

Электрические сети & системы

№ 5
2009



www.energo.net.ua

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Зденек Пистора, канд. техн. наук
zdenek.pistora@iol.cz

Статья посвящена применению итерационных методов моделирования для расчета надежности электрических сетей

1. Применение итерационных методов моделирования

Применение итерационных методов моделирования в области надежности электрических сетей предполагает расчет интенсивности отказов (аварийных + текущего ремонта) и их средней продолжительности. Под моделированием подразумеваются эксперименты с математическими моделями реальных систем на компьютерах.

Одним из видов подобных методов, используемых для моделирования в различных областях техники, и в частности, при расчете надежности, является метод Монте-Карло. Теоретическая основа метода и его практическое применение в электрических сетях описаны в настоящей статье

Преимущества методов математического моделирования заключаются в следующем:

- изучаемые системы не обязательно должны быть реально существующими;
- изучаемая система может быть достаточно сложной – в противном случае, как правило, используется аналитический подход;
- моделирование позволяет изучать поведение систем в реальном, ускоренном или замедленном времени. Вторая возможность самая важная, так как процессы выпадения элементов обладают замедленной скоростью по отношению к остальным процессам, и их изучение в реальном времени может оказаться неэффективным;
- моделированием можно проверить и уточнить результаты, полученные другим путем;
- с помощью моделирования можно расчитать ответвление линии;
- после каждой итерации возможно контролировать баланс мощностей и определять выпадение перегруженных элементов.

Недостатки методов математического моделирования:

- подготовка модели занимает продолжительное время, при этом рассматриваются несколько вариантов модели;
- при моделировании используются численные методы, а это означает, что результаты одной модели не всегда возможны перенести на другие условия;
- результаты моделирования – случайные величины. С повышением их точности значительно возрастает длительность расчетов;
- количество итераций зависит от требуемой точности результатов и объема изучаемой сети.

2. Основа метода Монте-Карло

Метод Монте-Карло является стохастическим методом, основанным на отношениях параметров изучаемого процесса и характеристиками вероятностных процессов. При использовании метода Монте-Карло получаются величины, описывающие изучаемую проблему с помощью искусственной реализации вероятностных процессов. Эти процессы должны быть заданы так, чтобы их статистические данные были искомыми величинами.

Для изучения энергетических систем наиболее подходящим является экспоненциальное распределение. Оно не обладает большой сложностью и позволяет комбинировать математические методы с аналитическими.

Каждый элемент системы характеризуется величиной λ , являющейся средним количеством отказов за год. Параметр λ^{-1} задает среднее время между двумя последовательными отказами. Вероятность, что интервал между двумя отказами будет Δt , равняется

$$P(\Delta t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t}. \quad (1)$$

Второй величиной, описывающей данный элемент системы, является среднее время, нужное для восстановления элемента после отказа (τ).

Одной из задач в процессе моделирования является генерирование случайных величин с требуемым распределением. Как уже было отмечено выше, наиболее употребимым бывает экспоненциальное распределение.

Для генерирования выгодно использовать метод обратной трансформации, основанный на соотношении

$$x = F^{-1}(r), \quad (2)$$

в котором $r \in <0,1$ – случайное число; F – функция распределения.

Для экспоненциального распределения получаем

$$r = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (3)$$

И окончательно формула для генерирования принимает вид

$$x = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(1-r). \quad (4)$$

Случайное число r – это случайная величина, которая удовлетворяет условию: $0 < r < 1$, и приобретает в этом интервале равномерное распределение с плотностью $p(x) = 1$.

Для генерирования случайных чисел существуют алгоритмы, которые являются стандартной частью программного обеспечения каждого компьютера. Следует отметить, что все они повторяются с определенным периодом.

Пример

Рассматриваем несложную систему, состоящую из трехфазного трансформатора и двух параллельных выводов, соединенных как «холодный резерв». На рис. 1 показана электрическая схема, а на рис. 2 – схема надежности.

С применением метода Монте-Карло мы можем установить вероятность беспрерывной работы в пункте подключения нагрузки. На практике расчет выполняется с помощью программы Spoleh, которая была создана автором статьи в период работы в Пражском университете на кафедре электроэнергетики и затем усовершенствована на родственной кафедре Технического университета в городе Острава (Чехия).

Исходные положения. В самом начале



Рис. 1. Электрическая схема системы

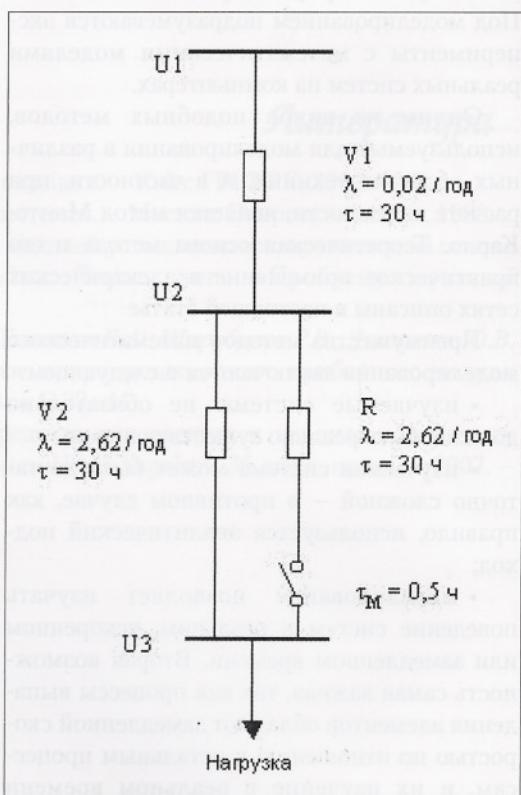


Рис. 2. Схема надежности

предполагаем, что все элементы сети в работоспособном состоянии. Для каждого элемента генерируется случайная величина, представляющая момент его выхода из строя. Возникает очередь ждущих событий. Из всех этих величин выбираем самую низ-

кую (момент первого сброса и изменения состояния сети), в топологии сети производится надлежащее изменение и определяется новая топология сети. Для сброшенного элемента генерируется новая случайная величина – введение в эксплуатацию, и включается в очередь ждущих событий. Системное время продвигается до момента события. Из очереди ждущих событий выбирается новое ближайшее событие, и весь процесс повторяется до тех пор, пока не выполнено нужное количество итераций. После этого проходят заключительные операции.

Оценка надежности линий – является одной из двух целей моделирования. Под линией понимается оборудование, обозначенное пользователем как единый комплекс – например, группа выключатель – трансформатор – выключатель или две параллельные линии электропередачи. Во время моделирования суммируется время работы комплекса, и в конце мы располагаем суммарным временем работы.

Оценка надежности узлов – является самым главным поводом проведения этих расчетов. Но вопрос расчета узлов намного сложнее, чем линий.

Чтобы определить, находится ли узел в нормальном состоянии или в нем нет напряжения, на каждом шаге моделирования необходимо оценить состояние сети в целом. В нашем случае, когда сеть воспроизводится в виде ориентированного графа, следует говорить о дополнительном исследовании этого графа на непрерывность.

Если нагрузка в узле равна P_i и сумма нагружаемости линий, входящих в этот узел, ΣP_{ij} , больше, чем эта нагрузка, то состояние сети стабильно, и узел нормально работает. В противном случае считаем узел отключенным.

Во время исследования необходимо учитывать и направление, в котором линия сможет перенести нагрузку. В сети бывают линии двухстороннего и одностороннего действия. Типичной линией одностороннего действия является распределительный трансформатор с автоматом, защищающим его от токов со стороны низкого напряжения в сторону высокого напряжения. Надо иметь в виду, что односторонность является только качеством линии в нашей модели, с физической способностью переносить нагрузку оно может не совпадать.

Результаты – расчеты, проведенные с помощью программы Spoleh, дали следую-

щие вероятности работы узла U3 – в зависимости от количества итераций N:

$$\begin{aligned} N = 100 & \quad R = 0,999827; \\ N = 1\,000 & \quad R = 0,999783; \\ N = 10\,000 & \quad R = 0,999793. \end{aligned}$$

При обсуждении полученных результатов надо иметь в виду, что они напрямую зависят от качества использованного генератора случайных чисел.

Опыт автора показывает, что результаты, полученные с применением метода Монте-Карло, хорошо корреспондируют с результатами, полученными другими (аналитическими) методами. Повышение требований по точности ведет в случае использования метода Монте-Карло к повышению количества необходимых итераций.

3. Основные черты метода Монте-Карло

Метод Монте-Карло имеет некоторые определяющие черты, которые значительно влияют на возможности его использования, а именно:

- можно более подробно, чем при использовании аналитических методов, описать данные объекта;
- можно моделировать сложную систему с многими подсистемами, обладающими различными типами распределения вероятности отказов;
- практически единственным ограничением для использования этого метода являются требования к компьютеру.

Метод Монте-Карло используется именно для структурного анализа качеств сложных систем, когда необходимо определить размещение резервов, стратегию развития или восстановления и т.д.

4. Сравнение метода Монте-Карло с аналитическим расчетом надежности

Метод Монте-Карло для данного сравнения представлен программой Spoleh.

Из сравнения обоих методов вытекает следующее:

- Результатом моделирования является среднее количество отказов в год и среднее время отказа. Из этих параметров можно рассчитать суммарную надежность в данном узле сети, что служит дальше для экономических расчетов и определения стратегии текущего ремонта и развития сети. Аналитические методы рассматривают эти параметры еще подробнее – с учетом отказа и текущего ремонта.



- Вытекающая надежность – иными словами, вероятность беспрерывной работы, – рассчитанная по обоим методам, практически не отличается.
- Моделирование по методу Монте-Карло позволяет учитывать плановые текущие ремонты.

4.1. Составление схемы надежности

Структура схемы для расчета надежности основана на электрической схеме, однако существуют некоторые различия.

Самым главным и определяющим отличием является отличие в понимании выражения «параллельная работа». В схеме надежности параллельная работа означает, что система работает, если работает хотя бы один ее элемент. А серийная схема отказывает, если откажет хотя бы один из ее элементов. Этот момент не должен совпадать с электрической схемой.

Вопрос можно иллюстрировать на двухцепной ЛЭП.

Между подстанциями „А“ и „В“ есть две параллельные ЛЭП, каждая с пропускной способностью 10 МВт.

а) С подстанции „А“ в подстанцию „В“ передается суммарная мощность 9 МВт. В таком случае схема с точки зрения надежности является параллельной, так как при отказе одной ЛЭП вторая сможет перенести всю нагрузку.

б) С подстанции „А“ в подстанцию „В“ передается суммарная мощность 15 МВт. В таком случае схема является серийной, так как при отказе одной ЛЭП вторая перегрузится и автоматы ее отключат. Здесь можно использовать преимущество метода Монте-Карло и учитывать возможность отключения части нагрузки и хода с ограничением передаваемой мощности. В программу итераций можно после каждого изменения состояния включить расчет постоянной работы данной сети.

При использовании метода Монте-Карло можно к схеме подойти с различных точек зрения. Основной вопрос заключается в подходе к оценке работы сети после происходящих изменений состояния сетевых элементов.

Самый простой подход – это сравнить способность переноса нагрузки через данный элемент (ЛЭП) с требованиями узлов, находящихся за ним. В таком случае учитываются только активные мощности. Если нужны более надежные результаты, то после каждого изменения состояния любого элемента можно комплексно рассчитать работу сети.

4.2. Типы ветвей в схеме

Классический аналитический метод расчета использует только один тип ветвей в схеме – или ЛЭП, или трансформатор с выключателями и т.д. Метод Монте-Карло использует два типа ветвей – добавляется еще «холодный резерв». Элемент, который находится в состоянии холодного резерва, включается в схему только при наличии заранее определенных состояний системы. Включение холодного резерва всегда осуществляется через некоторое время – срок манипуляции τ_M . Итерационный метод может учитывать такую схему без значительных затруднений – например, после отказа первого трансформатора автоматически через время τ_M включается второй трансформатор.

5. Практическое применение метода моделирования

Итерационные методы расчета надежности энергетических сетей были в Чешской Республике использованы неоднократно. Первый раз автором этой статьи для расчетов в рамках кандидатской диссертации – проводилась оценка возможных схем городских сетей высокого и сверхвысокого напряжений. Метод и соответствующая программа в измененном виде используются для анализа сетей 110 кВ и определения стратегии текущего ремонта.

С помощью программы Spoleh была рассчитана надежность хода магистральной системы 400 и 220 кВ CENTREL.

По мнению автора этой статьи, описанный выше метод можно применить не только для расчета энергетических сетей, а и для расчета надежности механических, электронных и др. схем.

Литература

1. Ing.Zdeněk Pistora – Kandidátská disertační práce, ČVUT-FEL 1990.
2. Prof.Ing.Stanislav Rusek, CSc. – Metody výpočtu spolehlivosti elektrických sítí, VŠB-TU Ostrava.