

Гайибов Тулкин Шерназарович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы» Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан

Сейтмуратов Байрамбай Турганбаевич

Студент 2 курса магистратуры по специальности «Электроэнергетические системы и сети» Ташкентского государственного технического университета, Республика Узбекистан

Gayibov Tulkin Shernazarovich

doctor of technical sciences, professor, head of chair «Power electrical plants, networks and systems» of Tashkent State technical University, Republic of Uzbekistan

Seytmuratov Bayrambay Turganbaevich

2nd year student of master courses on specialty «Power electrical systems and networks» of Tashkent State technical University, Republic of Uzbekistan

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО НАПРЯЖЕНИЯМ УЗЛОВ
OPTIMIZATION OF POWER NETWORKS REGIME ON VOLTAGES OF NODES**

Аннотация. В статье предложен эффективный алгоритм оптимизации режимов электрических сетей по напряжениям узлов с регулируемыми реактивными мощностями. Приведены результаты исследования вычислительных качеств описанного алгоритма.

Ключевые слова: электрическая сеть, потери мощности, оптимизация режима, алгоритм оптимизации, целевая функция, ограничение, итеративный процесс, ускоряющий коэффициент.

Summary. In this article the effective algorithm of optimization of power networks regime on voltages of nodes with controllable reactive power is offered. The results of research of calculation quality of the offered algorithm are presented.

Key words: power network, power losses, optimization of regime, algorithm of optimization, criterion function, limitations, iterative process, acceleration coefficient.

Актуальность проблемы. Одной из основных задач, решаемых при управлении режимами электроэнергетических систем (ЭЭС) на современном этапе является оптимизация режимов работы их сетей. Она предусматривает определения допустимого режима электрической сети ЭЭС, а при наличии допустимой области — нахождения режима с минимальными потерями активной мощности. Математически эту задачу можно формулировать следующим образом:

минимизировать функцию суммарных потерь активной мощности

$$\pi \sum_{i=1}^n P_i \rightarrow \min \quad (1)$$

при условиях:

$$\left. \begin{aligned} W_i &= P_i - P_B = 0, \quad i \in \Gamma + H; \\ W_i &= Q_i - Q_B = 0, \quad i \in \Gamma_1 + H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}, \quad i \in \Gamma + H; \quad (3)$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max}; \quad i \in \Gamma - \Gamma_1; \quad (4)$$

$$P_{l,\min} \leq P_l \leq P_{l,\max}; \quad l \in L_p; \quad (5)$$

$$I_{l,\min} \leq I_l \leq I_{l,\max}; \quad l \in L_l; \quad (6)$$

где n — число узлов в электрической сети (кроме балансирующей); H, Γ — множество нагрузочных и генераторных узлов; Γ_1 — множество генераторных узлов с нерегулируемыми реактивными мощностями; L_p, L_l — множество ветвей, в которых контролируются

потоки активной мощности и токи, соответственно. В условиях наличия в ЭЭС трансформаторов с регулируемыми коэффициентами трансформации в число ограничений входят также соответствующие ограничения на пределы их изменения.

Широко распространенные алгоритмы решения этой задачи [1, с. 346–355; 2, с. 218–236] обладают рядом преимуществ характеризуемых, в основном, простотой, возможностью легко учитывать простые и сложные ограничения. Вместе с тем, для них характерны некоторые недостатки, связанные с ненадежностью сходимости итеративного вычислительного процесса при оптимизации тяжелых режимов электрических сетей с учетом множества простых и функциональных ограничений в виде неравенств. Поэтому вопросы усовершенствования этих алгоритмов остаются актуальной задачей.

Алгоритм оптимизации. Здесь предлагается алгоритм оптимизации режимов электрических сетей по напряжениям узлов с регулируемыми реактивными мощностями, обладающий быстрой и надежной сходимостью итеративного вычислительного процесса.

В нем учет простых ограничений осуществляется закреплением на каждой итерации, переменных вышедших за допустимые пределы, на предельных значениях с проверкой необходимости их открепления в последующих итерациях. Ограничения, наложенные на зависимые переменные, учитываются штрафными функциями, имеющими квадратичный вид [1, с. 351–353; 2, с. 59–67; 3, с. 267–276; 4, с. 147–148].

Задача (1)–(6) сводится к минимизации функции Лагранжа

$$L = \pi + III + \sum_{i \in \Gamma + H} \lambda_i^+ W_i^+ + \sum_{i \in \Gamma_1 + H} \lambda_i^- W_i^- \quad (7)$$

В (7) III – суммарная штрафная функция; λ_i^+ , λ_i^- – множители Лагранжа.

В точке, где функция L имеет минимальное значение, выполняется условие равенства нулю частных производных по всем неизвестным:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \lambda_i^+} = 0, i \in \Gamma + H; & \frac{\partial L}{\partial \lambda_i^-} = 0, i \in \Gamma_1 + H; \\ \frac{\partial L}{\partial \delta_i} = 0, i \in \Gamma + H; & \frac{\partial L}{\partial U_i} = 0, i \in \Gamma_1 + H; & \frac{\partial L}{\partial U_t} = 0, t \in \Gamma - \Gamma_1. \end{cases} \quad (8)$$

Предлагаемый алгоритм предусматривает решения полученной системы нелинейных уравнений (8) делением на три системы. Они решаются последовательно, оставляя при этом значения неизвестных параметров других систем неизменными. Первая система, получаемая из первых двух условий, представляет собой уравнений узловых напряжений. Она решается по алгоритму, описанному в [3, 161–165]. Затем решением системы линейных алгебраических уравнений получаемых из третьей и четвертой условий определяются множители λ_j^+ и λ_j^- . Оптимальные напряжения узлов с источниками реактивной мощности находятся на основе поузлового решения системы, получаемой из последней условия. Для повышения надежности сходимости вычислительного процесса найденные оптимальные напряжения в каждой $k+1$ -й итерации корректируются по формуле

$$U_{t,кор}^{(k+1)} = U_{t,кор}^{(k)} + \beta_t^{(k+1)} (U_t^{(k+1)} - U_{t,кор}^{(k)}), \quad (9)$$

где $\beta_t^{(k+1)}$ – ускоряющий коэффициент, который находится из условия:

$$\beta_t^{(k+1)} = \begin{cases} \mu_1 \beta_t^{(k)} & \text{если } \Delta U_t^{(k+1)} \cdot \Delta U_t^{(k)} > 0, \\ \mu_2 \beta_t^{(k)} & \text{если } \Delta U_t^{(k+1)} \cdot \Delta U_t^{(k)} < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где μ_1, μ_2 – множители, выбираемые как в [2] $\mu_1 = 1,3; \mu_2 = 0,4$.

Расчетно-экспериментальные исследования. Вычислительные качества алгоритма исследованы на

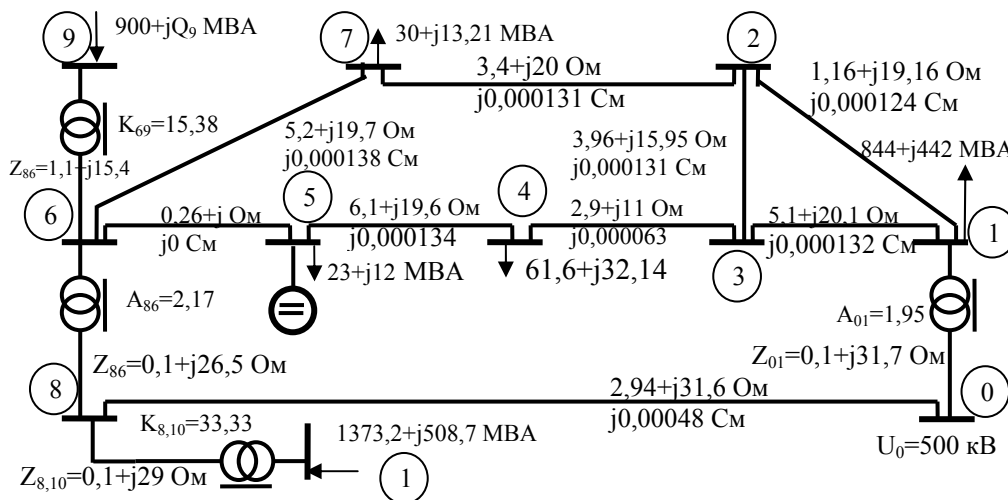


Рис. 1. Схема электрической сети

Таблица

Зависимость число итераций от начального значения ускоряющего коэффициента

$\beta_t^{(0)}$	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5
Оптимизация предлагаемым алгоритмом	20	19	13	11	10	10	9	8	13
Оптимизация по алгоритму [3]	24	21	18	16	15	19	Процесс расходится		

примере оптимизации режима электрической сети, схема которой представлена на рисунке. Оптимизация осуществлялась по напряжениям узлов 5 и 9, которые имеют регулируемые источники реактивной мощности.

Оптимальным результатом, полученным эталонным методом является следующее: $U_5=252,925$ кВ, $U_9=17,221$ кВ, $Q_{5\Sigma}=-272,022$ МВАР, $Q_9=165,572$ МВАР, $\pi=77,39$ МВт.

В таблице приведены числа выполненных итераций для получения оптимального результата при оптимизации предлагаемым алгоритмом с различными начальными значениями ускоряющего коэффициента и алгоритмом, основанным на использовании градиентного метода, описанным в [2, 218–236].

Выводы. 1. Предложен эффективный алгоритм оптимизации режимов электрических сетей по напряжениям узлов с источниками реактивной мощности, основанный на использовании необходимого условия экстремуму целевой функции. Он обладает надежной и быстрой сходимостью итеративного расчетного процесса.

2. Эффективность оптимизации режимов электрических сетей предложенным алгоритмом зависит от значений ускоряющих коэффициентов. Для обеспечения надежной сходимости итеративного процесса целесообразно выбрать его значение маленьким числом. Оптимальное значение этого коэффициента, в каждом конкретном случае следует выбрать исходя из опытов эксплуатации электрической сети.

Литература

1. Автоматизация диспетчерского управления в электро-энергетике/ Под общ. ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 648 с.
2. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. В.М. Горнштейна — М.: Энергия, 1981. — 336 с.
3. Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х. Расчеты установившихся режимов электроэнергетических систем и их оптимизация. Ташкент: Молия, 1999. — 377 с.
4. Насыров Т.Х., Гайибов Т.Ш. Теоретические основы оптимизации режимов энергосистем. — Т.: «Fan va texnologiya», 2014, 184 с.

References

1. Automation of dispatching management in power energetics/ Under general edition of Yu.N. Rudenko and V.A. Semyonov. — M.: Publishing house of MEI, 2000. — 648 p.
2. The methods of power systems regime optimization/ Under ed. Of V.M. Gornshteyn. — M.: Energiya, 1981. — 336 p.
3. Fazilov Kh.F., Nasirov T. Kh. Calculations of steady state regimes of power electrical systems and their optimization. Tashkent: Moliya, 1999. — 377 p.
4. Nasirov T. Kh., Gayibov T. Sh. The theoretical basis of power systems regime optimization. — T.: «Fan va texnologiya», 2014, 184 p.