

ТЕХНОЛОГИИ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

ПОИСК ИСТОЧНИКОВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Родионов А.В., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: a.rodionov@ens.ru.

Бутин К.П., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: k.butin@ens.ru.

Данилов М.А., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: m.danilov@ens.ru.

Попов А.И., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: a.porov@ens.ru.

***Аннотация:** В докладе рассматривается опыт применения energy-based методов для определения источника низкочастотных колебаний на примере исследования ряда реальных случаев колебаний в энергосистеме России. Описывается оригинальный подход к организации вычислений, позволяющий варьировать алгоритмы и их параметры на этапах обработки данных, не меняя общую схему метода. Приводится описание программной реализации данного подхода, рассматриваются практические вопросы повышения производительности вычислений.*

***Ключевые слова:** синхронизированные векторные измерения, низкочастотные колебания, энергия колебаний, анализ данных.*

Введение

Широкое внедрение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) предоставляет большой объем данных для решения ряда масштабных задач анализа функционирования энергосистем. Одним из современных приложений компьютерной обработки данных СВИ является анализ колебательной устойчивости энергосистем [1].

Системными операторами в настоящее время востребовано эффективное решение задачи выявления источника вынужденных низкочастотных колебаний (НЧК) [2], неконтролируемое развитие которых в целом снижает эффективность функционирования энергосистемы, а иногда приводит к опасным последствиям [3].

Цель данной работы – исследование методов выявления источника вынужденных НЧК на ряде реальных случаев в энергосистеме России, а также развитие соответствующих вычислительно-программных средств.

Материалы и методы

В период с 2019 по 2021 год Системный оператор Единой энергетической системы (СО ЕЭС) предоставил данные по 9 реальным случаям низкочастотных колебаний, произошедших на различных участках энергосистемы России. Анализ производился по измерениям с устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), установленных на линиях высокого и сверхвысокого классов напряжения. По предоставленным данным было выявлено, что в рассматриваемых событиях в колебания были вовлечены от десяти до ста линий. Во всех случаях моды лежали в частоте от 0.1 до 0.7 Гц. Максимальная амплитуда мощности моды от 12 до 55 МВт. Продолжительность колебаний от 30 секунд до 10 минут.

К наиболее развитым методам выявления источника НЧК относятся методы, основанные на оценке энергии колебаний [4, 5, 6, 7]. В данной работе использован метод диссипации энергии (DEF, dissipation energy flow) [6]. Исходными данными для метода DEF для является активная и реактивная мощности, а также вектор напряжения.

Результаты

Во всех случаях метод DEF показал достоверный результат, совпадающий с результатами других методов, а также с выводами специалистов СО ЕЭС.

Рассмотрим подробно случай, произошедший в 2020 году в энергосистеме России. По предоставленному архиву измерений

были исследованы данные активной и реактивной мощности и векторы напряжения с 47 линий. Произведен расчет амплитудного спектра мощности (см. рисунок 1.а). Прерывистыми линиями показан спектр мощности по каждому источнику данных. Жирной линией – среднее значение по всем источникам. Обнаружена мода в районе 0.25 Гц. На рисунке 1.б показан расчет поиска источника методом диссипации энергии. На верхнем графике показаны моды активной мощности. Максимальная амплитуда колебаний порядка 40 МВт. На среднем графике – значения диссипации энергии на небольших участках, охватывающих более 5 периодов колебаний. На нижнем – угол наклона касательной к интегралу DEF.

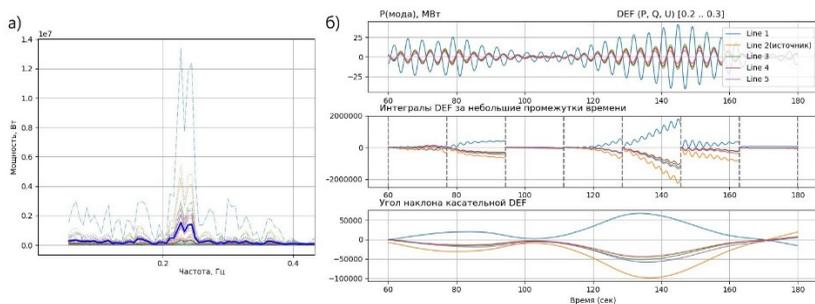


Рис. 1. Реальный случай НЧК

Источнику соответствует сигнал, для которого угол наклона касательной максимален. Используется значение по модулю, так как режим работы сети и направление транзита энергии в точках подключения УСВИ за исследуемый период неизвестны.

Данный случай интересен тем, что источником колебаний не является линия с максимальным значением амплитуды колебаний активной мощности. Еще можно предположить, что источник мог находиться за пределами наблюдаемой части сети, так как географически линия-источник находится на границе двух стран. Исследование подтверждено методом оценки формы моды, а также выводами специалистов СО ЕЭС.

Реализация алгоритма вычислений методом диссипации энергии предполагает вариативность подхода, например, применение различных фильтров, а также порядка применения

отдельных процедур. Будем называть планом обобщенную схему вычислений. В узлах данной схемы будут находиться работы – вычислительные процедуры. Используя функциональную парадигму, обозначим план потоков работ как ориентированный граф, где вершинами являются работы, содержащие в себе вычислительный процесс, а ребрами – каналы передачи данных между ними. Для создания подобных планов был разработан фреймворк на языке Go. Средства языка позволяют удобным образом организовать как параллельное выполнение потоков работ, так и их синхронизацию. Такой подход позволяет распараллеливать большое количество вычислений без высоких накладных расходов, эффективно использовать ядра, а также масштабировать задачу. Производительность операций особенно важна для вычислений в реальном времени.

Заключение

В докладе представлен опыт применения метода диссипации энергии для анализа нескольких реальных случаев низкочастотных колебаний в энергосистеме России. Подтверждается высокая способность метода к выявлению источника колебаний или его направления. При этом собственно применение метода рассматривается в качестве одного из многих этапов обработки измерительных сигналов и в контексте обобщенной схемы вычислений. С позиций распараллеливания расчетов рассматриваются некоторые особенности разрабатываемой авторами программно-вычислительной платформы для онлайн обработки данных синхронизированных векторных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Kundur P. et al.* Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions //IEEE transactions on Power Systems. – 2004. – V. 19. – №. 3. – P. 1387-1401.
2. *Wang B., Sun K.* Location methods of oscillation sources in power systems: a survey //Journal of modern power systems and clean energy. – 2017. – V. 5. – №. 2. – P. 151-159.
3. *Maslennikov S., Litvinov E.* Online oscillations management at

ISO New England //Power System Grid Operation Using Synchrophasor Technology. – Springer, Cham, 2019. – P. 257-283.

4. *Hu W. et al.* Disturbance source location of forced power oscillation in regional power grid //2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. – IEEE, 2011. – V. 2. – P. 363-366.

5. *L. Chen, Y. Min, W. Hu,* "An energy-based method for location of power system oscillation source," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 828-836, May 2013.

6. *Maslennikov S., Wang B., Litvinov E.* Dissipating energy flow method for locating the source of sustained oscillations //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – V. 88. – P. 55-62.

7. *Guo S. et al.* An Alternative Way to Locate Disturbance Source for Low Frequency Oscillation Considering Control Devices of Generator //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – V. 740. – №. 1. – P. 012099.

Авторы:

Родионов Андрей Вячеславович, начальник отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Окончил математический факультет САФУ (ПГУ). e-mail: a.rodionov@ens.ru.

Бутин Кирилл Павлович, инженер программист отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис», кафедра математики и информатики Северного (Арктического) федерального университета, аспирант. E-mail: k.butin@ens.ru

Данилов Максим Алексеевич, инженер программист отдела разработки программного обеспечения ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Магистрант Северного (Арктического) федерального университета. E-mail: m.danilov@ens.ru.

Попов Александр Игоревич, инженер программист отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис», доцент кафедры прикладной информатики и информационной безопасности Северного (Арктического) федерального университета, к.т.н. E-mail: a.popov@ens.ru.