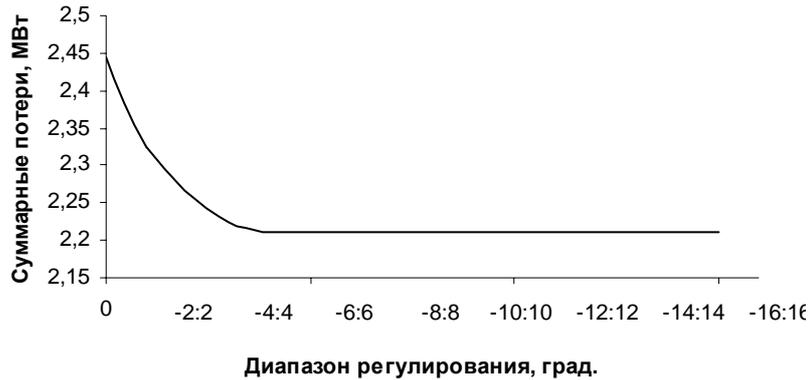


Рис. 4 Оценка влияния диапазона изменения углов регулирования

Как видно, в обоих случаях существует некоторый предел, вызванный особенностями параметров данной схемы электрической сети и используемых элементов. Данные зависимости позволяют определить оптимальное количество регуляторов и их основные характеристики. При этом для рассматриваемой 30-узловой схемы экономически нецелесообразно устанавливать больше 5 устройств, поскольку дальнейший рост их числа и, а также расширение диапазона регулирования сверх $-5:5$, не приводит к существенному изменению целевой функции (горизонтальная часть характеристик).

Заключение. Наиболее существенными факторами, определяющими эффективность предложенного подхода, являются главные особенности генетических алгоритмов:

- универсальностью подхода, который позволяет определить достаточно быстро точное решение сложных задач, имеющих многомерный и мультимодальный характер;
- отсутствие каких-либо дополнительных требований, предъявляемых к математической модели задачи в виде непрерывности, дифференцируемости и унимодальности критерия оптимизации;
- возможность учета технических ограничений любого вида, накладываемых как на независимые переменные (в виде диапазона допустимых значений переменной), так и на зависимые переменные (в виде метода штрафных функций),

а также особенности рассмотренной задачи:

- комбинаторная (переборная) природа проблемы;
- дискретный характер переменных и, следовательно, применение целочисленной системы представления решений.

Это позволяет широко использовать генетические алгоритмы при решении задачи оптимизации, которая является невыпуклой, т.е. существует множество локальных экстремумов и применять при этом реальные характеристики устройств без дополнительного округления и, как следствие, без ухудшения точности расчета.

-
1. *Paterni P., Vitet S., Bena M., Yokoyama A.* Optimal Location of Phase Shifters in the French Network by Genetic Algorithm // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, February 1999
 2. *Mutale J., Strbac G.* Transmission Network Reinforcement Versus FACTS: An Economic Assessment // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, August 2000

3. *Gerbex S., Cherkaoui R., Germond A.J.* Optimal Location of Multi-time FACTS Devices in a Power Systems by Means of Genetic Algorithms // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 3, August 2001
4. *Goldberg D.E.* Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

GENETİK ALQORİTM ƏSASINDA XƏTTİ TƏNZİMLƏYİCİLƏRİN OPTİMAL YERLƏŞDİRİLMƏSİ

MANUSOV V.Z., PAVLYUÇENKO D.A.

Güc seleni tənzimləyən optimal yerinin təyin edilməsi üçün genetik alqoritmın tətbiq edilməsi məsələni baxılmışdır. FACTS qurğusunun istifadə edilməsinin əsas xüsusiyyətlərinə baxılmışdır. Tənzimləyicinin optimal yerinin axtarılması üçün genetik alqoritm təklif edilmişdir. Məsələn həlli, standart IEEE sxemi üzrə aparılmışdır. Modelləşdirmə MATLAB-ın tətbiqi proqramlar paketindən istifadə edərək yerinə yetirilmişdir.

OPTIMAL LOCATION OF PHASE SHIFTERS BY GENETIC ALGORITHMS

MANUSOV V.Z., PAVLYUCHENKO D.A.

This work is devoted to the application of genetic algorithm for optimal location of phase shifters. The main characteristics of FACTS are shown. The proposed approach for solving the problem is based on the genetic algorithm. The algorithms was implemented to the IEEE 30-bus test system. Optimizations are carried out with a tool developed in MATLAB.