

Рис. 1. Колебания проводов в вертикальной плоскости:
1 — расчет по КП; 2 — [4]

позволяет найти амплитуды, максимальные тяжения, а также определить развитие автоколебаний или их затухание для различных схем установки механических гасителей и их параметров. Сравнение результатов расчета по КП и [4], приведенное на рис. 1, подтверждает достоверность разработанных математической модели и алгоритма расчета пляски одиночных проводов. Хорошее совпадение характеристик процесса колебаний проводов наблюдается при наличии механических гасителей колебаний. Указанное обстоятельство позволяет использовать КП для оценки эффективности гашения пляски с помощью механических гасителей и выбора схем их установки в пролетах воздушных ЛЭП с одиночными проводами.

ВЫВОД

Разработан универсальный численный метод расчета динамических характеристик пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП напряжением 35–220 кВ при комбинировании различных

принципов конструирования механических гасителей, отличающийся учетом начального закручивания проводов. Используя численное моделирование, можно разработать конкретные схемы установки механических гасителей для воздушных ЛЭП с различными физико-механическими параметрами и геометрическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловецкая Е. М., Савваитов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10–750 кВ // Электрические станции. — 1987. — № 2. — С. 36–40.
2. Wang I., Lilien J. L. Overhead electrical transmission line galloping. A full multi-Span – 3-DOF-Model, some Application and design recommendations // IEEE Transaction on Power Delivery. — Vol. 13, № 3. — 1998. — P. 909–916.
3. Ловецкая Е. М., Савваитов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ эффективности средств ограничения и подавления пляски проводов // Электрические станции. — 1987. — № 4. — С. 48–51.
4. The Simulation. Method of Galloping of Overhead Transmission Line // Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. — Joint Meeting of UNIPEDE, CORECH-Galloping, 1983, Kyoto, Japan.

УДК 621.311

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Канд. техн. наук ФУРСАНОВ М. И., инж. ЗОЛОТОЙ А. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Одной из основных задач службы режимов электросетевых предприятий является расчет установившихся режимов замкнутых электрических сетей. В Республике Беларусь данные расчеты выполняются с использованием зарубежных программ высокого уровня, таких как, например, пакет RASTR, разработанный в УПИ

(г. Екатеринбург) и много лет эксплуатируемый в энергосистемах стран СНГ. В настоящее время ситуация существенно не изменилась. По-прежнему на обновление и сопровождение импортных программных продуктов, поддержание их работоспособности неоправданно тратятся государственные валютные средства, в то

время как рассматриваемая проблема может быть успешно решена собственными силами и средствами. Кроме того, возникают проблемы при адаптации импортных комплексов в энергосистеме с учетом ее структурных особенностей. Следует также добавить, что перечень задач, решаемых на базе расчетов установившихся режимов основных электрических сетей, реализованный в зарубежных программах, не всегда соответствует запросам эксплуатации. Поэтому представляется целесообразным и перспективным разработать собственный программного продукта, позволяющего не только производить расчет режимов, но и решать другие технологические задачи электрических сетей. Эксплуатация такой программы, несомненно, будет гораздо дешевле любого импортного аналога.

С учетом сказанного авторами разработаны и апробированы усовершенствованные алгоритм и программа расчета установившихся режимов основных электрических сетей, основные положения которого приведены ниже. В основе решения задачи лежит расчет напряжений в узлах электрической сети методом Ньютона, имеющим по сравнению с другими методами ряд преимуществ.

Система нелинейных уравнений, описывающая установившийся режим работы основной электрической сети, записана в форме баланса активных и реактивных мощностей в декартовой системе координат. При этом в качестве искоемых величин выступают действительные U' и мнимые U'' составляющие напряжений в узлах электрической сети.

Уравнение узловых напряжений в форме баланса активной и реактивной мощностей в декартовой системе координат для узла p можно записать

$$|U_p|^2 Y_{pp} + S_{наг p}^* - S_{ген p}^* - U_p \sum_q (Y_{pq} U_q) = 0. \quad (1)$$

Если обозначить

$$S_p^* = S_{наг p}^* - S_{ген p}^*, \quad (2)$$

то получим

$$|U_p|^2 Y_{pp} + S_p^* - U_p \sum_q (Y_{pq} U_q) = 0, \quad (3)$$

где

$$U_p = U'_p + jU''_p - \text{напряжение в узле } p \text{ схемы;}$$

мы;

$$Y_{pp} = y'_{pp} - jy''_{pp} - \text{собственная проводимость узла } p;$$

$$Y_{pq} = y'_{pq} - jy''_{pq} - \text{взаимная проводимость узлов } p \text{ и } q;$$

$$U_q = U'_q + jU''_q - \text{напряжение в узле } q;$$

$$S_p^* = P_p - jQ_p - \text{сопряженный комплекс нагрузки в узле } p.$$

После преобразования (3) и выделения из него действительной и мнимой частей получим систему из двух уравнений (4) для узла p , соответствующую балансу активной и реактивной мощностей в узле:

$$\begin{cases} (U'_p{}^2 + U''_p{}^2) y'_{pp} + P_p - U'_p AP_p - U''_p BP_p = 0; \\ (U'_p{}^2 + U''_p{}^2) y''_{pp} + Q_p + U'_p BP_p - U''_p AP_p = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{cases} AP_p = \sum_q (y'_{pq} U'_q + y''_{pq} U''_q); \\ BP_p = \sum_q (y'_{pq} U''_q + y''_{pq} U'_q). \end{cases} \quad (5)$$

Расчет установившегося режима методом Ньютона сводится к итерационному решению системы нелинейных уравнений (4) путем ее последовательной линеаризации в точках приближения к решению на каждом шаге.

Линеаризованная система уравнений (4) на k -й итерации метода Ньютона имеет вид

$$J^k \begin{bmatrix} \Delta U'^{k+1} \\ \Delta U''^{k+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P_{нб}^k \\ Q_{нб}^k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где J^k – матрица Якоби функций небалансов мощностей в узлах сети, вычисляемая в точке

$$\begin{bmatrix} U'^k \\ U''^k \end{bmatrix},$$

$$J^k = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_{нб}}{\partial U'} \right) & \left(\frac{\partial P_{нб}}{\partial U''} \right) \\ \left(\frac{\partial Q_{нб}}{\partial U'} \right) & \left(\frac{\partial Q_{нб}}{\partial U''} \right) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Элементы матрицы Якоби легко рассчитываются путем дифференцирования (4).

Для оценки начального приближения U' и U'' применяется специально разработанный алгоритм. Кроме того, в качестве начального приближения могут использоваться либо стандартное приближение «плоский старт» (номинальные напряжения и нулевые фазовые углы), либо результаты предыдущих расчетов с применением или без применения стартового алгоритма.

В результате решения системы линейных алгебраических уравнений (6) определяется вектор-столбец поправок $\begin{bmatrix} \Delta U_i'^{k+1} \\ \Delta U_i''^{k+1} \end{bmatrix}$ и новые значения искомых величин:

$$\begin{cases} U_i'^{k+1} = U_i'^k + \Delta U_i'^{k+1}; \\ U_i''^{k+1} = U_i''^k + \Delta U_i''^{k+1}. \end{cases} \quad (8)$$

Расчет прекращается либо при выполнении его заданной точности (заданной малости величин небалансов мощностей в узлах сети), либо при исчерпании заданного числа итераций расчета установившегося режима в случае его обрыва.

Корректность приведенных аналитических выражений подтверждена расчетами, выполненными с использованием пакета MathCAD, а также сопоставительными расчетами на схемах контрольных примеров по программам: авторской, RASTR, MUSTANG, K&T.

Программная реализация алгоритма выполнена на языке Pascal в среде визуального программирования Delphi под Windows и занимает 350 кбайт дисковой памяти.

Алгоритм программы обладает надежной сходимостью и ориентирован на расчет электрических сетей больших объемов. Предельный объем рассчитываемой схемы ограничивается исключительно возможностями памяти используемой ЭВМ. Как известно, основной вычислительной трудностью при реализации методов ньютоновского типа на ЭВМ является необходимость решения на каждом шаге системы линейных алгебраических уравнений (6). Матрица коэффициентов (7) такой системы для больших электрических схем имеет высокий порядок. Время решения такой системы при выполнении арифметических операций со всеми элементами и требуемый объем памяти для больших электрических схем чрезвычайно велики. Преодоление этой трудности связано с малым числом ненулевых элементов в матрице

коэффициентов (7) и использованием специальных топологических методов упорядочения нумерации уравнений и переменных при решении системы линейных алгебраических уравнений со слабозаполненными матрицами различными методами факторизации.

Хранение слабозаполненных матриц в процессе расчета производится в блочно-компактной форме. Решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждом шаге выполняется методом двойной факторизации с применением оптимальной стратегии исключения неизвестных. Упорядочение неизвестных и распределение основной памяти для хранения ненулевых элементов матрицы коэффициентов СЛАУ производится один раз. Возможные изменения топологической структуры матрицы коэффициентов относительно расположения ненулевых элементов учитываются путем логических операций при решении СЛАУ. Арифметические операции производятся только над ненулевыми элементами матрицы коэффициентов СЛАУ. При решении СЛАУ применен ряд разгонных мероприятий, повышающих эффективность и быстродействие алгоритма. Расчет выполняется без предварительного приведения элементов электрической сети к одной ступени напряжения. В процессе расчета напряжений нагрузка узла, заданная мощностью, может пересчитываться в проводимость. Расчет напряжений нагрузочных узлов проводится как с учетом, так и без учета статических характеристик нагрузки. Предусмотрена возможность задания статических характеристик нагрузки для каждого узла схемы в виде полиномов второй степени или использования стандартных характеристик. Если статические характеристики не учитываются, то в расчетах участвуют нагрузки узлов, заданные в исходных данных.

Линии в процессе расчета представляются полной П-образной схемой замещения, трансформаторы – полной Г-образной схемой замещения с возможностью задания комплексных коэффициентов трансформации.

Предусмотрена возможность задания генераторных узлов в схеме. К ним относятся узлы, в которых имеются источники реактивной мощности: синхронные генераторы и их эквиваленты, синхронные компенсаторы, батареи статических конденсаторов и т. п. В таких узлах задаются: модуль напряжения, активная генерация и допустимые пределы изменения реактивной гене-

рации. Кроме того, в генераторных узлах, как и в нагрузочных, могут быть заданы активная и реактивная мощности нагрузки, активная и реактивная проводимости шунта на землю. Искомыми в этих узлах являются величина генерации реактивной мощности и фаза напряжения. При этом в расчете осуществляется контроль заданных ограничений по генерации реактивной мощности генераторных узлов. В случае нарушения этих ограничений генерация реактивной мощности закрепляется на соответствующем нарушенном пределе и рассчитывается модуль напряжения в узле.

Для выбора точки отсчета в схеме задается балансирующий узел, в котором фиксируются модуль и фаза напряжения. В общем случае в

схеме их может быть несколько. Программных ограничений на количество таких узлов не устанавливается. Для балансирующих узлов определяется генерация активной и реактивной мощностей. По активным и реактивным мощностям могут быть заданы разные балансирующие узлы. Задание узлов, балансирующих по реактивной мощности, выполняется аналогично заданию генераторных узлов. В узлах, балансирующих по активной мощности, задаются фаза напряжения и реактивная генерация, также могут быть заданы активная и реактивная мощности нагрузки, активная и реактивная проводимости шунта на землю. Искомыми в таких узлах являются величина генерации активной мощности и модуль напряжения.

УДК 621.315

О ТОЧНОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФОРМЕ БАЛАНСА МОЩНОСТИ

Инженеры ТОМКЕВИЧ А. П., ЯНУШКЕВИЧ О. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Рассматривается задача расчета режима радиальной сети, состоящей из одной линии электропередачи (ЛЭП), в качестве физической модели которой используем П-образную схему замещения. Такую сеть опишем при помощи направленного взвешенного графа, состоящего из двух узлов и ребра. Каждый узел характеризуется двумя параметрами мощностью S_i и напряжением U_i ($i = 1, 2$). Ребро взвешено четырехмерным вектором (R, X, G, B) , компоненты которого будем считать известными величинами, не зависящими от параметров режима S_i и U_i . Направление графа отражает положительное направление перетока мощности по ЛЭП (на рис. 1 от узла 1 к узлу 2).

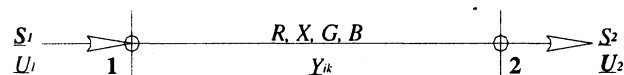


Рис. 1

Существует [1] ряд электротехнических методов для описания математической модели задачи: законы Кирхгофа, метод контурных токов,

метод узловых напряжений и др. В качестве математической модели задачи может быть использована система уравнений, полученная с помощью одного из этих методов.

В зависимости от способа представления узлов сети система уравнений получается линейной или нелинейной. В случае известных параметров S_i и U_i одного из узлов рассматриваемой сети получается линейная система уравнений, решение которой приведено в [1, 2]. В других случаях – система уравнений нелинейная и традиционно решается итерационными методами (Ньютона–Рафсона, Зейделя и др.), сходимость которых зависит от выбранного начального приближения и формы записи уравнений. Так, например, сходимость метода Ньютона–Рафсона будет наилучшей, если система уравнений составлена по методу узловых напряжений в форме баланса действительной и мнимой составляющих токов в декартовых координатах [3], несмотря на то, что метод контурных токов дает систему уравнений наименьшего порядка [4].

Рассмотрим математическую модель сети, полученную с помощью метода узловых напря-