

УДК 621.311

Дюкин И.Р., аспирант
ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ

Dyukin I.R., postgraduate student
Vyatka State Agrotechnological University

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОИСКА МЕСТА ОЗЗ В СЕТИХ 6-35 кВ

APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS TO LOCATE THE SINGLE-PHASE GROUND FAULTS IN 6-35 kV NETWORKS

Введение. Однофазное замыкание на землю является одной из наиболее распространённых аварийных ситуаций в электрических сетях среднего напряжения. В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью токи замыкания имеют малую величину, что затрудняет их обнаружение методами, основанными только на измерении токов. Спектральный анализ основан на выявлении гармонических и высокочастотных составляющих, возникающих в месте повреждения, и позволяет определить направление и приблизительное расстояние до точки замыкания. Преимущество метода заключается в том, что частотные признаки повреждения существуют даже при слабых токах и могут быть выявлены с высокой точностью с помощью современных цифровых измерительных комплексов.

В статье рассматривается применение спектрального анализа электрических сигналов для локализации однофазных замыканий на землю в электрических сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. Особое внимание уделено математическому аппарату, в частности алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ), позволяющему эффективно выделять частотные признаки аварийного режима. Приводятся основные формулы преобразования сигналов из временной области в частотную, обсуждаются особенности выбора параметров дискретизации и предварительной обработки сигналов, а также анализируются условия, при которых метод может давать наибольшую точность.

Спектральный анализ — это метод исследования сигналов, при котором временной ряд представляется как сумма синусоидальных колебаний с различными частотами, амплитудами и фазами. Основной целью спектрального анализа является выделение частотных составляющих сигнала, каковы их относительная амплитуда и изменение во времени. Применение этого подхода важно в тех случаях, когда визуальный анализ сигнала во временной области не даёт полной информации о его внутренней

структуре.

Математической основой спектрального анализа служит преобразование Фурье. Оно позволяет перейти из временной области в частотную, где сигнал представлен в виде набора гармонических функций. Если сигнал непрерывен, то используется интегральное преобразование Фурье. Однако в реальных условиях, особенно при работе с цифровыми данными, применяют дискретное преобразование Фурье (ДПФ), которое разбивает сигнал на конечное число частотных компонентов. Основной алгоритм, который позволяет эффективно вычислить ДПФ, — это быстрое преобразование Фурье (БПФ), сокращающее вычислительную сложность с квадратичной до логарифмической. Благодаря этому анализ даже длинных временных рядов стал практичен. Результатом спектрального анализа является спектр — график, где по оси частот откладываются частоты, а по вертикали — амплитуда или мощность каждой частоты. В простейшем случае анализ производится на всем сигнале, предполагая, что он стационарен, то есть его частотный состав не изменяется во времени. Спектральный анализ с использованием быстрого преобразования Фурье для поиска места однофазного замыкания на землю

Математические основы спектрального анализа. Непрерывное преобразование Фурье для функции времени $x(t)$ определяется как:

$$X(f) = \int x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt,$$

где $X(f)$ — комплексная функция частоты, содержащая как амплитуду, так и фазу каждой гармонической составляющей. В цифровых системах, где сигнал представляется в виде дискретной последовательности отсчётов $x[n]$, используется дискретное преобразование Фурье:

$$X[k] = \sum x[n] \cdot e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, k = 0, 1, \dots, N-1.$$

В этом случае частота спектрального бина определяется как $f_k = k \cdot f_s$, где f_s — частота дискретизации, а N — число отсчётов за анализируемый интервал.

Быстрое преобразование Фурье. Прямое вычисление дискретного преобразования Фурье требует порядка N^2 операций, что делает его медленным при большом объёме данных. Быстрое преобразование Фурье — это оптимизированный алгоритм, снижающий вычислительную сложность до $N \log N$. Наиболее распространённый алгоритм Кули–Тьюки использует разложение входной последовательности на чётные и нечётные индексы, после чего вычисления выполняются рекурсивно с использованием вращающих множителей $W = e^{-j2\pi \frac{k}{N}}$. В задачах поиска места замыкания БПФ позволяет быстро обработать массивы данных с высокой частотой дискретизации и выделить интересующие гармоники и высокочастотные колебания.

Особенности применения в задачах поиска ОЗЗ. При использовании БПФ для анализа сигналов необходимо правильно выбрать частоту

дискретизации, которая должна быть не менее чем в два раза выше максимальной частоты анализа, что соответствует теореме Найквиста. Для уменьшения спектральных утечек перед выполнением преобразования применяется оконная функция, например Хэннинга или Блэкмана. Разрешение по частоте определяется как $\Delta f = f_s / N$, поэтому для анализа низкочастотных гармоник необходимо использовать достаточно большой объём данных. Амплитуды спектра корректируются с учётом выбранного окна и нормируются на длину выборки. Важную роль играет фазовый анализ, так как сравнение фаз гармонических составляющих, измеренных в разных точках сети, позволяет определять направление на повреждение и оценивать расстояние до него.

Практическая реализация. Сигнал, например напряжение нулевой последовательности, записывается в течение заданного временного интервала. Далее выполняется его предварительная обработка, включающая фильтрацию помех и применение оконной функции. После этого вычисляется БПФ и строится амплитудно-фазовый спектр. В спектре выделяются признаки, характерные для замыкания, такие как повышение уровня третьей гармоники, появление узкополосных пиков или высокочастотных импульсов. Сравнение полученных спектров с разных точек сети позволяет построить картину распространения сигнала и определить местоположение повреждения. Спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье является мощным инструментом для диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами повреждения. Он позволяет выделять слабые частотные признаки аварий, которые невозможно обнаружить методами прямого измерения тока. Эффективность метода определяется корректным выбором параметров дискретизации, типа оконной функции и алгоритма обработки. В перспективе сочетание БПФ с временно-частотными методами, такими как вейвлет-анализ и короткое преобразование Фурье, позволит повысить точность и достоверность локализации повреждений.

Заключение. Разработанный способ [8] реализован в виде переносного прибора для поиска ОЗЗ, успешно прошедшего опытную эксплуатацию в сетях «Кировэнерго» – филиал ПАО «Россети Центр и Приволжье», что позволит значительно сократить время нахождения ОЗЗ в сетях 6–35 кВ. Это, в свою очередь, позволит повысить безопасность эксплуатации ВЛ, снизит риск поражения людей и животных электрическим током, а также уменьшит вероятность возникновения ландшафтных пожаров. Внедрение данного способа в практику эксплуатации электрических сетей позволит повысить надежность и эффективность работы энергосистем.

Список литературы

1. Красных А.А., Козлов А.Л. Анализ повреждаемости ВЛ 6-35 кВ и устройства для нахождения замыкания на землю // Электробезопасность. – 2004. №3, с. 15-20

2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – СПб: Изд-во ДЕАН, 2003. – 336 с.
3. Пенович Е.И. Отыскание мест замыкания на землю в распределительных сетях 6-10 кВ. – М.:Энергия, 1975. – 120 с.: ил.
4. РД 34.20.564 Типовое положение по организации эксплуатации устройств для определения мест повреждений ВЛ напряжением 6 - 20 кВ
5. ПОТ РМ-016-2001 (РД 153-34.0-03.150-00) Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок
6. Дюкин, И. Р. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК / И. Р. Дюкин // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», Киров, 05 февраля 2024 года. – Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2024. – С. 15-18. – EDN BPPHQТ.
7. Дюкин, И. Р. Состояние распределительных сетей в АПК / И. Р. Дюкин // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», Киров, 05 февраля 2024 года. – Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2024. – С. 19-21. – EDN AEPYMV.
8. Анализ повреждений в разветвленных распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ / А. И. Сидоров, И. Р. Дюкин, А. В. Братухин [и др.] // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Челябинск, 02–03 октября 2024 года. – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2024. – С. 92-98. – EDN NWWLCB.
9. Сидоров, А. И. Анализ причин возникновения аварийных режимов в сетях напряжением 6-35 КВ / А. И. Сидоров, И. Р. Дюкин // Вестник Вятского ГАТУ. – 2024. – № 4(22). – С. 69-73. – EDN TQUYVT.
10. Дюкин, И. Р. Особенности сельских электрических сетей / И. Р. Дюкин, А. В. Братухин, А. И. Сидоров // Вестник Вятского ГАТУ. – 2023. – № 4(18). – С. 15-23. – EDN BVFWBQ.
11. 1. Заявка на изобретение 2024140237 Российской Федерации, МПК G01R 31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю в разветвленной воздушной ЛЭП с изолированной нейтралью: № 2024140237: заявл. 28.12.2024: опубл. 05.08.2025 / А.В. Братухин, И.Р. Дюкин, А.Л. Козлов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Вятский государственный университет" (ФГБОУ ВО "ВятГУ").

References

1. Krasnykh A.A., Kozlov A.L. Analysis of damage to 6-35 kV overhead lines and devices for finding a ground fault // Electrical safety. - 2004. No. 3, pp. 15-20
2. Rules of technical operation of electric power plants and networks of the Russian Federation. – St. Petersburg: Publishing house of DEAN, 2003. – 336 p.
3. Penovich E.I. Finding ground fault locations in distribution networks of 6-10 kV. – M.:Energiya, 1975. – 120 p.: ill.
4. RD 34.20.564 Standard regulation on the organization of the operation of devices for determining damage to overhead lines with a voltage of 6-20 kV
5. POT RM-016-2001 (RD 153-34.0-03.150-00) Intersectoral rules on labor protection (safety rules) during the operation of electrical installations
6. Dyukin, I. R. Analysis of the quality of electricity in agricultural distribution networks / I. R. Dyukin // Improvement of operational indicators of agricultural energy: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference "Science – Technology –Resource Conservation", Kirov, February 05, 2024. – Kirov: Vyatka State Agrotechnological University, 2024. – pp. 15-18. – EDN BPPHQT.
7. Dyukin, I. R. The state of distribution networks in the agro-industrial complex / I. R. Dyukin // Improving the operational performance of agricultural energy: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference "Science – Technology – Resource Conservation", Kirov, February 05, 2024. Kirov: Vyatka State Agro-Technological University, 2024. pp. 19-21. EDN AEPYMV.
8. Damage analysis in branched distribution electrical networks with a voltage of 6-35 kV / A. I. Sidorov, I. R. Dukin, A.V. Bratukhin [et al.] // Safety of life in the third millennium : proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Chelyabinsk, October 02-03, 2024. Chelyabinsk: South Ural State University, 2024. pp. 92-98. EDN NWWLCB.
9. Sidorov, A. I. Analysis of the causes of emergency modes in networks with a voltage of 6-35 KV / A. I. Sidorov, I. R. Dyukin // Bulletin of Vyatka State Technical University. – 2024. – № 4(22). – Pp. 69-73. – EDN TQUYVT.
10. Dyukin, I. R. Features of rural electric networks / I. R. Dyukin, A.V. Bratukhin, A. I. Sidorov // Bulletin of Vyatka State Pedagogical University. – 2023. – № 4(18). – Pp. 15-23. – EDN BVFWBQ.
11. 1. Application for Invention 2024140237 Russian Federation, IPC G01R 31/08. A method for determining the location of a single-phase ground fault in a branched overhead transmission line with an isolated neutral conductor: No. 2024140237: application no. 12/28/2024: published 08/05/2025 / A.V. Bratukhin, I.R. Dyukin, A.L. Kozlov [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University (Vyatka State University).