

УДК 621.3.012.5

Р.А. Алехин, Ю.П. Кубарьков

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ПОИСКА ЛЕТУЧЕЙ МЫШИ

Самарский государственный технический университет

Для современных электротехнических комплексов важным является решение проблем стабилизации напряжения в пределах номинальных значений и оптимизации перетоков реактивной мощности в электрических сетях. Статья посвящена вопросам применения оптимизационных методов для оценки отклонения напряжения от номинальных значений и оптимального распределения источников реактивной мощности. Для решения указанных задач авторами предложено использовать оптимизационный метод поиска летучей мыши. Приведен алгоритм поиска летучей мыши (bat-inspired), основанный на возможности ориентации в пространстве и поиске пищи при помощи эхолокации. Обоснована и показана возможность использования данного алгоритма для оптимального распределения статических синхронных компенсаторов (СТАТКОМ). Представлена схема последовательности выполнения операций по данному алгоритму. Выполнен сравнительный анализ результатов оптимального распределения реактивной мощности и снижения отклонений напряжения, полученных с помощью метода поиска летучей мыши, с результатами, полученными на основе широко распространенного генетического алгоритма. Установлено, что алгоритм поиска летучей мыши является более эффективным.

Ключевые слова: генетический алгоритм, метод поиска летучей мыши, оптимизация, отклонение напряжения, реактивная мощность, статический синхронный компенсатор.

1. Введение

Современные энергосистемы являются одними из крупнейших технических комплексов, построенных когда-либо человеком. Они включают в себя огромное количество оборудования, каждое из которых имеет свой определенный набор характеристик, технических исполнений и настраиваемых параметров. Контроль и надежное управление электроэнергетическими системами относятся к задачам повышенной сложности из-за их больших размеров. Даже простейшие задачи уже невозможно решить без использования мощной вычислительной техники. Ряд вопросов, стоящих перед сотрудниками энергетических компаний, подразумевает выбор из большого множества возможных вариантов конфигурации наиболее эф-

фективной энергосистемы – такой, которая позволит обеспечить наибольшую выгоду по требуемым критериям. Для решения подобных проблем применяются различные оптимизационные методы.

В настоящее время наиболее простыми и эффективными являются эволюционные методы оптимизации [1]. К числу наиболее популярных вариантов для решения различных электроэнергетических задач относятся генетический алгоритм [2], оптимизация роением частиц [3] и имитация отжига [4], разработанные во второй половине XX века [5, 6]. Наиболее важными из задач, решаемых в современной энергетике с помощью данных методов, являются задачи сокращения отклонений уровней напряжений от номинальных значений и оптимальное распределение перетоков реактивной мощности в энергосистеме [7]. Однако развитие методов математической оптимизации продолжается и в настоящее время. Исследователи не только модернизируют или объединяют уже существующие, но и создают новые более эффективные и быстрые методы. К тому же, в большинстве статей по данной проблематике исследования алгоритмов проводятся на малом количестве стандартизированных моделей, не учитывающих различные конфигурации электрических сетей.

Целью данной работы является применение оптимизационного метода поиска летучей мыши для сокращения отклонений уровней напряжений от номинальных значений и оптимальное распределение реактивной мощности в энергосистеме, а также сравнение полученных результатов с наиболее популярным генетическим алгоритмом.

II. Математическая модель

Выработка и потребление реактивной мощности распределены по энергосистеме неравномерно, ввиду чего в разных районах энергосистемы может наблюдаться её избыток или дефицит. Баланс реактивной мощности влияет на уровень напряжения в сети, поэтому и отклонения напряжений в узлах системы от номинальных значений распределены также неравномерно. Всё это ухудшает качество работы энергосистемы. Кроме того, реактивная мощность существенно влияет и на величину перетоков активной мощности в линиях электропередач. Для каждой воздушной и кабельной линии задан максимальный допустимый переток полной мощности, превышение которого ведет к аварийной ситуации в энергосистеме. Соответственно, при увеличении пропускаемой реактивной мощности снижается максимальный возможный переток активной мощности, и наоборот. Поэтому решение задачи оптимального распределения реактивной мощности в электрической сети оказывает положительное влияние как на уровни напряжений во всех узлах энергосистемы, так и на пропускную способность линий электропередачи [8]. Для этих целей в энергетике разработаны средства компенсации реактивной мощности (батареи статических

конденсаторов, шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы и другие), также устройства «распределенной генерации» (солнечные, ветровые, дизельные установки и другие) [9], а также устройства, объединенные в понятие гибких линий электропередачи переменного тока FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System). Благодаря им появляется возможность сократить потери реактивной мощности и улучшить режимную ситуацию.

Для выполнения поставленной цели используются две целевые функции, представленные в формулах (1) и (2):

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^N R_i \cdot |I_i|^2; \quad (1)$$

$$F_2(x) = \sum_{j=1}^M |U_j - U_{j,ref}|, \quad (2)$$

где N и M – количество ветвей и узлов соответственно, R_i , I_i – сопротивление и ток в ветви i , U_j , $U_{j,ref}$ – рассчитанное и заданное напряжения в узле j .

Оценка эффективности распределения реактивной мощности в сети выполняется с помощью расчета фитнес-функции (3) [10]:

$$f_{\min} = W_1 \cdot F_1 + W_2 \cdot F_2, \quad (3)$$

где W_1 , $W_2 \in [0, 1]$ – весовые коэффициенты и

$$W_1 + W_2 = 1. \quad (4)$$

Корректный расчет установившегося режима не возможен без учета ряда ограничений, обусловленных техническими особенностями того или иного оборудования. Свои пределы, например, имеют активная (P_{gi}) и реактивная (Q_{gi}) мощности генераторов, напряжения в узлах системы (U_j), максимальная пропускная способность у линий электропередачи (S_{Lk}) и количество отпаек у трансформаторов (T_l), описанных в неравенствах (5):

$$\begin{aligned} P_{gi \min} &\leq P_{gi} \leq P_{gi \max}; \\ Q_{gi \min} &\leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max}; \\ U_{j \min} &\leq U_j \leq U_{j \max}; \\ S_{Lk} &< S_{Lk \max}; \\ T_{l \min} &\leq T_l \leq T_{l \max}. \end{aligned} \quad (5)$$

Компенсация реактивной мощности в энергосистеме в данной работе выполняется с помощью статических синхронных компенсаторов (СТАТКОМ), которые, благодаря своей конструкции, позволяют добиться плавного регулирования выработки или потребления реактивной мощности ($Q_{\text{СТАТКОМ}i}$) в установленном диапазоне (6):

$$Q_{\text{СТАТКОМ}i \min} \leq Q_{\text{СТАТКОМ}i} \leq Q_{\text{СТАТКОМ}i \max} \quad (6)$$

III. FACTS устройства

В настоящее время по всему миру широкое распространение находят системы FACTS. Это специализированные устройства, в состав которых входят новейшие разработки в сфере силовой электроники, позволяющие превратить электрические сети из пассивных систем, предназначенных для передачи электроэнергии, в активных участников по регулированию различных параметров электрического тока [11]. Регулирование производится в реальном времени в зависимости от сложившейся на данный момент режимной ситуации, что обеспечивает наибольшую оптимальность работы всего оборудования и увеличивает устойчивость всей энергосистемы.

Все FACTS-устройства условно можно разделить на два типа. Устройства первого поколения (FACTS-1) предназначены для регулирования скалярными величинами напряжения и реактивной мощности для обеспечения необходимого надежной работы энергосистемы. К таким устройствам относятся:

- батареи статических конденсаторов (БСК) – устройства, вырабатывающие реактивную мощность в сеть;
- управляемые шунтирующие реакторы (УШР), предназначенные для потребления избыточной реактивной мощности из электрической сети;
- статические тиристорные компенсаторы (СТК). Они объединяют в себе БСК и шунтирующие реакторы. Основным преимуществом данного вида оборудования над упомянутыми выше является наличие тиристорных ключей, за счет чего обеспечивается плавность в регулировании потребления или генерации реактивной мощности;
- устройства продольной компенсации (УПК). Они применяются для уменьшения реактивной составляющей сопротивления линий электропередач, тем самым увеличивая их пропускную способность.

К более современным устройствам относятся FACTS второго поколения (FACTS-2). Подобное оборудование позволяет, опираясь на векторные измерения напряжений δ , управлять такими параметрами электрической сети, как P , Q и U . К таким устройствам относятся:

- объединенный регулятор перетоков мощности. Он позволяет, независимо друг от друга, управлять перетоками активной и реактивной мощностей в линиях электропередач;
- вставка постоянного тока – устройство, позволяющее объединять две энергосистемы с различными частотами и фазами;
- асинхронизированный компенсатор – аппарат, имеющий две (три) обмотки возбуждения, за счет чего обеспечивается более широкий диапазон регулирования реактивной мощности и высокое быстродействие;
- статический синхронный компенсатор.

IV. Статические синхронные компенсаторы мощности

Из всех перечисленных выше устройств наибольший эффект в области снижения отклонений уровней напряжений и сокращения потерь реактивной мощности дают статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) – устройства динамической компенсации реактивной мощности в сети, созданные на основе биполярных транзисторов с управляемым затвором.

Основными элементами СТАТКОМ являются конденсатор постоянного тока, преобразователь напряжения, трансформатор связи и модуль управления, представленные на рис. 1.

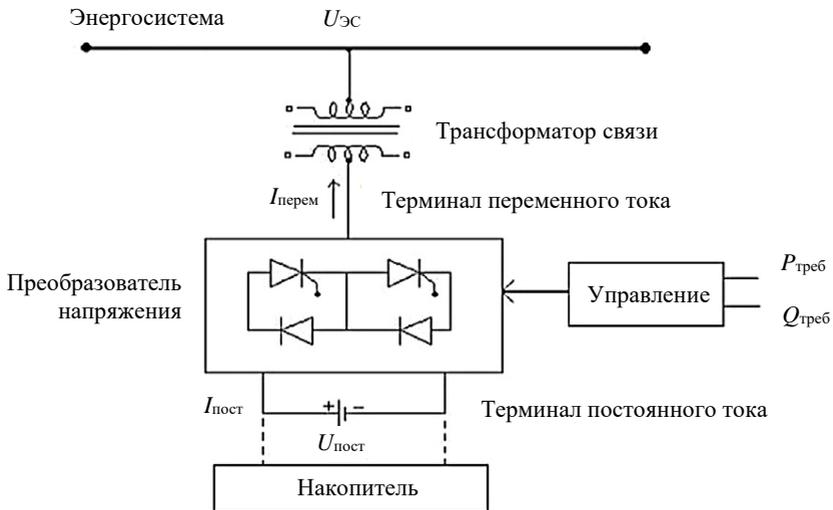


Рис. 1. Схема устройства СТАТКОМ

Устройство преобразует входное напряжение постоянного тока в выходное трехфазное на основной частоте. Мониторинг необходимости

компенсации реактивной мощности выполняется на контроллере путем сравнения фаз напряжения в сети и компенсаторе. В случае равенства фаз компенсация не требуется. Если напряжение в СТАТКОМ опережает напряжение в сети, энергосистема «видит» устройство как емкостное сопротивление, что приводит к генерации реактивной мощности в систему. Если же напряжение в сети опережает напряжение статического синхронного компенсатора, то он представляется в виде индуктивного сопротивления и поглощает избыточную реактивную мощность из энергосистемы [12].

Основными преимуществами данного устройства являются:

- широкий диапазон компенсации реактивной мощности. Возможно как потребление, так и генерация;
- быстроедействие;
- минимальные потери электроэнергии;
- надежная фильтрация гармонических искажений;
- малые габариты в виду отсутствия реакторов и батарей статических конденсаторов.

Все эти положительные качества помогли обеспечить широкое распространение статических синхронных компенсаторов по всему миру.

V. Метод поиска летучей мыши

Алгоритм поиска летучей мыши (bat-inspired) основан на уникальной особенности данного вида животных в ориентации в пространстве и поиске пищи при помощи эхолокации [13].

Рассмотрим алгоритм этого поиска.

1. Инициализация начальных данных энергосистемы, произвольных значений частоты звука f_i , громкости A_i и частоты повторения излучаемых импульсов r_i каждой летучей мыши, а также произвольного значения $rand$. При этом каждый из этих параметров не должен выходить за рамки допустимых значений: $f_{min} \leq f_i \leq f_{max}$, $A_{min} \leq A_i \leq A_{max}$, $r_i \in [0, 1]$ и $rand \in [0, 1]$.
2. Расчет установившегося режима без использования компенсирующих устройств.
3. Расчет целевых и фитнес-функций. Текущий режим принимается за оптимальный.
4. Инициализация произвольного количества, места установки и объемов компенсации устройств СТАТКОМ.
5. Расчет установившегося режима, целевых и фитнес функций для каждой летучей мыши (решения) в популяции.
6. Поиск лучшего решения в текущей популяции x^* и сравнение его с наилучшим решением задачи на текущий момент среди всех популяций. Если значение текущей фитнес-функции оказывается меньше, происходит замена лучшего решения.

7. Изменение частоты звука у всех летучих мышей (решений) в популяции по формуле (7):

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \beta, \quad (7)$$

где $\beta \in [0,1]$.

8. Если $rand > r_i$,

8.1. Поиск нового решения происходит возле оптимального по выражению (8):

$$x_i^{t+1} = x_* + e \cdot A^t, \quad (8)$$

где $e \in [-1,1]$ – случайное число и A^t – среднее значение громкости всех летучих мышей на шаге t .

8.2. Обновление скоростей и значений выполняется по формулам (9) и (10):

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_*) \cdot f_i; \quad (9)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}. \quad (10)$$

9. Если $rand < A_i$ и $f_{\min}(x_i) < f_{\min}(x_*)$, то значения r_i увеличиваются, а A_i сокращаются по формулам (11) и (12) соответственно:

$$r_i^{t+1} = r_i^t \cdot (1 - e^{-\gamma t}); \quad (11)$$

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t, \quad (12)$$

где γ и α – константы и $\alpha \in (0,1)$, $\gamma > 0$.

10. Проверка завершения выполнения алгоритма. При выполнении заданного количества итераций выполнение расчетов прекращается, а лучшее на данный момент решение считается оптимальным, иначе алгоритм переходит на шаг 5 [14].

Схема последовательности выполнения всех операций представлена на рис. 2.

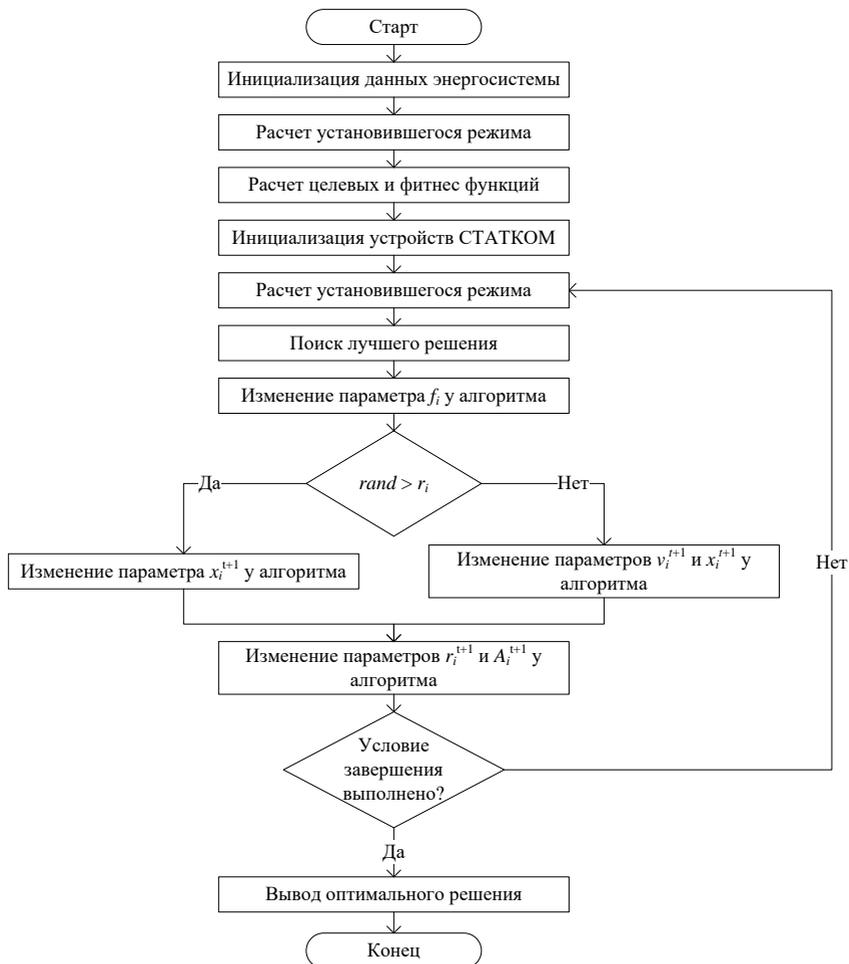


Рис. 2. Последовательность выполнения алгоритма

VI. Генетический алгоритм

Генетический алгоритм – эвристический оптимизационный метод, представляющий математическую реализацию концепций эволюции и естественного отбора Чарльза Дарвина. Впервые опубликованный Дж. Холландом в 1975 году, алгоритм очень быстро обрел популярность среди исследователей ввиду своей универсальности и применимости к решению широкого круга вопросов. На сегодняшний день на генетическом алгоритме основано около 95 % публикуемых в сфере оптимизации статей [5].

Данный алгоритм относится к семейству эволюционных мультиагентных алгоритмов, что свидетельствует о наличии выборки из большого числа решений, изменяющихся от поколения к поколению.

К основным положительным чертам алгоритма относятся:

- простота понимания механизмов работы алгоритма;
- большое количество примеров применения генетического алгоритма в литературе;
- способность находить решение даже при наличии очень грубой первоначальной информации об объекте исследования.

Наиболее существенными недостатками представленного метода являются:

- длительное время выполнения операций;
- слабая масштабируемость: при наличии больших исследуемых систем время нахождения оптимальных решений сильно возрастает. Для сокращения временных затрат прибегают к разделению системы на объекты меньшей размерности с небольшим количеством переменных;
- в ряде задач возможна сходимости к локальному, а не глобальному оптимуму.

Основные механизмы работы генетического алгоритма сформированы на трех важнейших понятиях эволюционной теории: выборе, скрещивании и мутации. На первом этапе работы алгоритма производится случайный выбор пар решений из начального поколения. Далее происходит скрещивание родительских переменных для получения новых решений. Для выполнения указанной задачи каждая переменная преобразуется в двоичный код и выбирается точка раздела числовой последовательности. Для дочерних переменных происходит объединение левой части одного предка и правой части второго и преобразование значения в десятичную систему исчисления. Пример выполняемых действий представлен на рис. 3. Такой подход обеспечивает изменение всех переменных в каждом из решений в достаточно большом диапазоне, чем обеспечивается большое разнообразие особей в каждом из поколений.



Рис. 3. Процесс скрещивания переменных в двоичной системе исчисления

Однако через некоторое время наиболее приспособленная особь (решение) может породить большое количество похожих на себя потомков, что приведет к схождению алгоритма в одной точке, не всегда являющейся глобальным оптимумом. Для исключения подобной ситуации был создан механизм мутаций, с помощью которого в каждом из решений случайным образом меняется одна из переменных. В результате применения мутаций предотвращается преждевременная сходимости алгоритма к локальному оптимуму и обеспечивается наиболее полное исследование области допустимых значений для всех переменных.

После создания нового поколения решений производится отбор наиболее приспособленных значений среди родительских и дочерних. Алгоритм метода аналогичен методу поиска летучей мыши с тем лишь отличием, что действия по пп. 7-9 заменяются на операции выбора, скрещивания, мутации и отбора наиболее приспособленных особей.

VII. Выводы

Рассмотрены результаты применения метаэвристического метода поиска летучей мыши для задач оптимального распределения реактивной мощности и снижения отклонений уровней напряжений в энергосистеме от номинальных значений. Сравнение результатов производилось с генетическим алгоритмом, нашедшим широкое применение для решения подобного рода задач. Исследование проводилось на 33-узловой схеме. Были получены следующие результаты:

- благодаря применению статических синхронных компенсаторов реактивной мощности снизились перепады в уровнях напряжений во всех узлах энергосистемы;
- за счет оптимизации перетоков мощности сократились потери активной мощности и увеличилась пропускная способность линий электропередач.

При этом расчеты с помощью алгоритма поиска летучей мыши имеют высокие показатели, что свидетельствует об эффективности описанного метода.

© Алехин Р.А., 2019
© Кубарьков Ю.П., 2019

Библиографический список

- [1] Antunes C.H., Barrico C., Gomes A., Pires D.F., Martins A.G. An evolutionary algorithm for reactive power compensation in radial distribution networks // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. Is. 7-8. P. 977-984.
- [2] Bhattacharyya B., Gupta V.K., Kumar S. Reactive power optimization with SVC & TCSC using genetic algorithm // *Power Engineering and Electrical Engineering*. 2014. Vol. 12. No. 1. P. 1-12.

- [3] Jain V.K., Singh H., Srivastava L. Minimization of reactive power using particle swarm optimization // *International Journal Of Computational Engineering Research*. 2012. Vol. 2. Is. 3. P. 686-691.
- [4] Antunes C.H., Lima P., Oliveira E., Pires D.F. A multi-objective simulated annealing approach to reactive power compensation // *Engineering Optimization*. 2011. Vol 43. Is. 10. P. 1063-1077.
- [5] Bansal R.C. Optimization methods for electric power systems: An overview // *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. 2005. Vol. 2. Is. 1. Pp. 1-23.
- [6] Stanelyte D., Gudzius S., Andriusiene L. Energy distribution planning models taxonomy and methods of distributed generation systems // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 107. Is. 1. P. 275-283.
- [7] Krishna T.M., Ramana N.V., Kamakshaiah S. A novel algorithm for the loss estimation and minimization of radial distribution system with distributed generation // in *proc. International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, April, 2013, Hyderabad, India. P. 1289-1293.
- [8] Tellez A.A., Lopez G., Isaac I., González J.W. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review // *Heliyon*. 2018. Vol. 4. Is. 8. P. 1-30.
- [9] Sioshansi F.P., *Distributed generation and its implications for the utility industry*. Sioshansi Academic Press, Oxford, 2014.
- [10] Apparao A., Bhashna K. Optimal allocation of DG considering loss minimization and voltage profile using PSO // *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. Is. 9. P. 659-663.
- [11] Hingorani N.G., Gyugyi L., *Understanding FACTS: Concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
- [12] Singh B., Yadav M.K. GA for enhancement of system performance by DG incorporated with D – STATCOM in distribution power networks // *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2018. Vol. 5. Is. 3. Pp. 388-426.
- [13] Yang X.-S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: *Nature inspired Cooperative Strategies for Optimization // Studies in Computational Intelligence*, Berlin: Springer. 2010. P. 65-74.
- [14] Wulandhari L.A., Komsiyah S., Wicaksono W. Bat algorithm implementation on economic dispatch optimization problem // *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 135. Is. 1. P. 275-282.

R.A. Alekhin, Y.P. Kubarkov

**OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION
OF REACTIVE POWER IN ENERGY SYSTEM
BASED ON THE BAT ALGORITHM**

Samara State Technical University
Samara, Russia

Abstract. For modern electrical systems, it is important to solve the problems of voltage stabilization within the nominal values and optimization of reactive power flows in electrical networks. The article is devoted to the application of optimization methods for estimating the voltage deviation from the nominal values and the optimal distribution of reactive power sources. To solve these problems, the authors proposed to use the optimization method of searching for a bat. An algorithm for finding the bat (bat – inspired), based on the possibility of orientation in space and the search for food using echolocation, is given. The possibility of using this algorithm for the optimal distribution of static synchronous compensators (STATCOM) is proved and shown. A flowchart of operations using this algorithm is presented. A comparative analysis of the results of the optimal distribution of reactive power and reduction of voltage deviations obtained using the bat search method, with the results obtained on the basis of a widely used genetic algorithm, is performed. It has been found that the bat search algorithm is more efficient.

Keywords: bat algorithm, genetic algorithm, optimization, reactive power, STATCOM.

References

- [1] C.H. Antunes, C. Barrico, A. Gomes, D.F. Pires and A.G. Martins, «An evolutionary algorithm for reactive power compensation in radial distribution networks», *Applied Energy*, vol. 86, is. 7-8, pp. 977-984, July-Aug. 2009.
- [2] B. Bhattacharyya, V.K. Gupta and S. Kumar, «Reactive power optimization with SVC & TCSC using genetic algorithm», *Power Engineering And Electrical Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 1-12, March 2014.
- [3] V.K. Jain, H. Singh, L. Srivastava, «Minimization of reactive power using particle swarm optimization», *International Journal Of Computational Engineering Research*, vol. 2, is. 3, pp. 686-691, May-June 2012.
- [4] C.H. Antunes, P. Lima, E. Oliveira and D.F. Pires, «A multi-objective simulated annealing approach to reactive power compensation», *Engineering Optimization*, vol. 43, is. 10, pp. 1063-1077, 2011.
- [5] R.C. Bansal, «Optimization methods for electric power systems: An overview», *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 2, is. 1, pp. 1-23, March 2005.

-
- [6] D. Stanelyte, S. Gudzius and L. Andriusiene, «Energy distribution planning models taxonomy and methods of distributed generation systems», *Energy Procedia*, vol. 107, is. 1, pp. 275-283, Feb. 2017.
- [7] T.M. Krishna, N.V. Ramana and S. Kamakshaiyah, «A novel algorithm for the loss estimation and minimization of radial distribution system with distributed generation», in proc. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, April, 2013, Hyderabad, India. pp. 1289-1293.
- [8] A.A. Tellez, G. Lopez, I. Isaac and J.W. González, «Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review» *Heliyon*, vol. 4, is. 8, pp. 1-30, Aug. 2018.
- [9] F.P. Sioshansi, *Distributed generation and its implications for the utility industry*, Academic Press, 2014.
- [10] A. Apparao and K. Bhashna, «Optimal allocation of DG considering loss minimization and voltage profile using PSO», *International Journal of Science and Research*, vol. 4, is. 9, pp. 659-663, Sept. 2015.
- [11] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
- [12] B. Singh and M.K. Yadav, «GA for enhancement of system performance by DG incorporated with D – STATCOM in distribution power networks», *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, is. 3, pp. 388-426, Dec. 2018.
- [13] X.-S. Yang, «A new metaheuristic bat – inspired algorithm», in: *Nature inspired Cooperative Strategies for Optimization*, Studies in Computational Intelligence, Berlin: Springer, 2010, pp. 65-74.
- [14] L.A. Wulandhari, S. Komsiyah and W. Wicaksono, «Bat algorithm implementation on economic dispatch optimization problem», *Procedia Computer Science*, vol. 135, Issue 1, pp. 275-282, Jan. 2018.