Новые средства проверки устройств волновой релейной защиты

Фёдор Иванов, заместитель технического директора ЗАО «ЭнЛАБ»;
Jennifer (Xinru) Liu, директор по международным продажам PONOVO Power Co. LTD;
Hao Ruihua, инженер отдал международных продаж PONOVO Power Co. LTD

При возникновении короткого замыкания (КЗ) на линиях электропередач (ЛЭП) от места повреждения распространяется волна, которая имеет сложную форму, зависящую от целого комплекса условий. Эта волна имеет импульсный характер с шириной спектра до сотен килогерц, а нарастание ее фронтов происходит менее чем за 3 мкс. Вследствие своей высокочастотной природы, ее распространение вдоль ЛЭП происходит быстрее, чем рост тока основной частоты сети, и может использоваться для релейной защиты

Идея использования такого волнового сигнала в устройствах релейной защиты уже давно привлекает энергетиков, так как позволяет на порядок увеличить быстродействие реле, а значит минимизировать последствия аварий вследствие сокращения времени протекания токов КЗ. Кроме этого, устройства защиты на волновых принципах (УЗВП) позволяют увеличить точность определения места повреждения (ОМП) до уровня конкретного пролета между опорами, что является определяющим фактором при ликвидациях последствий аварий [1]. Указанные преимущества и доступность применения высокопроизводительных вычислительных средств в релейной защите способствуют развитию и внедрению УЗВП в электроэнергетике. Все больше производителей РЗА по всему миру ведут исследования и разработку УЗВП и устройств для ОМП. Так, например, компания Schweitzer Engineering Laboratories приступила к выпуску терминала дифференциальной защиты линий SEL-T400L, в котором используется технологии волновой защиты. При испытаниях этого многофункционального терминала время срабатывания измерительного органа волновой защиты при однофазном КЗ в середине ЛЭП составило 0,6 мс, а определитель места положения КЗ указал его с точностью 33 м на линии длиной 53 км. [2]

Чтобы воспользоваться преимуществами волновых принципов, устройства защиты должны применять новые алгоритмы работы, выполнять обработку высокочастотных сигналов и учитывать конфигурацию и состояние ЛЭП. Разработка этих алгоритмов из-за новизны технологии и ее принципиального отличия от традиционной релейной защиты, вызывает много сложностей, включая невозможность использования привычного испытательного оборудования и методик. Выходом из такой ситуации является использование программных средств моделирования высокочастотных процессов в энергосистемах и применение испытательного оборудования с более широким диапазоном частот. В этой статье предложены одни из наиболее подходящих программных и аппаратных инструментариев для работы с УЗВП.

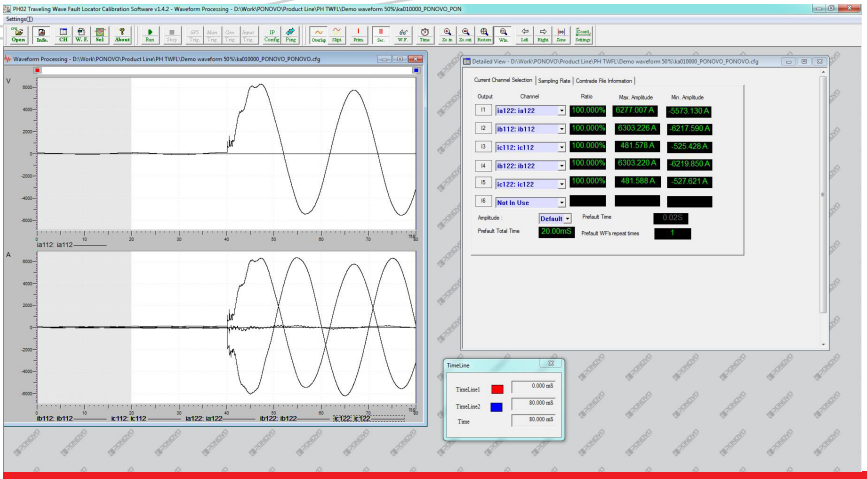
Для симуляции высокочастотных сигналов волновых процессов при КЗ необходимо рассчитывать сложные комбинации сигналов в ЛЭП, состоящие из первичного импульса при КЗ и его отражений от терминальных устройств сети и в местах перехода с воздушной на кабельную линию. Эти отраженные сигналы, как своеобразное эхо, накладываются с задержкой и затуханием, определяемыми длиной пройденного пути вдоль ЛЭП. Поэтому симулятор для волновых процессов должен обеспечивать:

• шаг расчета на уровне 1 мкс и менее;
• моделирование фазочастотных волновых процессов в ЛЭП вплоть до частоты 1 МГц;
• построение подробной модели энергосистемы с учетом длины ЛЭП и ее волновой проводимости, отпаек, а также схемы подключенного электрооборудования;
• построение схем прохождения высокочастотных сигналов, учитывающих паразитные емкости.

Приведенным требованиям отвечают симуляторы RTDS и PSCAD, которые предназначены для моделирования электромагнитных переходных процессов в энергосистемах в широком диапазоне шага расчета. Удобство использования симуляторов заключается в многообразии видов имитируемых КЗ, расстояния до места и момент начала КЗ, его сопротивления. Но самое главное, моделирование позволяет избежать проведения дорогостоящих испытаний на реальном объекте, не подвергая опасности действующее электрооборудование и персонал.

Симулятор PSCAD является программным средством и позволяет создавать модели энергосистем и выполнять их расчет в диапазоне частот свыше 1 МГц. Полученные данные можно сохранить в виде COMTRADE файла с высокой частотой дискретизации и использовать при тестировании УЗВП. Кроме того, в среду PSCAD возможно перенести разрабатываемый алгоритм УЗВП и осуществить его проверку на модели в виртуальном пространстве. [3, 4, 5, 6]

Современная платформа Novacor симулятора RTDS и вспомогательный вычислительный модуль GTFPGA-TWRT осуществляют симуляцию электромагнитных процессов с шагом расчета около 1 мкс.



Скриншот программы с осциллограммой с высокочастотными сигналами

Испытания УЗВП SEL-T400L на RTDS

Все расчеты выполняются в реальном времени с учетом фазочастотных характеристик воздушных и кабельных ЛЭП, отпаек на ней и подключенного электрооборудования. К симулятору RTDS можно подключать любые физические устройства и имитировать условия работы, максимально приближенные к реальным. Применение симулятора позволяет своевременно обнаруживать и устранять недостатки в проектируемых устройствах, что является очень важным условием для успешного выведения на рынок новых изделий в такой мало исследованной области, как УЗВП. [2]

Для успешного проведения испытаний УЗВП требуются специализированные проверочные устройства. Сложность заключается в том, что рабочая полоса частот сигналов волновых процессов простирается до сотен килогерц и для их формирования требуются специальные усилители и устройства воспроизведения, имеющие широкий диапазон рабочих частот и необходимую точность воспроизведения сигналов.

Таблица. Краткие технические характеристики проверочных устройств

Модель	Каналы тока	Каналы напряжения	Источник сигнала	Габаритные размеры (Ш x В x Г), мм	Вес, кг
РН-01	3 x 15 А 0–500 кГц	—	Файл	360 x 150 x 404	16
РН-02	6 x 15 А 0–500 кГц	—	Файл	360 x 150 x 404	18
РН-03	3 x 15 А 0–500 кГц	—	Файл	360 x 150 x 404	16
РН-04	3 x 15 А 0–500 кГц	3 x 150В 0–350 кГц	Файл, симулятор RTDS	448 x 266 x 500	20
РН-05	6 x 50 А 0–200 кГц	—	Файл, симулятор RTDS	448 x 266 x 500	20

Устройство проверки УЗВП модель PH02

Компания PONOVO Power разработала и выпускает линейку проверочных устройств серии PH для испытаний УЗВП. Устройства этой серии отличаются между собой рабочим диапазоном выходного тока и наличием каналов напряжения, а также возможностью работы в режиме усиления внешних сигналов. Все управление устройствами серии PH ведется по сети Ethernet с персонального компьютера. В качестве тестовых сигналов используются COMTRADE файлы с высоким разрешением, записанные на реальном объекте или смоделированные программным путем на симуляторах PSCAD, RTDS и пр.

Аппаратная часть этих устройств содержит специализированный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и усилитель мощности с высоким быстродействием и широкой полосой пропускания. ЦАП имеет разрешение 16 бит и частоту дискретизации до 10 МГц, что позволяет воспроизводить сигналы, содержащие до 200 тыс. точек на период частоты 50 Гц. Память устройства позволяет загрузить для воспроизведения до 512 тыс. значений на каждый канал.

В усилителях тока и напряжения применяются современные схемотехнические решения на базе МОП-транзисторов высокой мощности, обеспечивающие точное воспроизведение сигналов в широком диапазоне частот с минимальными гармоническими искажениями. Усилитель имеет полосу пропускания от 0 до 500 кГц с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики менее 3 дБ, а погрешность по амплитуде не превышает 0,5 %.

При проведении испытаний волновых защит с двухсторонним расположением на ЛЭП требуется точная синхронизация между собой всех используемых устройств. Для этой цели проверочные устройства серии PH имеют входы подключения сигналов GPS или IRIG-B и могут одновременно начинать воспроизведение тестовых сигналов с погрешностью менее 500 нс. Также устройства имеют скоростные дискретные вход и выход.

Приведенные выше аппаратные возможности проверочных устройств серии PH позволяют проводить испытания комплектов оборудования РЗА с волновыми принципами работы в режимах одностороннего или двустороннего тестирования, а также могут применяться при проверке традиционных устройств РЗА вследствие широкой полосы пропускания. Это испытательное оборудование может найти применение на предприятиях, обслуживающих ПС с устройствами РЗА с волновой защитой, а также на предприятиях, разрабатывающих и производящих такие защиты.

Еще более широкие возможности открываются при подключении проверочных устройств серии PH к симулятору RTDS. Такую возможность имеют устройства PH04 и PH05, которые оснащены низковольтными аналоговыми входами и могут работать в режиме широкополосного усилителя. Использование этих устройств совместно с симулятором RTDS позволяет собирать замкнутую испытательную систему для проверки УЗВП, способную моделировать волновые процессы в энергосистеме. Такая испытательная система используется для анализа взаимодействия аппаратуры при различных авариях, включая последовательно развивающиеся.

Устройства серии PH очень эффективны при заводских испытаниях готовой продукции. Для их проведения заранее при помощи симуляторов PSCAD или RTDS разрабатываются и подготавливаются тестовые COMTRADE файлы требуемых переходных процессов. Во время испытаний эти файлы поочередно воспроизводятся, а действия УЗВП и работа функции ОМП сравнивается с контрольными значениями.

Выводы

Развитие волновых защит получило мощное подкрепление вследствие выпуска специализированных диагностических средств. Были разработаны и внедрены методы расчета волновых процессов для симуляторов PSCAD и RTDS, а аппаратная часть симулятора RTDS достигла производительности, способной обеспечивать симуляцию волновых процессов в реальном времени. Начато производство проверочных устройств с широким диапазоном рабочих частот, достаточным для проведения испытаний УЗВП. Все эти средства и устройства могут применяться разработчиками, производителями и эксплуатирующими предприятиями при разработке и внедрении новых УЗВП на объектах электроэнергетики. **ЭS**

Литература

1. Лачугин В. Ф., Платонов П., Смирнов А. Новые технологии и оборудование (методы и устройства) для определения мест повреждения // Электроэнергия. Передача и распределение, 2016. № 5. С. 108–117
2. Сидвол К., Иванов Ф. А. Новые возможности моделирования энергосистем в реальном времени // Энергия единой сети. 2019. № 4. С. 22–30.
3. Jinrui Tang, Yin Xianggen, Zhang Zhe Modeling Technology in Traveling-Wave Fault Location // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 2013. № 11.
4. Куликов А. Л., Лоскутов А. А., Пелевин П. С. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов // Электричество. 2018. № 3. С. 11–17.
5. Куликов А. Л., Лоскутов А. А., Пелевин П. С. Метод автоматического повторного включения на кабельно-воздушных ЛЭП с использованием двусторонних измерений // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2019. № 4 (127). С. 81–90.
6. Wang Zi-teng, Li Hao, Song Jian-ming, Ren Zheng, Application and Research of Double-Ended Range Verification Basedon PSCAD Full Process Simulation on UHV DC // Electric Power System Equipment. 2019. № 18. P. 68–70.