

УДК 519.248

Математический анализ вероятности возникновения веерных отключений электросетей

¹Кузнецов П.А., ¹Юдин А.В., ²Масло С.В., ¹Клюковкин В.Р.
¹Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А. Соловьева
Кафедра электротехники и промышленной энергетики
²Донецкий национальный технический университет
Кафедра прикладной математики
E-mail: kuznetsovpael@inbox.ru

Кузнецов П.А., Юдин А.В., Масло С.В., Клюковкин В.Р. Математический анализ вероятности возникновения веерных отключений электросетей. В статье рассматривается вопрос возникновения и прогнозирования таких явлений, как веерные отключения и каскадные аварии, происходящие в электрических сетях. Проведен анализ веерных отключений на двух магистралях. Для углубленного анализа законов их распространения была выбрана соответствующая модель, показана тенденция к увеличению их количества. Составлен алгоритм протекания стандартного веерного отключения, причиной которого является единичное иницирующее событие. Проведен анализ потерь мощности в двух магистралях за длительные временные рамки методом скользящего окна. Представлены зависимости и подчинение каскадной аварии степенным законам.

Ключевые слова: Веерное отключение, математическая модель, анализ аварий, Minitab, статистический анализ, авария в электросети, математическое прогнозирование.

Введение

Развитие современной промышленности и рост численности населения земли приводит к тому, что с каждым днём в мире потребляется все большее количество электроэнергии. Многие сети, которые используются на данный момент для снабжения потребителей различных категорий, уже не справляются с объемом нагрузки, который на них возлагается, и требуют ремонта и модернизации. Так по данным [1] износ основных производственных и технологических активов отечественных электросетей оценивается в два раза выше, чем за рубежом. В связи с этим, все чаще как мировые, так и отечественные электросети страдают от каскадных аварий (веерных отключений), которые приводят не только к браку и материальным убыткам, но, даже к человеческим жертвам. Разработка методов и устройств диагностирования, предсказания развития аварий и их нейтрализация становятся все более актуальными задачами [2]. Основными причинами аварий в электрических сетях могут быть природные катаклизмы, сильные порывы ветра, человеческие или технические факторы, трудовые конфликты, терроризм, военные действия и т.д [3, 4]. А очень многие аварии могут быть вызваны комбинацией электрических,

компьютерных и человеческих ошибок и развиваться далее в лавинообразное веерное отключение, которые имеют огромное влияние для потребителей [5].

Идея работы

Основной задачей данной работы является математический анализ веерных отключений, происходящих в электрических сетях, на основе собранной статистики по потерям мощности. Помимо этого, часть исследования посвящена поиску первоисточника каскадных аварий и возможным методам их устранения.

Анализ последних исследований данного вопроса

Технические условия, которые могут приводить к возникновению аварийных ситуаций - это перегрузки, превышения крайних пределов уровня напряжений или частоты, нестабильность системы, отключение подстанций или источников генерации [5]. В трудах по изучению свойств электрических систем структурная сложность и высокая взаимная зависимость между компонентами системы усложняют изучение их поведения. Взаимная зависимость – это главная причина уязвимости электрических сетей и

относится к риску возникновения огромного веерного отключения.

Уязвимость системы объясняется чувствительностью системы к угрозам и опасностям [5]. Очевидно, что из-за наличия внутренних взаимосвязей, локальные перегрузки линии или выход локальных компонентов из строя могут привести к каскадному нарушению функционирования текущих узлов всей системы, что в дальнейшем приведет к её отключению. Терминологически этот процесс называется веерным отключением. Веерные отключения могут быть вызваны неспособностью электрической системы к адаптации изменению нагрузки или вследствие чрезмерного потребления электрического тока потребителем в размере, превышающем емкость сети.

Многие исследователи руководствовались поведением электрических сетей и возникновением ошибок в них в процессе передачи энергии. Сети состоят из генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и электростанций [6]. Авария в этих системах означает, что, когда случается неисправность, по крайней мере, с одним из этих компонентов или внутри определенного элемента. Неисправность в компоненте системы может привести к серьезному веерному отключению, порождающему серьезный кризис в обществе. Однако, большинство крупнейших веерных отключений и лавинообразных аварий не были внезапными. Каскадные аварии – это главный механизм, согласно которому развиваются крупные веерные отключения. Таким образом, это – цепочка начальных явлений, которыми электрическая сеть вяло сигнализирует о реальном состоянии всех соседних звеньев [7, 8 - 10].

Каскадная неисправность определяется как последовательность зависимых неисправностей отдельных компонентов, которая постепенно ослабляет электрическую систему. Эта неисправность охватывает физические элементы системы, программное обеспечение, исполняющие функции, обслуживающий персонал и организации, которые разрабатывают, управляют и регулируют электрическую систему [11]. Каскадные отключения могут являться следствием состояния элементов системы, таких как вышедших из строя, или зависеть от характеристик передачи мощности, а также последствием ручных или автоматических команд [12]. Благодаря осложнениям полный перебор всех вариаций каскадных отключений не представляется возможным.

Исследования математической модели

Веерные отключения могут быть вызваны неспособностью электрической системы к

адаптации изменению нагрузки или вследствие чрезмерного потребления электрического тока потребителем в размере, превышающем емкость сети. В настоящее время существуют три основные концепции изучения веерного отключения в технической и научной литературе [8]. Первое учение описывает сеть и взаимодействие между её компонентами во времени, где взаимодействие выражает равенство и неравенство алгебраических систем с ограничениями в нелинейных дифференциальных уравнениях. Второе учение рассматривает поведение сети в устойчивом состоянии введением случайных флуктуаций при потреблении нагрузки, а третья концепция полагает, что электрическая сеть – это пример сложной системы, чье поведение глубоко зависит от её топологических свойств.

Модель сети на основе дифференциальных уравнений дает наиболее точное представление о физических процессах, происходящих в ней. Однако, решение, а зачастую даже и составление системы очень трудоемко, а, иногда даже и не представляется возможным. Третья модель не учитывает коммутационные процессы, постоянно влияющие на сеть. Поэтому для проведения расчетов была выбрана именно вторая теория.

Математический эксперимент

Т.к. каждая авария сопровождается потерями мощности, то для возможности анализа веерных отключений по имеющимся данным, было принято следующее упрощение. На основании второй теории о функционировании электрической сети она всегда находится в равновесном состоянии. Если в один момент времени мощность, отданная генератором (P_g) и полученная потребителем (P_n) равны, то аварии не происходит. Если же данные о генерации и потреблении мощности разнятся, то мы получаем потери (ΔP), которые представляют собой аварию.

Поскольку выбранная модель сети представляет исследуемый объект всегда находящимся в статическом состоянии и выходящим из равновесия только при коммутационных процессах, то это отразится и на описании модели аварии. Веерные отключения и каскадные аварии становятся все более частыми и разрушающими. Для подтверждения этой теории были отобраны данные [7] по двум магистралям – №1 (370 случаев) и №2 (230 случаев). Данные первой магистрали соответствуют периоду с 1990 по 2003 гг, а данные второй - с 1980 по 2005 гг. Анализ проводился в программе Minitab. На рис. 1 представлены результаты расчетов по данным потерь мощности. Ось абсцисс – это порядковый номер аварии. Они задокументированы и внесены в анализ в хронологической последовательности. По оси ординат расположены потери мощности,

которые случились в результате каскадной аварии. Для прогнозирования дальнейших вероятностей возникновения аварий были аппроксимированы линии тренда. Для данных из первой области кривая тренда соответствует степенному закону, описываемому формулой $8,2 + 0,175 \cdot x - 0,000169 \cdot x^2$. Из графика четко видно, что вероятность возникновения аварии в сети растет во времени по степенному закону и в будущем отключения будут происходить все чаще.

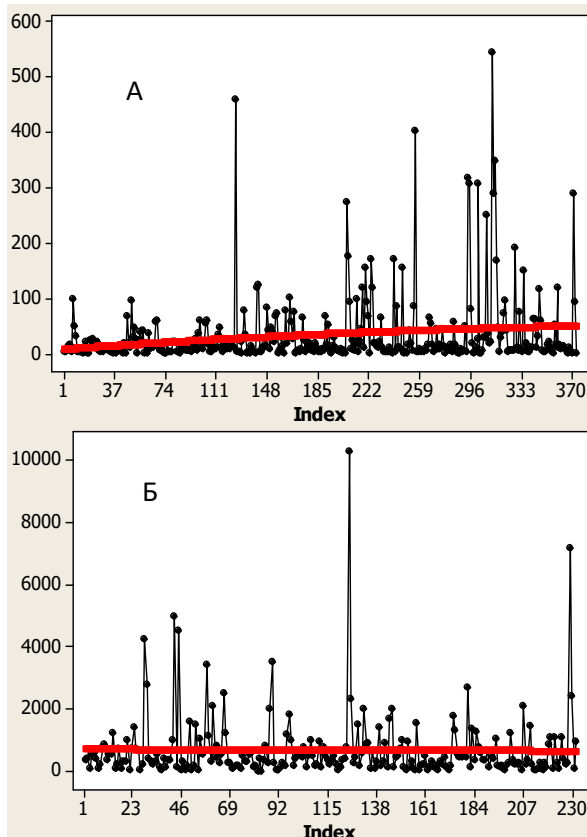


Рисунок 1 – Анализ тенденции протекания веерных отключений: а) для данных по магистрали №1; б) для данных по магистрали №2

Анализ линии № 2 показывает несколько иную картину. Линия тренда также подчиняется степенному закону, описываемому формулой $701 - 0,34 \cdot x + 0,0004 \cdot x^2$. Примечательно, что согласно данной кривой вероятность аварий будет снижаться. Это противоречие объясняется тем, что после масштабных аварий 1997-2001 годов, были приняты меры по модернизации сети и реконструкции ее мощностей.

Алгоритм протекания веерного отключения

Не смотря на значимость этого события и разрушающие последствия его протекания, исследованию каскадных аварий и веерных

отключений не уделяется много внимания. До недавнего времени вообще считалось, что основной причиной масштабных поломок электросетей являются только природные бедствия. Оказывается, что это не так. Многие исследователи ссылаются на то, что практически все масштабные аварии, которые происходили в последние десятилетия, начинались с какой-либо незначительной причины – так называемого иницирующего события. Оно сопоставимо с первым камнем, который тянет за собой лавину.

Анализ [5-7] показывает, что большинство веерных отключений, как локального, так и национального характера были следствием какой-либо единичной поломки. К примеру, веерное отключение 2003 года между США и Канадой, которое вывело из строя практически 11% нагрузки североамериканской сети и оставило без электричества более 50 млн человек, было вызвано изначально небольшой рассинхронизацией генераторов модуля 5 электростанции Eastlake. Она была вызвана наличием большого количества реактивной мощности в сети. Персонал не отреагировал вовремя и должным образом на показания системы автоматики, что и привело к каскадному отключению электроснабжения [8].

Исходя из этого, модель веерного отключения можно представить в виде алгоритма, изображенного на рис. 2. Как видно из диаграммы, в любом веерном отключении есть точка невозврата, после которого сеть будет неконтролируемо затухать, а есть и место для своевременной реакции и восстановления системы в номинальное состояние.

Очень часто эти первые сигналы не замечаются обслуживающим персоналом и даже игнорируются автоматикой. Однако, не каждое такое иницирующее событие может стать причиной веерного отключения. Возможно, что оно произойдет на локальном уровне и не вызовет цепную реакцию. Предсказание влияния таких аварий на целостность сети является важной задачей.

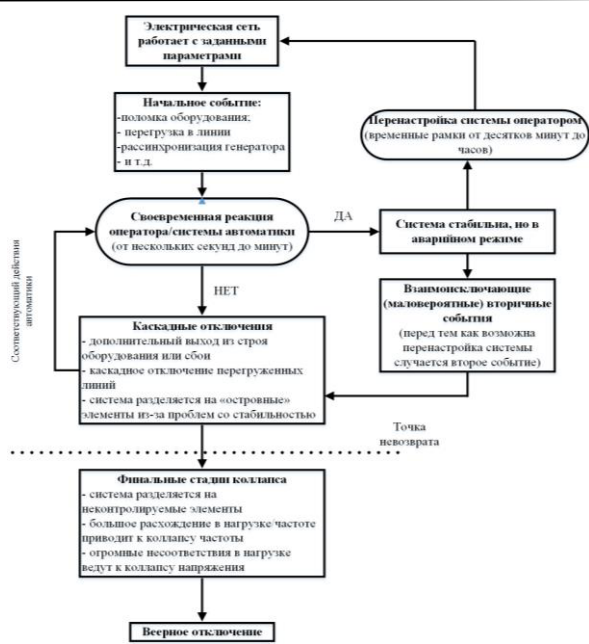


Рисунок 2 – Алгоритм протекания веерного отключения

Если течение каскадных аварий подчиняется степенным законам, то это должно подтверждаться реальными данными. Проверим это, проанализировав данные методом скользящего окна (МСО). Каждый набор данных был рассмотрен как группа временных отрезков X_t и детальное теоретическое статистическое отклонение было получено из [7].

$$X = \{X_t \quad t = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (1)$$

Броуновское движение может быть получено из (1):

$$Y = \{Y_t \quad t = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

Где Y_t – это первообразная интеграла по времени X_t и записана в виде

$$Y_t = \sum_{i=1}^t X_i \quad (3)$$

Новый ряд $Y^{(m)}$ потом получается для ряда Y и $m=1, 2, 3, \dots, n$.

Отсюда

$$Y^{(m)} = \{Y_u^m, u = 1, 2, 3, \dots, n/m\} \quad (4)$$

Элементы этого ряда – это блоки, содержащие m элементов начального ряда Y . Это значит, что

$$Y_u^{(m)} = \{Y_{mu-m+1}, \dots, Y_{um}\} \quad (5)$$

Стандартное отклонение $\sigma_u^{(m)}$ в пределах каждого n/m блока и содержащее m элементов определяется как

$$\sigma_m^{(u)} = \sqrt{\sum_{m=1}^n \sum_{u=1}^{n/m} \frac{(Y_{mu-m+1} \dots Y_{um}) - \mu_m^{(u)}}{m}} \quad (6)$$

Где $\mu_m^{(u)}$ – это значение Броуновского движения для ряда из n/m блоков и m элементов. После всего этого среднее значение стандартного отклонения n/m блоков рассчитывается по формуле

$$\sigma_m = \frac{\sum_{u=1}^{n/m} \sigma_m^{(u)}}{n/m} \quad (7)$$

Таким образом, временной ряд X с определенной функцией автокорреляции может быть представлен как функция σ_m , имеющая фазу и шкалу степенного закона. Это - $\sigma_m \propto m^H$, где H – это экспонента Хёрста, определенная ранее. Или

$$\log(\sigma_m) = H \log(m) \quad (8)$$

Согласно [7], для $0,5 < H < 1$, ряд X_t имеет длительную временную зависимость. А для $0 < H < 0,5$ ряд имеет длительную временную антикорреляцию. Если же $H=1,0$, то ряд X_t детерминистский или выход результата предсказуем в то время как он некоррелирован, если $H=0,5$. Точный график расчета этой таблицы показан на рис. 3, 4 используя метод скользящего окна. Для второго случая результат показывает, что $H \approx 1,0$, что резко отражает наличие сильной корреляции или предсказуемой зависимости между последовательными веерными отключениями. Для первой сети точно так же прослеживается наличие длительной временной корреляции.

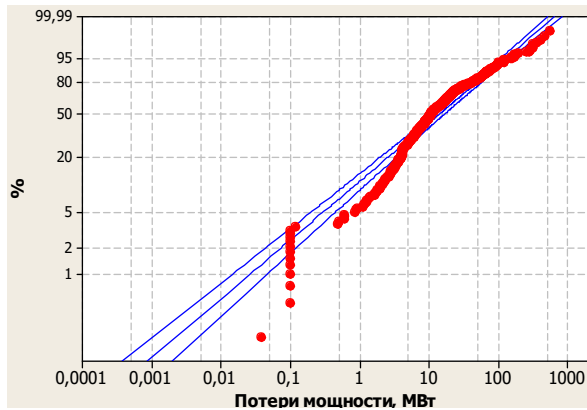


Рисунок 3 - Анализ веерных отключений первой магистрали МСО

На рис. 4 показан точечный график анализа потерь мощности во второй магистрали методом скользящего окна. Кривая представляет собой стандартное отклонение от временной зависимости для последовательных временных рядов веерных отключений. Было обнаружено, что стандартное отклонение может быть нормировано как степенной закон $\sigma_m \propto m^{0,93}$, где m представляет временное запаздывание последовательных временных рядов веерных отключений. Число = 0,93 – это приблизительное значение H . И, т.к. H меньше единицы, но более половины, то это значит, что существует длительная временная корреляция или зависимость между временными рядами веерных отключений.

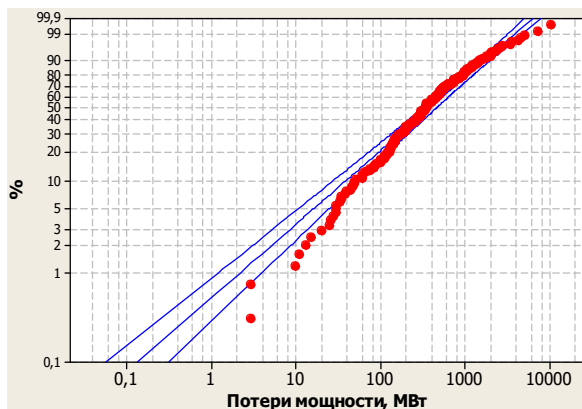


Рисунок 4 Анализ веерных отключений второй магистрали МСО

Точечный график на рис. 4 отражает анализ потерь мощности для второй сети МСО. Похоже, как и для первого случая, вторая система так же доказывает степенной закон по формуле $\sigma_m \propto m^{1,00}$ и масштабирующая экспонента 1,00 – это аппроксимированная величина для H . Однако, в отличие от первого случая, здесь $H \approx 1,0$, что отражает детерминистскую природу временного

ряда веерного отключения или причину предшествующего события во временном ряде веерного отключения, делая его совершенно неизбежным.

Выводы

После анализа собранной статистики веерных отключений можно сделать следующие заключения.

1. Учитывая текущие состояния магистральных сетей и растущую на них нагрузку, количество веерных отключений будет только увеличиваться. Для их предотвращения необходимы защитные меры: введение прогнозирующей автоматики. Увеличение пропускной способности, эффективный менеджмент.

2. Большинство каскадных аварий происходят вследствие начального единичного инициирующего события, которое часто остается незамеченным и не анализируется. 85% крупных аварий могли бы быть предотвращены своевременной реакцией персонала на подобные единичные события.

3. Статистика каскадных аварий была обработана методом скользящего окна. Обе сети показали степенную зависимость.

Литература

1. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
2. Department of Energy USA. <http://www.energy.gov/statistics>.
3. World Energy Outlook 2015. International Energy Agency (IEA), Paris. — 2015. — 15 pp.
4. British Petroleum Energy Outlook 2016 Edition. British Petroleum, London – 2016. – 80pp.
5. Pouyan Pourbeik, Prabha Kundur. The anatomy of a power grid blackout – Root causes and dynamics of recent major blackouts. – Article in IEEE Magazine, Piscataway, New Jersey – 2016.
6. J. Blumschein, Y. Yelgin, M. Kereit. Blackout Prevention by Power Swing Detection and Out-of-Step Protection. – Journal of Power and Energy Engineering (JPPE), Irvine CA – 2014.
7. Friew Gebremedhin Abraha Statistics of Electric Power Blackouts: Data Analysis and Data Modelling. – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim – 2013, 71 с.
8. North American Electric Reliability Council Technical Analysis of the August 14, 2003, Blackout: What Happened, Why, and What Did We Learn? – Report to the NERC Board of Trustees by the NERC Steering Group, New Jersey - 2004.
9. A. Farina, A. Graziano, F. Mariani, and F. Zirilli. Probabilistic analysis of failures in power transmission networks and phase transitions: Study case of a high-voltage power transmission network.

Journal of Optimization Theory and Applications, 139(1), 2008.

10. M. Vaiman, K. Bell, Y. Chen, B. Chowdhury, I. Dobson, P. Hines, M. Papic, S. Miller, and P. Zhang. Risk assessment of cascading outages: Methodologies and challenges. Power Systems, IEEE Transactions on, 27(2), 2012.

11. David L. Pepyne. Topology and cascading line outages in power grids. Journal of Science and Systems Engineering, 16(2), 2007.

12. Bei Gou, WeibiaoWu. Is the prediction of power system blackouts possible? In Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE,

2008.

13. Кузнецов П.А., Соленый С.В. Борьба с веерными отключениями в системах электроснабжения. – Завалишинские чтения: молодежная секция. Сб. докл. / СпБ.: ГУАП., 2016, 210 с.

14. Кузнецов П.А., Степанов О.А., Юдин А.В. Структура автоматической системы компенсации реактивной мощности промышленных предприятий. – Проблемы недропользования: сборник трудов международного форума-конкурса молодых ученых. Часть II/ Санкт-Петербургский горный университет. СпБ, 2016. 247 с.

Кузнецов П.А., Юдин А.В., Масло С.В., Клюковкин В.Р. Математический анализ вероятности возникновения веерных отключений электросетей. В статье рассматривается вопрос возникновения и прогнозирования таких явлений, как веерные отключения и каскадные аварии, происходящие в электрических сетях. Проведен анализ веерных отключений на двух магистралях. Для углубленного анализа законов их распространения была выбрана соответствующая модель, показана тенденция к увеличению их количества. Составлен алгоритм протекания стандартного веерного отключения, причиной которого является единичное иницирующее событие. Проведен анализ потерь мощности в двух магистралях за длительные временные рамки методом скользящего окна. Представлены зависимости и подчинение каскадной аварии степенным законам.

Ключевые слова: Веерное отключение, математическая модель, анализ аварий, Minitab, статистический анализ, авария в электросети.

P. Kuznetsov, A. Judin, S. Maslo, V. Kliukovkin. Mathematical analysis of appearance probability of blackouts. This article describes the problem of blackouts or cascade malfunctions which appears in electrical networks. There were analyzed blackout's data on the two power lines according to the collected information and there was chosen a model for the next profound analysis of their expansion laws. There is shown a tendency for their amount increase. There was developed an algorithm for standard blackout duration which reason can be a single initiating event. There was also held an analysis of power losses in two power grids for the long term time interval using scaled window variance method. There are shown dependencies which reveal the obedience of blackout's behavior according to the power law.

Keywords: blackout, mathematical model, outage analysis, Minitab, statistical analysis, emergency mode in power grid.

Статья поступила в редакцию 20.11.2016
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук В.Н. Павлышом