К вопросу расчета установившихся режимов электроэнергетических систем

Е.Ю. Микаэльян, М.А. Трубицин

Ростовский государственный университет путей сообщения
г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Расчет установившегося режима электрической сети выполнен с помощью метода, использующего в качестве коэффициентов матрицу узловых проводимостей. Сущность предложенного подхода заключается в методике уточнения напряжений и нагрузок узлов на каждом шаге обратного хода алгоритма Гаусса. Результаты расчетов, выполненные с помощью предложенного метода, при расчете систем с большим числом узлов показали сходимость итерационного процесса с небольшим замедлением (по сравнению с методом Ньютона). Однако замедление сходимости процесса решения уравнения установившегося режима компенсируется существенным уменьшением вычислений на одной итерации, и, следовательно, увеличением скорости процесса обработки информации.
Ключевые слова: компенсирующие устройства, электроэнергетика, состояние сети, матрица узловых проводимостей, метод Гаусса, алгоритм, методика Ньютона, электрические узлы, итерации, сходимость, алгоритм.

При решении многих практических задач электроэнергетики важным и необходимым является расчет установившегося режима электрической сети [1,2]. Широкое применение для такого расчета получил метод Ньютона и его модификации [3,4]. Здесь в качестве коэффициентов системы уравнений используется матрица Якоби, элементы которой определяются аналитически. Дифференцирование выражений для активных и реактивных мощностей узлов по соответствующим переменным и требует перерасчета по каждой итерации [5,6].

Рассмотрим метод расчета установившегося режима, использующий в качестве коэффициентов матрицу узловых проводимостей $\underline{Y}$ в комплексной форме, и обладающий достаточно быстрой сходимостью.

В качестве исходного уравнения состояния сети рассмотрим известный линеаризованный вид, основанный на использовании двух членов ряда Тейлора [7,8] и записанный в форме итеративного расчета:

$$YU\Delta^{(k)} = \left[\overset{*}{U}_Д^{(k-1)}\right]^{-1} \overset{*}{S} - \Delta\overset{*}{U}_Д^{(k)} \left[\overset{*}{U}_Д^{(k-1)}\right]^{-1} \dot{I}^{(k-1)} = \dot{I}^{(k-1)} - \Delta\overset{*}{U}_Д^{(k)} \, Y_H^{(k-1)} \qquad (1)$$

где: $Y_H^{(k-1)}$ матрица – столбец, соответствующая некоторой проводимости на землю, получающейся заменой нагрузки $\dot{S}$;

$\Delta\overset{*}{U}_Д^{(k)}$ - диагональная матрица сопряженных комплексов поправок напряжений в узлах, полученных на к-ой итерации расчета, к вектору $\overset{*}{U}^{(k-1)}$ (или к вектору $\overset{*}{U}_Д^{(k-1)}$);

$\dot{I}^{(k-1)}$ - вектор-столбец узловых токов

Сущность предложенного подхода заключается в методике уточнения напряжений и нагрузок узлов на каждом шаге обратного хода алгоритма Гаусса [9,10]. Рассмотрим этот вопрос подробно. Вычислительный процесс в принципе предполагает повторение до нужной сходимости внешних итерационных циклов, каждый из которых, например, к-ый, состоит из следующих двух операций:

1.Прямой ход алгоритма Гаусса без учета последней составляющей в (1) при узловых токах $\dot{I}^{(k-1)}$, отвечающих некоторому первоначально заданному или полученному на предыдущей итерации напряжению $\dot{U}^{(k-1)}$. В итоге справа образуется вектор-столбец эквивалентированных токов узлов $\dot{I}_э^{(k-1)}$. Вторая составляющая линеаризованной нагрузки в (1) для эквивалентной системы определится по формуле $\underline{\dot{Y}}_{нэ}^{(k-1)} = \left[\overset{*}{U}_Д^{(k-1)}\right]^{-1} \dot{I}_э^{(k-1)}$ (2)

2.На каждом шаге обратного хода Гаусса найденное для $i-$го узла падение напряжения $\dot{U}_{Дi}^{(k,1)}$ позволяет определить $\Delta\overset{*}{U}_i^{(k,1)} = \overset{*}{U}_{\square,i}^{(k-1)} - \overset{*}{U}\square_i^{(k,1)}$, скорректировать нагрузки в соответствии с правой частью уравнения (1) и найти новые значения падения напряжения $\dot{U}_i^{(k,2)}$. Затем, таким же образом для данного $i-$го узла определяются $\dot{U}_{\square}^{(k,3)}, \dot{U}_{\square}^{(k,4)}$ и т.д.

Данная итеративная процедура сходится, в конечном счете, после n шагов к некоторому падению напряжения $\dot{U}_{\square i}^{(k,n)}$.

После этого описания процедура производится для предыдущего узла получаемого по алгоритму Гаусса.

Непосредственное использование такого двойного цикла ($k-$ внешнего, $n-$внутреннего) сильно увеличило бы время решения задачи. Можно, однако, показать, что для определения установившихся значений неизвестных вовсе не следует проводить указанные расчёты.

Запишем несколько внутренних итераций по п.2.

На первой итерации получаемое падение напряжения определяется согласно формуле:

$$\dot{U}_{\square i}^{(k,1)} = \frac{\dot{I}_{эi}^{(k)}}{\underline{y}_{ii,э}} + \sum \frac{\underline{y}_{ij,э}}{\underline{y}_{ii,э}} \dot{U}_{\square i}^{(k)} = \square \overset{*}{U}_i^{(k-1)} - \square \overset{*}{U}_i^{(k,1)} \tag{3}$$

на второй

$$\dot{U}_{\square i}^{(k,2)} = \dot{U}_{\square i}^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \square \overset{*}{U}_i^{(k,1)} = \overset{*}{U}\square_i^{(k-1)} + \square \overset{*}{U}_i^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \square \overset{*}{U}_i^{(k,1)} \tag{4}$$

На третьей

$$\begin{gathered}\dot{U}_{\square i}^{(k,3)} = \dot{U}_{\square i}^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \left\{ \overset{*}{U}_{\square,i}^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \square \dot{U}_i^{(k,1)} - \overset{*}{U}_{\square,i}^{(k-1)} \right\} = \\ = \dot{U}_{\square,i}^{(k,1)} + \square \dot{U}_i^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \square \overset{*}{U}_i^{(k,1)} + \left| \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \right|^2 \square \dot{U}_i^{(k,1)}\end{gathered} \tag{5}$$

На $n-й$ итерации, при условии, что n четное число:

$$\dot{U}_{\Delta,i}^{(k,n)} = \dot{U}_{\Delta,i}^{(k-1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \left\{ \overset{*}{U}{}^{(k,1)}_{\Delta,i} - \dots \right\} = \dot{U}_{\Delta,i}^{(k-1)} + \left(\Delta\dot{U}_i^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \Delta\overset{*}{U}{}_i^{(k,1)} \right) + \left| \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \right|^2 *$$
$$* \left(\Delta\dot{U}_i^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \Delta\overset{*}{U}{}_i^{(k,1)} \right) + \ldots + \left| \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \right|^{(n-2)} \left(\Delta\dot{U}_i^{(k,1)} - \frac{\underline{Y}^{(k-1)}_{НЭ,i}}{\underline{y}_{ii,э}} \Delta\overset{*}{U}{}_i^{(k,1)} \right). \qquad (6)$$

Из (6) видно, что решение уравнения (1) для $i-$го узла есть сумма членов бесконечно убывающей геометрической прогрессии и найти его можно без организации внутренних итерационных циклов по формуле:

$$\dot{U}_{\Delta,i}^{(k)} = \dot{U}_{\Delta,i}^{(k-1)} + \delta\dot{U}_{\Delta,i}^{(k)} = \dot{U}_{\Delta,i}^{(k-1)} + \frac{\Delta\dot{U}_i^{(k,1)} - \Delta\overset{*}{U}{}_i^{(k,1)} \left(\underline{Y}^{(k-1)}{}_{НЭ,i} / \underline{y}_{ii,э} \right)}{1 - \left(\left| \underline{Y}^{(k-1)}{}_{НЭ,i} \right|^2 / \left| \underline{y}_{ii,э} \right|^2 \right)}. \qquad (7)$$

Определяя по формуле (7) величину $\dot{U}_{\Delta,i}^{(k)}$, переходим в процессе обратного хода Гаусса к предыдущему по исключению узлу, и аналогичным образом вначале вычисляем $\dot{U}_{\Delta,i}^{(k,1)}$ по формуле (3), что позволяет определить величину $\Delta\dot{U}_i^{(k,1)}$, а затем уточняем напряжение этого узла по формуле (7). Закончив обратный ход Гаусса имеем, существенное улучшение поправки к исходным напряжениям по сравнению с результатом обычного обратного хода Гаусса. Затем и прямой, и усовершенствованный обратный ход решения системы уравнений повторяем до требуемой сходимости итерационного процесса.

Разработанная методика расчета установившегося режима позволяет применить ее в сочетании с расчетом удельных приростов потерь (3) при решении задачи оптимизации режимов, используя единую информационно-методическую базу.

Расчеты установившихся режимов реальных энергосистем объемом 300-850 узлов с максимальными нагрузками показали, что сходимость итерационного процесса по изложенной методике несколько замедленна по сравнению с методикой Ньютона. Замедление сходимости процесса решения уравнения установившегося режима компенсируется существенным уменьшением вычислений на одной итерации. Этот факт иллюстрируется следующим примером: расчет установившегося режима для реальной энергосистемы по методу Ньютона идет не более 1 мин за 14 итераций, по данному методу не более 56 сек и 17 итераций. Таким образом, многократное применение данного метода расчета установившегося режима в составе алгоритма оптимизации позволит существенно экономить время расчетов.

Литература

1. Микаэльян Е.Ю., Трубицин М.А. Методология системного расчета компенсации реактивных мощностей в электросетях промышленных предприятий и энергосистемах // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4584

2. Микаэльян Е.Ю., Трубицин М.А, Системный расчёт компенсации реактивных мощностей в электрических системах // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/47777

3. Hopwood B., Mellor M., O'Brien G. Sustainable development: mapping different approaches // Sustainable development. - 2005. - Vol.13, Is.1.-pp.38-52.

4. Kelley, C.T. Iterative methods for optimization // Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. – 196 p.

5. Зайцев А.И., Плехов А.С. Применение компенсационных преобразователей в целях энергосбережения // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж, 2010. №4 (20).с.38-44.

6. Лазебник А. И. Аналитический метод расчета производных от потерь мощности в электрической сети. — В кн.: Применение математических методов и вычислительных машин в энергетике. Кишинев: Изд-во All Молд. ССР, 1968. Вып. 2, с. 16—23.

7. Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. Горнштейна В. М.- М.: Энергия, 1981. —336 с.

8. Каялов Г.М., Молодцов В.С. Матрично-вычислительный метод анализа компенсации реактивных нагрузок сложной электрической сети. — Электричество, 1976, № 2, с. 16—21.

9. Ковалев И.Н. Метод расчета переменных реактивных нагрузок в электрических сетях. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1973, № 2, с. 79-90.

10. Гераскин О.Т. Матричные формулы для определения первых частных производных от потерь мощности по активным и реактивным мощностям узлов электрической сети. - Изв. Вузов СССР. - Энергетика, 1981, М, с. 3-8.

References

1. Mikayel'yan E.YU, Trubitsin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4584

2. Mikayel'yan E.YU, Trubitsin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/47777

3. Hopwood B., Mellor M., O'Brien G. Sustainable development. 2005. Vol.13, Is.1.pp.38-52.

4. Kelley, C.T. Iterative methods for optimization. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.196 p.

5. Zajcev A.I., Plehov A.S. Jelektrotehnicheskie kompleksy i sistemy upravlenija. Voronezh, 2010. №4 (20).pp.38-44.

6. Lazebnik A. I. Analiticheskij metod rascheta proizvodnyh ot poter' moshchnosti v elektricheskoj seti [Analytical method for calculating derivatives of

power losses in the electric network]. V kn.: Primeneniye matematicheskikh metodov i vychislitel’nykh mashin v energetike. Kishinev: Izd-vo All Mold. SSR, 1968. Vyp. 2, pp.16-23.

7. Gornshtejn V. M., Miroshnichenko B. P., Ponomarev A. V. i dr. Metody optimizatsii rezhimov energosistem [Methods for optimizing power system modes]. Pod red. Gornshteyna V. M. M.: Energiya, 1981. 336 p.

8. Kayalov G.M., Molodtsov B.C. Elektrichestvo, 1976, № 2, pp.16-21.

9. Kovalev I.N. Izv. AN SSSR. Energetika i transport, 1973, №2, pp.79-90.

10. Geraskin O.T. Izv. Vuzov SSSR. Energetika, 1981, M, pp.3-8.