

УДК 621.311

*Т.М. Халил, А.В. Горпинич, канд. техн. наук**(Украина, г. Мариуполь, Приазовский государственный технический университет)*

ВЫБОР МЕСТ УСТАНОВКИ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ И РЕКОНФИГУРАЦИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Существует несколько методов снижения потерь электроэнергии и улучшения качества напряжения в распределительных сетях (РС), из которых наиболее распространенными являются компенсация реактивной мощности (КРМ) с помощью батарей конденсаторов (БК) и реконфигурация (процесс изменения топологии РС) путем изменения состояния разомкнутых или замкнутых коммутационных аппаратов (КА). Применение указанных методов в реальных разветвленных сетях с большим количеством узлов приводит к проблеме сложной многоцелевой нелинейной оптимизации, поскольку при этом необходимо учитывать не только потери электроэнергии, но и изменение пропускной способности проводников и уровней напряжения в узлах нагрузки, нелинейную зависимость затрат на БК от их мощности, радиальную топологию РС и т.д.

Вопросам оптимизации мест установки БК заданной мощности и реконфигурации РС посвящено значительное количество публикаций [1–9]. Однако в подавляющем большинстве из них для снижения потерь электроэнергии используют каждый из двух методов в отдельности и лишь в некоторых работах предлагается совместное их применение [10–12]. Цель работы – показать эффективность совместной оптимизации конфигурации РС и мест установки БК заданной мощности, реализованной с помощью селективного метода роя частиц (МРЧ).

В последние годы было разработано много новых алгоритмов в области оптимизации режимов и структуры распределительных электрических сетей, большая часть которых базируется на эвристических методах и методах искусственного интеллекта: метод имитации отжига, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, алгоритм поиска с запретами, муравьиные алгоритмы и др. В частности, наблюдается повышенный интерес к методам, основанным на использовании математического описания сложных природных механизмов. Сравнительно недавно для решения оптимизационных задач в РС стали применять МРЧ [13].

Этот метод был разработан Кеннеди и Эберхартом в 1995 г. [14]. Основан он на моделировании социального поведения и эффективен при решении проблем сложной многоцелевой нелинейной оптимизации. МРЧ – это стохастический оптимизационный алгоритм, моделирующий социальное поведение птиц в стае, косяков рыб или роя пчел, а также методы, с помощью которых птицы летают (рыбы плавают) синхронно и умеют менять направление движения с перегруппировкой в оптимальные формации, находят источники пищи, спасаются от хищников и т.д. В этом методе агентами являются "частицы", которые отражают возможные решения проблемы. Каждая частица перемещается в многомерном пространстве решений со скоростью, которая постоянно обновляется на основе собственного опыта и опыта соседей. Рассмотрим основные положения МРЧ.

1. Пусть пространство решений будет d -мерным и каждая частица i характеризуется d -мерным вектором $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$.

2. Количество частиц в рое, который называется "популяцией", обозначим через n . Популяцию можно представить как $pop = [X_1, X_2, \dots, X_n]$.

3. Пусть также $PB_i = [pb_{i1}, pb_{i2}, \dots, pb_{id}]$ – наилучшая позиция каждой частицы (particle best), $GB = [gb_1, gb_2, \dots, gb_d]$ – наилучшая глобальная позиция для всего роя (global best), $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$ – скорость перемещения каждой частицы в d -мерном пространстве решений.

Тогда на итерации k скорость частицы обновляется с помощью выражения

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(gb_d^k - x_{id}^k),$$

где $i=1, 2, \dots, n$, а n – размер популяции; w – коэффициент, характеризующий инерцию; c_1 и c_2 – постоянные, характеризующие ускорение; r_1 и r_2 – две случайные величины в интервале $[0,1]$.

4. Позиция частицы обновляется с помощью выражения

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}.$$

В 1997 г. авторы работы [15] адаптировали МРЧ для поиска в бинарном пространстве решений, применив сигмоидальное преобразование к скорости частицы:

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^{k+1})}.$$

Выражение для обновления позиции частицы в этом случае преобразуется к виду

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } rand < \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \\ 0 & \text{в другом случае} \end{cases}.$$

В работе [16] рассмотрен селективный метод роя частиц (СМРЧ) для оптимизации мест размыкания контуров РС с целью снижения потерь электроэнергии за счет перераспределения ее потоков по линиям. В СМРЧ пространство решений для каждого d -мерного вектора $S_d = [s_{d1}, s_{d2}, \dots, s_{dn}]$ представляет свой набор из dn позиций, где dn – количество выбранных позиций для d -мерного вектора. Целевая функция в этом случае – выбор решений dn позиций для каждого d -мерного вектора пространства решений S_d , причем позиция каждой частицы определяется набором выбранных переменных. Таким образом, сигмоидальная функция будет иметь такой вид:

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = dn \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^{k+1})},$$

а координата i каждой позиции частицы для данного d -мерного вектора является выбранной переменной, обновлять которую можно с помощью выражения

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} s_{d1}, & \text{если } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 1 \\ s_{d2}, & \text{если } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 2 \\ s_{d3}, & \text{если } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 3 \\ \text{KKKKKKKKKKKK} \\ s_{dn}, & \text{если } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < dn \end{cases} \quad (6)$$

где $s_{d1}, s_{d2}, s_{d3}, \dots, s_{dn}$ – выбранные переменные в d -мерном векторе.

Значение скорости ограничивается некоторыми минимальными и максимальными величинами $[V_{min}, V_{max}]$ с помощью выражения

$$u_{id}^{k+1} = \begin{cases} V_{max}, & \text{если } u_{id}^{k+1} > V_{max} \\ u_{id}^{k+1}, & \text{если } |u_{id}^{k+1}| \leq V_{max} \\ V_{min}, & \text{если } u_{id}^{k+1} < V_{min} \end{cases}.$$

Чтобы избежать постоянного значения скорости для каждой итерации и заставить частицу перемещаться в пространстве решений, необходимо использовать уравнение

$$u_{id}^{k+1} = \begin{cases} rand \times u_{id}^{k+1}, & \text{если } |u_{id}^{k+1}| = |u_{id}^k| \\ u_{id}^{k+1} & \text{в другом случае.} \end{cases}$$

Таким образом, пространство решений в бинарном МРЧ может состоять только из значений 0 или 1, в то время как в СМРЧ пространство решений представляет набор выбранных переменных.

Эффективность предлагаемого метода рассмотрена на примере снижения потерь электроэнергии и улучшения качества напряжения для двух тестовых схем. Результаты моделирования, полученные с помощью СМРЧ, сравним с результатами, полученными с помощью трех других методов: имитации отжига (ИО), генетических алгоритмов (ГА) и муравьиных алгоритмов (МА). Оптимизацию выполним для трех случаев:

- 1) только с учетом КРМ при помощи БК;

- 2) только с учетом реконфигурации сети;
- 3) с учетом совместной реконфигурации сети и КРМ при помощи БК.

В этих двух тестовых схемах все нормально разомкнутые коммутационные аппараты (НРКА) и нормально замкнутые коммутационные аппараты (НЗКА), которые принадлежат любому контуру, формируют пространство решений при использовании реконфигурации сети, в то время как все узлы нагрузки или шины (за исключением шин питающих подстанций) формируют пространство решений при использовании КРМ с помощью БК. При моделировании учитывались уровни напряжения в узлах сети, максимально допустимая пропускная способность проводников, уровень компенсации реактивной мощности (суммарная генерация реактивной мощности в сеть не должна превышать суммарной реактивной мощности нагрузок); кроме того, в РС не должно быть отключенных нагрузок, а ее конфигурация должна иметь радиальную структуру.

Первая тестовая схема [7] изображена на рис. 1, содержит 16 узлов нагрузки (с учетом 3 секций шин питающей подстанции), 13 НЗКА и 3 НРКА – КА 15, 21 и 26. Суммарная нагрузка принята равной 100 МВА, типоразмеры БК – 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100 и 2400 квар. Подробные данные о параметрах этой схемы приведены в работе [7]. Для этой схемы количество d -мерных векторов составляет 16 (13 узлов нагрузки, где возможна установка БК, и 3 НРКА). В табл. 1 приведены результаты моделирования этой схемы до и после оптимизации, а в табл. 2 для сравнения – результаты моделирования, полученные с помощью СМРЧ, ИО, ГА и МА.

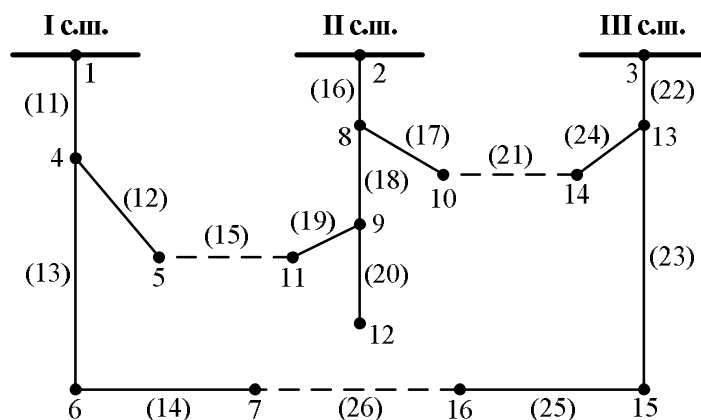


Рис. 1. Тестовая схема

Таблица 1

Результаты моделирования первой тестовой схемы

Название		До оптимизации	После оптимизации с помощью БК	После оптимизации с помощью реконфигурации	После оптимизации путем совместной реконфигурации и установки БК
Мощность БК, устанавливаемых в узле нагрузки, квар	4	0	0	0	0
	5	1100	1800	1100	2100
	6	1200	1500	1200	1800
	7	0	1200	0	900
	8	0	1800	0	2400
	9	1200	1800	1200	2400
	10	0	1800	0	600
	11	600	1200	600	0
	12	3700	1800	3700	2400
	13	0	1200	0	600
	14	1800	600	1800	1200
15	0	900	0	900	
16	1800	900	1800	1200	

(Продолжение таблицы 1)

Наименование	До оптимизации	После оптимизации с помощью БК	После оптимизации с помощью реконфигурации	После оптимизации путем совместной реконфигурации и установки БК
--------------	----------------	--------------------------------	--	--

НРКА	15, 21, 26	15, 21, 26	19, 7, 26	19, 7, 26
Суммарная мощность устанавливаемых БК, квар	11400	16500	11400	15500
Минимальное напряжение, о.е.	0,969	0,97	0,972	0,973
Максимальное напряжение, о.е.	1	1	1	1
Суммарные потери активной мощности, кВт	511,4	486,6	466,1	446,3
Снижение потерь активной мощности, %	—	4,85	8,86	12,73

Таблица 2

Результаты моделирования первой тестовой схемы различными методами

Метод моделирования		После оптимизации с помощью БК	После оптимизации с помощью реконфигурации	После оптимизации путем совместной реконфигурации и установки БК
ИО	Суммарные потери активной мощности, кВт	489,7	466,1	448,3
	Снижение потерь активной мощности, %	4,24	8,86	12,34
ГА	Суммарные потери активной мощности, кВт	488,2	466,1	448,2
	Снижение потерь активной мощности, %	4,54	8,86	12,36
МА	Суммарные потери активной мощности, кВт	487,1	466,1	448,1
	Снижение потерь активной мощности, %	4,75	8,86	12,38
СМРЧ	Суммарные потери активной мощности, кВт	486,6	466,1	446,3
	Снижение потерь активной мощности, %	4,85	8,86	12,73

В качестве второй тестовой схемы [12] использована реальная распределительная сеть (рис. 2) Тайваньской энергетической компании (Taiwan Power Company). Схема содержит 11 секций шин (А-К), 83 НЗКА и 13 НРКА – КА 84-96. В этом состоянии (до оптимизации) суммарные потери активной мощности составляют 531,99 кВт. Нагрузка – постоянная, симметричная, типоразмеры БК – кратны 50 квар. Подробные данные о параметрах этой схемы приведены в работе [12]. Для этой схемы количество *d*-мерных векторов составляет 86 (73 узла нагрузки, где возможна установка БК, и 13 НРКА). В табл. 3 для сравнения рассмотрены результаты моделирования, полученные с помощью СМРЧ, ИО, ГА и МА.

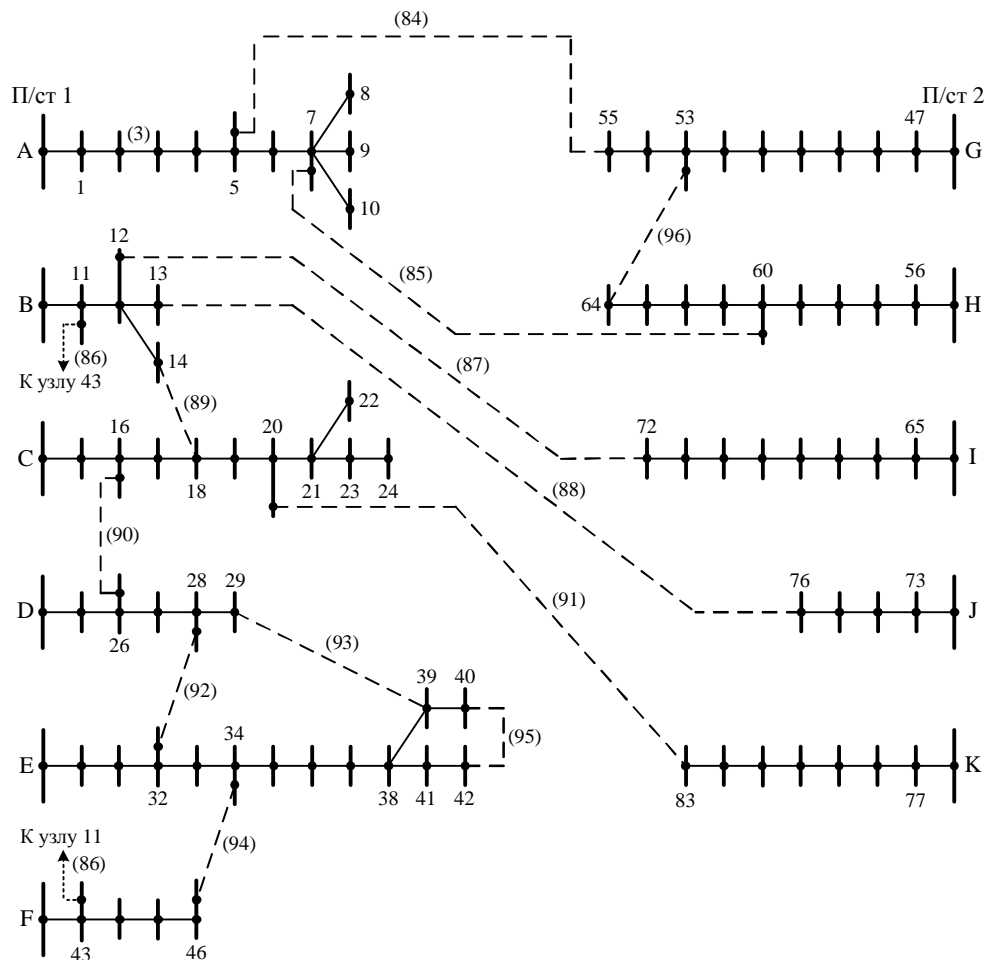


Рис. 2. Распределительная сеть Тайваньской энергетической компании (Taiwan Power Company)

Таблица 3.

Результаты моделирования второй тестовой схемы различными методами

Метод моделирования		После оптимизации с помощью БК	После оптимизации с помощью реконфигурации	После оптимизации путем совместной реконфигурации и установки БК
ИО	Суммарные потери активной мощности, кВт	342,14	469,88	309,12
	Снижение потерь активной мощности, %	35,7	11,68	41,9
ГА	Суммарные потери активной мощности, кВт	330,79	469,88	295,39
	Снижение потерь активной мощности, %	37,8	11,68	44,48
МА	Суммарные потери активной мощности, кВт	330,41	469,88	295,12
	Снижение потерь активной мощности, %	37,9	11,68	44,5
СМРЧ	Суммарные потери активной мощности, кВт	330	469,88	295
	Снижение потерь активной мощности, %	38	11,68	44,55

Из результатов моделирования, приведенных в табл. 1, следует, что во всех трех случаях (оптимизация с помощью БК, оптимизация с помощью реконфигурации и оптимизация путем совместной реконфигурации и установки БК) наблюдается снижение потерь электроэнергии при незначительном улучшении качества напряжения в узлах нагрузки. На основании полученных данных (табл. 2 – 3) можно сделать вывод, что использование всех четырех методов (ИО, ГА, МА и СМРЧ) для оптимизации конфи-

гурации РС приводит к одинаковым результатам. Тем не мене, по сравнению с другими методами, применение СМРЧ для оптимизации с помощью БК или оптимизации путем совместной реконфигурации и установки БК приводит к несколько лучшим результатам. Совместная оптимизация конфигурации РС и мест установки и батарей конденсаторов заданной мощности наиболее эффективна, так как в этом случае наблюдается наибольшее снижение потерь активной мощности.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. С помощью СМРЧ реализована совместная оптимизация конфигурации РС и мест установки и батарей конденсаторов заданной мощности, эффективность которой рассмотрена на примере двух тестовых схем.

2. Сравнение полученных результатов с результатами применения других современных методов оптимизации РС подтверждает высокую точность и хорошую сходимостъ СМРЧ, который может рассматриваться как эффективная альтернатива этим методам, не требующая высокой алгоритмической сложности.

3. В настоящее время с помощью СМРЧ путем установки БК, изменения конфигурации сети и замены сечений проводников на перегруженных по экономическим условиям участках проводится оптимизация технико-экономических показателей действующей схемы электроснабжения Орджоникидзевского участка (г. Мариуполь), содержащей 273 узла нагрузки и около 350 ветвей.

Список литературы

1. Neagle, N. M. Loss reduction from capacitors installed on primary feeders [Text] / N. M. Neagle, D. R. Samson // AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1956. – Vol. 75. – No. 3. – P. 950 – 959.
2. Baran, M. E. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system [Text] / M. E. Baran, F. F. Wu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1989. – Vol. 4. – No. 1. – P. 725 – 734.
3. Baghzouz, Y. Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages [Text] / Y. Baghzouz, S. Ertem // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1990. – Vol. 5. – No. 2. – P. 650 – 657.
4. Sundhararajan, S. Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm [Text] / S. Sundhararajan, A. Pahwa // IEEE Transactions on Power Systems. – 1994. – Vol. 9. – No. 3. – P. 1499 – 1507.
5. Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics [Text] / M. A. S. Masoum, A. Jafarian, M. Ladjevardi, E. F. Fuchs, W. M. Grady // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19. – No. 2. – P. 822 – 829.
6. Zhezhenenko, I. V. Optimal capacitor placement in distribution system considering mutual coupling, load unbalancing and harmonics [Text] / I. V. Zhezhenenko, A. V. Gorpnich, T. M. Khalil // Proc. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. – 8-11 June 2009. – Session 5. – Paper no. 0441. – Prague (Czech Republic), 2009.
7. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction [Text] / S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1988. – Vol. 3. – No. 3. – P. 1217 – 1223.
8. Chang Hong-Chan. Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing [Text] / Hong-Chan Chang, Cheng-Chien Kuo // Electric Power Systems Research. – 1994. – Vol. 29. – No. 3. – P. 227 – 238.
9. Su Ching-Tzong. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm / Ching-Tzong Su, Chung-Fu Chang, Ji-Pyng Chiou // Electric Power Systems Research. – 2005. – Vol. 75. – No. 2-3. – P. 190 – 199.
10. Jiang, D. Optimal electric distribution systems switch reconfiguration and capacitor control [Text] / D. Jiang, R. Baldick // IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – Vol. 11. – No. 2. – P. 890 – 897.
11. Su C. T. Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems / C. T. Su, C. S. Lee // Electric Power Systems Research. – 2001. – Vol. 58. – No. 2. – P. 97 – 102.
12. Chang Chung-Fu. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm [Text] / Chung-Fu Chang // IEEE Transactions on Power Systems. – 2008. – Vol. 23. – No. 4. – P. 1747 – 1755.
13. Alrashidi, M. R. A survey of particle swarm optimization applications in power system operations [Text] / M. R. Alrashidi, M. E. El-Hawary // Electric Power Components and Systems. – 2006. – Vol. 34. – P. 1349 – 1357.
14. Kennedy, J. Particle swarm optimization [Text] / J. Kennedy, R. Eberhart // Proc. IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942 – 1948.
15. Kennedy, J. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [Text] / J. Kennedy, R. Eberhart // Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 97). – 1997. – Vol. 5. – P. 4104 – 4109.
16. Халіл, Т. М. Застосування селективного методу рою частинок для оптимізації конфігурації розподільних мереж [Текст] / Т. М. Халіл, О. В. Горпинич // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 11 (81). – С. 28 – 33.

Рекомендовано до друку: проф. Разумним Ю.Т.