



УДК 622.691.4:621.311

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ

В.В. Блюк, *valyablyk@mail.ru*, **М.С. Ершов**, *msershov@yandex.ru*, **А.Н. Комков**,
komkov.a@gubkin.ru **С.А. Головатов**, *s.golovatov@adm.gazprom.ru*

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва
ПАО «Газпром» г. Санкт-Петербург

В настоящее время функции автоматического управления в системах электроснабжения в полной мере осуществляются на кратковременном интервале и реализуются средствами релейной защиты и автоматики. В автоматизированных системах управления электроснабжением (АСУ ЭС) доминируют процессы сбора и первичной обработки информации, превалирующие над задачами принятия решений в ходе оперативного и долгосрочного управления системами электроснабжения. Одной из задач по расширению возможностей АСУ ЭС является функциональная задача по оперативному расчету режимов систем электроснабжения, решение которой позволит повысить удельный вес автоматизированных процессов, связанных с оперативным управлением электроснабжением на стадии нештатных и послеаварийных режимов. Задачи оперативного расчета по сравнению с задачами расчета режимов систем электроснабжения на проектной стадии имеют ряд особенностей, включая:

- требование высокого быстродействия расчетных алгоритмов и процедур счета;
- по возможности отказ от итерационных процедур счета, которые могут сопровождаться нарушением сходимости или большими невязками;
- по возможности отказ от арифметических операций с матрицами, которые при наличии разреженных матриц могут приводить к накоплению ошибок счета;
- возможность использования информации по параметрам, которые считают неизвестными в проектной постановке, но которые могут быть измерены и оцифрованы в процессе эксплуатации.

В данной работе рассматриваются алгоритмы, которые могут найти при реализации функциональной задачи оперативного расчета режимов АСУ ЭС.

THE PECULIARITIES OF ALGORITHMS OF CALCULATION OF MODES OF ELECTRICAL SYSTEMS FOR OPERATIONAL CONTROL SUPPLY

V.V. Bliuk M.S. Yershov, A.N. Komkov, S.A. Golovatov

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow
PJSC "Gazprom", St. Petersburg

Currently, the functions of automatic control in power supply systems are fully implemented in the short-term interval and implemented by means of relay protection and automation. Automated power supply management systems (ACS) are dominated by the processes of data collection and primary processing, which prevail over the tasks of decision-making in the course of operational and long-term management of power supply systems. One of the tasks to expand the capabilities of the ACS ES is a functional task for the operational calculation of the modes of power supply systems, the solution of which will increase the proportion of automated processes associated with the operational management of power supply at the stage of emergency and post-emergency modes. Tasks of operational calculation in comparison with tasks of calculation of modes of power supply systems at the design stage have a number of features, including:

- demand of high-performance computational algorithms and procedures for the account;
- if possible, the rejection of iterative counting procedures, which may be accompanied by a violation of convergence or large residuals;



- if possible, the rejection of arithmetic operations with matrices, which in the presence of sparse matrices can lead to the accumulation of errors in the account;

- the ability to use information on parameters that are considered unknown in the design statement, but which can be measured and digitized during operation.

This paper discusses algorithms that can find when implementing functional tasks in the operational calculation of the modes of automated control systems.

В настоящее время функции автоматического управления в системах электроснабжения в полной мере осуществляются на кратковременном интервале и реализуются средствами релейной защиты и автоматики. В автоматизированных системах управления электроснабжением (АСУ ЭС) доминируют процессы сбора и первичной обработки информации, преобладающие над задачами принятия решений в ходе оперативного и долгосрочного управления системами электроснабжения. Одной из задач по расширению возможностей АСУ ЭС является функциональная задача по оперативному расчету режимов систем электроснабжения, решение которой позволит повысить удельный вес автоматизированных процессов, связанных с оперативным управлением электроснабжением на стадии нештатных и послеаварийных режимов. Задачи оперативного расчета по сравнению с задачами расчета режимов систем электроснабжения на проектной стадии [1, 2] имеют ряд особенностей, включая:

- требование высокого быстродействия расчетных алгоритмов и процедур счета;
- по возможности отказ от итерационных процедур счета, которые могут сопровождаться нарушением сходимости или большими невязками;
- по возможности отказ от арифметических операций с матрицами, которые при наличии разреженных матриц могут приводить к накоплению ошибок счета;
- возможность использования информации по параметрам, которые считают неизвестными в проектной постановке, но которые могут быть измерены и оцифрованы в процессе эксплуатации.

В данной работе рассматриваются алгоритмы, которые могут найти при реализации функциональной задачи оперативного расчета режимов АСУ ЭС.

Задачи оперативного расчета должны включать:

- расчет рабочих режимов системы электроснабжения, которые возникают в ходе оперативного управления системой электроснабжения;
- расчет аварийного режима трехфазного короткого замыкания в системе электроснабжения для нормальной и временных схем, реализуемых в процессе оперативного управления системой электроснабжения.

При выполнении перечисленных задач решаются следующие подзадачи оперативного расчета:

- выбор базовой модели оперативного расчета;
- предварительная обработка и проверка исходной информации;
- корректировка и доопределение исходных данных;
- расчет режимов, возникающих на стадиях изменений состояния системы электроснабжения в ходе проектируемых оперативных переключений;
- оценка допустимости промежуточных и результирующего рабочих режимов, возникающих в ходе и результате оперативных переключений;



– оценка параметров режима короткого замыкания для нормальных и временных схем системы электроснабжения.

Результаты решения (выходная информация) задачи оперативного расчета могут быть представлены в виде выходных параметров и выходных сообщений.

Выходная информация, представляемая в виде параметров, является численным значением некоторой величины, вектора или массива.

Выходная информация, представляемая в виде сообщения, является логической переменной, идентифицирующей наступление того или иного события из фиксированного списка событий.

Для описания выходных параметров рекомендуется использовать следующий список:

– расчетные значения токов в ветвях системы внутреннего электроснабжения в расчетном режиме;

– направления мощности в ветвях системы внутреннего электроснабжения в расчетном режиме;

– потоки активной и реактивной мощности в схемообразующих ветвях системы и через секционные выключатели;

– потребление активной и реактивной мощности по вводам системы внутреннего электроснабжения;

– значения коэффициента загрузки для элементов системы внутреннего электроснабжения;

– возможное время существования расчетного режима по ограничениям пропускной способности элементов системы внутреннего электроснабжения;

– расчетные напряжения в узлах системы внутреннего электроснабжения.

Для описания выходных сообщений рассматриваемой задачи рекомендуется следующий список:

– перечень отключенных потребителей в расчетном режиме;

– сигнализация срабатывания защиты в расчетном режиме;

– сигнализация возможности срабатывания защиты в расчетном режиме;

– сигнализация недопустимых направлений мощностей в элементах системы внутреннего электроснабжения;

– идентификация перегруженных элементов в расчетном режиме.

Характеристика входной информации подробно изложена в работах [3, 4].

В основе метода оперативного расчета режимов систем электроснабжения лежат уравнения в форме баланса токов

$$\sum_{j=1}^n \underline{I}_{ij} = \underline{I}_i, \quad (i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n)$$

где \underline{I}_{ij} - комплексные величины токов по всем ветвям инцидентным i -ому узлу;

\underline{I}_i - инъекция комплексного тока в i -ом узле, задающая нагрузку или генерацию узла; n – число узлов схемы;



Комплексные значения токов \underline{I}_{ij} и мощностей \underline{S}_{ij} в ветвях, инцидентных i -ому узлу и инъекций тока \underline{I}_i и мощностей \underline{S}_i данного узла связаны выражениями

$$\underline{S}_{ij} = \sqrt{3}\underline{U}_i \underline{I}_{ij}^* = P_{ij} + jQ_{ij};$$

$$\underline{S}_i = \sqrt{3}\underline{U}_i \underline{I}_i^* = P_i + jQ_i;$$

$$\underline{I}_{ij} = \underline{S}_{ij}^* / \sqrt{3}\underline{U}_i^*;$$

$$\underline{I}_i = \underline{S}_i^* / \sqrt{3}\underline{U}_i^*.$$

где P_{ij} и Q_{ij} - значения активной и реактивной мощности по всем ветвям инцидентным i -ому узлу; P_i и Q_i - инъекции активной и реактивной мощности i -го узла; \underline{U}_i - напряжение i -го узла; \underline{I}_{ij}^* , \underline{I}_i^* , \underline{S}_{ij}^* , \underline{S}_i^* , \underline{U}_i^* - сопряженные значения соответствующих комплексных токов и мощностей.

Усредненные за время T значения активной и реактивной мощности могут быть определены по показаниям счетчиков

$$P_{ij} = W_{a.ij} / T;$$

$$P_i = W_{a.i} / T;$$

$$Q_{ij} = W_{p.ij} / T;$$

$$Q_i = W_{p.i} / T,$$

где $W_{a.ij}$ и $W_{p.ij}$ - потоки активной и реактивной электроэнергии, переданные за время T по ветвям, инцидентным i -ому узлу; $W_{a.i}$ и $W_{p.i}$ - инъекции активной и реактивной электроэнергии i -го узла.

Ток схемообразующей ветви, соединяющей i -ий и j -ий узлы определяется по закону Ома

$$\underline{I}_{ij} = (\underline{U}_i - \underline{U}_j) \underline{Y}_{ij}.$$

где \underline{Y}_{ij} - комплексная проводимость ветви ij .

Для систем промышленного электроснабжения, имеющих разомкнутую или сводимую к ней структуру электрических сетей, целесообразно использование метода свертки. При этом принимается, что напряжение в первом узле равно значению эквивалентной ЭДС источника питания. Ветви, содержащие нагрузку, считаются присоединенными своими концами к нулевому узлу, потенциал которого считается равным нулю. Схемообразующие ветви и ветви, содержащие нагрузку, описываются своими комплексными сопротивлениями (проводимостями).

Расчеты выполняются в две стадии. На первой стадии расчета осуществляется свертка схемы и определяются проводимости всех узлов схемы относительно нулевого узла, а также проводимости начал ветвей относительно этой же точки.



Для этого организуется выполнение цикла расчетов от «последнего» к «первому» узлам схемы

$$\underline{Y}_{ei} = 1/(\underline{Z}_{ei} + 1/\underline{Y}_{yk}), \quad i = \overline{1, n}$$

$$\underline{Y}_{yk} = \sum_{j=1}^m \underline{Y}_{ej}.$$

где \underline{Z}_{ei} - комплексное сопротивление i -ой ветви; \underline{Y}_{yk} - комплексная проводимость j -го узла; n - число узлов; m - число ветвей.

На второй стадии рассчитываются напряжения узлов и токи ветвей. Цикл расчетов организуется от «первого» узла к «последнему» узлу

$$\underline{U}_j = \underline{U}_k - \underline{I}_i \underline{Z}_{ei},$$

$$\underline{I}_i = \underline{U}_j - \underline{I}_i \underline{Y}_{ei}.$$

Напряжение источника принимается по фазе за базовое, при этом начальная фаза напряжения источника, как правило, принимается равной нулю. Начальные фазы всех других величин определяются относительно данного напряжения.

Преимуществом метода свертки по сравнению с методом узловых напряжений является отсутствие проблемы сходимости численного решения.

Алгоритмы расчета, основаны на изложенном методе и включают следующие основные блоки:

- алгоритм определения суммарной мощности узла, реализующий операцию свертки части схемы со стороны нагрузки, и приводящий распределенную нагрузку к общей комплексной нагрузке узла;
- алгоритм расчета режима схемы с замкнутой структурой, реализующей операцию свертки схемы со стороны источников;
- алгоритм расчета режима схемы с разомкнутой структурой, реализующей операцию разворачивания схемы от узла, принимаемого за источник до ветвей, содержащих приемники электроэнергии.

В данной статье остановимся на исходных положениях поиска путей в схеме электроснабжения, которые используются в указанных алгоритмах расчета.

Все пути схемы электроснабжения сохраняются в матрице путей. Матрица путей состоит из векторов путей. В матрицу путей включаются только действующие, возможные и нереализуемые пути. Матрица невозможных путей имеет тот же вид, что и матрица путей. Пользователь имеет возможность перевести любой невозможный путь в другую категорию.

Длина вектора пути соответствует общему числу элементов системы внутреннего электроснабжения: централизованных источников питания; автономных источников питания; узлов схемы внутреннего электроснабжения; ветвей схемы внутреннего электроснабжения. Отдельно создается вектор идентификаторов, содержащий индивидуальные идентификаторы всех перечисленных элементов системы внутреннего электроснабжения. Позиция каждого элемента в векторе идентификаторов используется для идентификации его места в матрице путей.



Вектор пути содержит признаки начала и конца пути, отметки об исключении данного элемента системы внутреннего электроснабжения из данного пути, признаки текущего состояния элемента и дополнительные элементы. В качестве дополнительных элементов используются признак, однозначно классифицирующий путь.

Началом любого пути является один из «нижних» узлов системы внутреннего электроснабжения объекта. Концом любого пути является один из источников питания, как внешних (централизованных), так и автономных. Под «нижним» узлом системы понимается такой узел, для которого любая из инцидентных ему отходящих ветвей является только ветвью с нагрузкой.

Процедура поиска путей начинается с выделения всех «нижних» узлов. Для каждого из таких узлов определяются возможные источники электроснабжения. Формируется первая пара узлов «начало пути – конец пути».

Для сформированной пары узлов ищутся все пути между ними. Для поиска всех путей между двумя узлами используется алгоритм, излагаемый ниже. Каждый из найденных путей записывается в виде вектора в матрицу путей, либо в матрицу невозможных путей.

Признаком, достаточным для записи вектора пути в матрицу невозможных путей, является выполнение любого из условий невозможности пути, заданного пользователем. Каждый вновь сформированный путь, не являющийся невозможным, предъявляется для контроля пользователю, который может принять решение об отнесении его к категории невозможных путей. По показателям текущего состояния элементов, составляющих путь, определяется и записывается его текущая классификационная характеристика.

После выполнения указанной процедуры для избранной пары узлов, выполняется поиск нового конца пути для текущего «нижнего» узла. При отсутствии возможных конечных узлов осуществляется переход к следующему из не просмотренных «нижних» узлов. Если не просмотренных «нижних» узлов больше нет, то данный этап алгоритма считается завершённым.

Завершающим этапом является поиск невозможных путей, связывающих каждый из нижних узлов с источниками питания, которые для данного узла не являются основными или резервными. На этом этапе выполняются те же процедуры, что и предыдущем, за исключением запроса пользователю на подтверждение классификации пути.

Задача заключается в нахождении всех путей от нагрузки к источнику без повторного прохождения одного узла и без образования циклов – следовательно, в нахождении всех простых цепей (минимальных путей).

Алгоритм состоит из трех частей:

- 1) Алгоритм расстановки меток.
- 2) Алгоритм создания выходной матрицы.
- 3) Алгоритм создания матрицы путей.

Решение первого алгоритма основывается на алгоритме поиска «в ширину», то есть построения деревьев, где каждая вершина (узел схемы) является источником следующей ветви, отправляясь из заданной вершины, посещаются все смежные с ней вершины. Каждая уже посещенная точка (вершина) становится



источником новой ветви и т. д. Ветвление происходит от уровня к уровню, так что на уровне 1 задача подразделяется на подзадачи, и каждая из этих задач исследуется раньше, чем задачи уровня 2 и т.д. Поэтому надо строго следовать порядку выбора вершин. В пределах поколения надо следовать нумерации. Новым поколением занимаемся, только оформив полностью предыдущее. Номера вершин заносить в очередь, где первой стоит отправная вершина.

Для реализации алгоритма дополнительно создаются:

- матрица достижимости графа $[\overline{1}, n; \overline{1}, n]$;
- матрица запретов $[\overline{1}, n]$;
- вспомогательный рабочий массив $[\overline{1}, n; \overline{1}, m]$ в котором будет формироваться алгоритм расстановки меток;
- вспомогательный выходной массив $[\overline{1}, n; \overline{1}, n]$ для хранения нужных пройденных цепей. В этом массиве и будут сформированы искомые пути;
- матрица соответствия $[n, 2]$, где n – количество элементов в схеме;
- матрица путей $[p, n]$, где p – количество всех найденных путей.

Матрица достижимости содержит в себе все узлы, достижимые из каждого из узлов за один шаг.

Матрица запретов представляет собой вектор, содержащий конечные вершины графа, которые не могут быть концом данного пути. Например, при поиске пути от узла-потребителя k до источника 1 в матрицу запретов будут включены все источники, кроме источника 1 и все потребители, кроме узла-потребителя k .

После формирования матрицы запретов из матрицы достижимости удаляются все узлы, вошедшие в матрицу запретов.

Список цитируемой литературы

1. Теоретические основы электротехники: в 3-х т., т.1/К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Белоусенко И.В., Горюнов О.А., Головатов С.А., Ершов М.С., Егоров А.В. Функциональные задачи АСУ электроснабжением объектов энергообеспечения ОАО «Газпром». Оценка надежности внешнего электроснабжения/ Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, №1 (254), 2009, с.161-170.
4. Ершов М.С., Егоров А.В. Функциональные задачи АСУ ЭС. Оценка надежности внешнего электроснабжения, оперативный расчет режимов систем электроснабжения// Автоматизация энергетических объектов и систем энергообеспечения технологических объектов ОАО «Газпром» / Материалы заседания секции «Энергетика» Научно-технического совета ОАО «Газпром» (г. Санкт-Петербург, 13-16 апреля 2009). – М.: ООО «Газпром экспо», 2009, с. 105-117.