

Совершенствование работы реле в офф-лайн и он-лайн режиме

MLADEN KEZUNOVIC, JINFENG REN, CHENGZONG PANG
Texas A&M University
U.S.A
kezunov@ece.tamu.edu

АННОТАЦИЯ

Релейная защита предназначена для быстрого и правильного устранения повреждения и сокращения воздействия неисправностей на энергетическую систему. Иногда, некоторые сложные режимы могут вызвать неверную работу релейной защиты, что может впоследствии ухудшить состояние системы и даже подвергнуть опасности стабильность всей системы. В этой работе рассматривается три категории решений для анализа поведения релейной защиты, оценки и совершенствования её работы: 1) оценка работы, основанная на тестировании релейной защиты; 2) оценка в условиях эксплуатации, основанная на глубоком анализе работы в условиях повреждения; 3) автоматизированный анализ работы релейной защиты, основанный на применении экспертных систем. Показано применение различных подходов оценки работы релейной защиты, чтобы продемонстрировать преимущества каждого.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Тестирование Релейной Защиты, Надежность, Безопасность, Экспертная система, Автоматизированный анализ неисправности

1. ВВЕДЕНИЕ

Релейная защита разрабатывается так, чтобы удовлетворять требованиям безопасности и надежности. Для того чтобы соответствовать данным критериям работы, нужно правильно применить устройство релейной защиты и задать уставки. Иногда, по многим сложным причинам, реле не может работать должным образом. Это может стать причиной серьезных проблем в функционировании энергосистемы, и в худшем случае привести к системной аварии [1]. Различные методы и инструменты были разработаны за эти годы, чтобы избежать таких критических последствий неправильной работы релейной защиты.

Для обнаружения проблем с уставками, практическим применением или алгоритмами работы реле могут использоваться методы оценки работы реле и инструменты. Такие методы могут быть разделены на две основные категории: он-лайн и офф-лайн. Он-лайн методы сосредоточены на оценке работы реле, используя осциллограммы работы релейной защиты или устройств мониторинга, таких как цифровые регистраторы аварийных режимов [2]. Было предложено много инновационных методов, такие как метод, основанный на вейвлет-преобразованиях [3], метод с использованием синхрофазотрона [4], и метод с использованием экспертной системы [5] с целью охарактеризовать и улучшить функционирование релейной защиты. В офф-лайн методах могут использоваться как моделирование, так и имитация или готовые файлы осциллограмм для активации входов релейной защиты при тестировании [6]. Много усилий приложено для разработки различных подходов, связанных с программным обеспечением для моделирования релейных защит и энергосистем [7], и испытательного оборудования для того, чтобы задавать тестовые сигналы физическому устройству релейной защиты [8].

В этой работе рассмотрены три набора инструментов и связанные с ними методологии, которые были развиты за 15-ти летний период. Первый метод нацелен на приемочные испытания релейной защиты, используя проверку на соответствие и тесты на соответствие техническим требованиям, уделяя особое внимание оценке безопасности работы релейной защиты [6]. Это выполняется с использованием специализированных испытательных установок, способных к воспроизведению осциллограмм как смоделированных, так и реальных процессов одновременно для множества реле. Этот тип испытаний может быть применен для многотерминальных систем релейной защиты, например, при конфигурации линии передачи по T-схеме или для релейной защиты силовых трансформаторов с третичной обмоткой. Применение этого типа тестов проиллюстрировано при помощи IEEE-PSRC модели энергетической системы и библиотеки тестовых данных, полученных с использованием этой модели [9]. Второй подход сосредоточен на оценке работы релейной защиты в условиях эксплуатации в реальном времени во время последовательной цепи событий. Это требует наличия инструментов мониторинга работы релейной защиты и сравнения с критериями правильного функционирования. Рассмотрены два случая: непредусмотренное срабатывание реле из-за перегрузки на линии и неверная работа из-за скрытого отказа. Критерии правильной работы релейной защиты, используемые для оценки непредусмотренного срабатывания и неверной работы, являются реализацией точных методов определения места повреждения в реальном времени и модели повреждений в виде дерева решений для алгоритма работы релейной защиты соответственно. Третий подход связан с автоматизированным послеаварийным анализом работы релейной защиты и последовательности устранения повреждений. Это выполняется экспертной системой, которая анализирует отчеты от цифровых регистраторов аномальных режимов или реле, затем выдает заключение, было ли срабатывание реле и соответствующее устранение повреждения ожидаемым. Инструкции экспертной системы позволяют проводить причинно-следственный анализ различных последовательных шагов в работе релейной защиты, каналов связи и выключателей. Представлены исследования случаев использования упомянутых методов для оценки релейной защиты, чтобы продемонстрировать их преимущества.

2. ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТИРОВАНИЯ

2.1. Методика функционального тестирования

По цели проведения различают два типа тестов: проверка соответствия и тест на совместимость. Оба типа тестов выполнены с использованием переходных сигналов [10], которые больше соответствуют действительности и обеспечивают более точные результаты.

Цель проверки соответствия состоит в том, чтобы оценить функциональные возможности релейной защиты и характеристики срабатывания, и проверить параметры настройки реле, что достигается при выполнении ряда всесторонних тестов. Задача этого теста – статистический сбор данных, связанных с характеристиками срабатывания реле и времени отключения. Чтобы выполнить этот тест, проводится ряд предварительных тестов для различных неисправностей, включая состояние повреждения и ненормальные рабочие режимы, путем симулирования, либо данные собираются в ходе эксплуатации.

Подтверждение, может ли реле работать правильно при специфических обстоятельствах в энергетической системе, особенно во время ненормальных эксплуатационных режимов, может быть получено при проведении теста на совместимость. Этот тип теста помогает выяснить, соответствует ли работа реле защиты ожидаемым действиям для данного случая. Задача этого теста – проверка на срабатывание/не срабатывание выходных реле и времени срабатывания для специфических условий применения защиты. Определение критичных условий, которые могут вызвать непредусмотренное срабатывание реле, может быть достигнуто при моделировании установившихся и динамических состояний системы [6].

Для реализации различных сценариев повреждений, чтобы выполнить проверку соответствия и тест на совместимость, используются две модели энергетической системы. Для проверки соответствия

используется эталонная модель, созданная PSRC (Power System Relaying Committee) [9]. На рисунке 1 показана её однолинейная схема и имитационная модель, созданная в ATP (advanced technology program). Исследование определения критических условий для теста на совместимость выполнено для IEEE модели системы 14-ти шин [11].

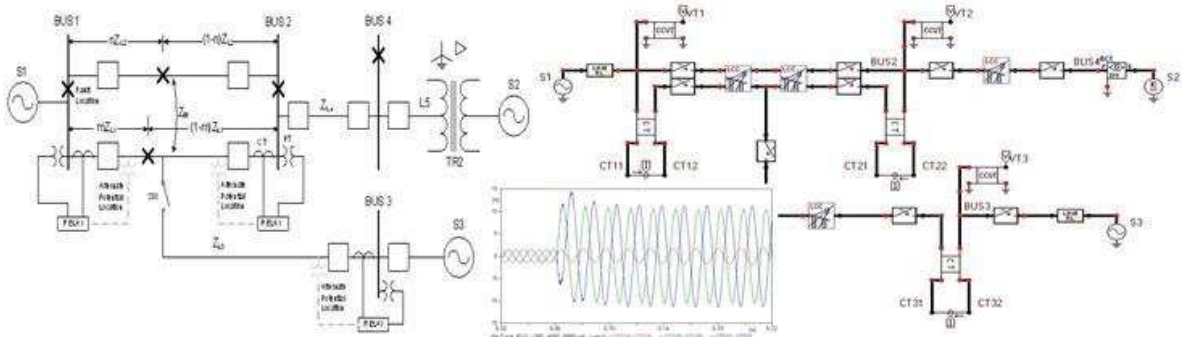


Рис. 1: Однолинейная схема и имитационная модель в ATP для IEEE PSRC модели

2.2. Тестирование релейной защиты

Испытания релейной защиты осуществляются на лабораторной установке, показанной на рисунке 2. Главные компоненты включают ПК для работы с прикладными программами, испытательную установку для воспроизведения “реального” напряжения и токов и тестируемое реле. Блок-схема исполняемой моделирующей программы, созданной в MATLAB, также показана на рисунке 2. Эта программа автоматически моделирует сценарии повреждений различного типа и местоположения, с разным углом начала и сопротивлением в месте повреждения согласно заданным условиям. Выходной файл может быть в формате PL4, MAT и COMTRADE [12], который может использоваться для детального исследования и анализа. Коммерческая программа Relay Assistant [13], установленная на ПК сообщается с испытательной установкой, задает значения напряжений и токов и получает данные о статусе выходных контактов. Испытательной установкой подаются напряжения и токи на устройство релейной защиты и считываются состояния отключающих контактов. При помощи программы задания уставок задаются параметры реле. Посредством автоматизированной программы считывания осциллограмм считываются файлы отчетов об аномальных режимах, которые создаются при фиксировании определенных событий в соответствии с уставками.

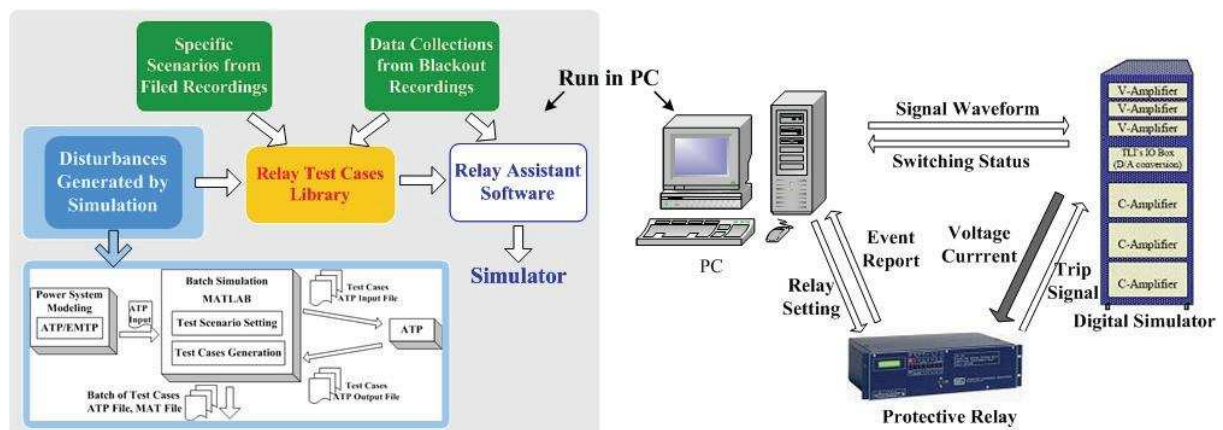


Рис. 2: Структура лабораторной установки и схема тестирования релейной защиты

2.3. Библиотека данных испытаний

Для каждого из рассматриваемых типов релейной защиты, создана библиотека моделей энергосистемы и сценариев повреждений. Как показано на рисунке 2, в библиотеку отобраны сценарии испытаний для проверки соответствия и теста на совместимость. Анормальные эксплуатационные режимы энергосистемы и уязвимые линии передачи, которые могут вызвать непредусмотренное срабатывание реле, могут также быть включены в библиотеку. Также, в библиотеку могут быть добавлены сценарии интересующих отчётов о повреждениях от регистратора анормальных режимов (DFR), и события вызвавшие отключения. Библиотека испытаний может использоваться широко как эталон для оценки работы релейной защиты и устранения неисправностей.

3. ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ОН-ЛАЙН РЕЖИМЕ

3.1. Алгоритм классификации и обнаружения повреждений на базе нейронной сети (NNFDC)

Нейронная сеть — одно из средств искусственного интеллекта. Алгоритм классификации, основанный на нейронной сети, используется, чтобы обнаружить и классифицировать неисправности, которые требуют срабатывания релейной защиты. В отличие от традиционных методов, алгоритм обнаружения ошибок на базе нейронной сети обычно использует непосредственные значения напряжений и токов одного временного интервала вместо того, чтобы рассчитывать векторы сигналов. При этом методе сравниваются сигналы входного напряжения и тока с подготовленными образцами вместо предварительно заданных уставок. Таким образом, точность расчета векторов и координаты уставок реле не проблема для алгоритмов на базе нейронной сети, в отличие от традиционных методов. Это обеспечивает преимущество предложенного решения над традиционными методами. Был создан самоорганизующийся алгоритм обнаружения и классификации повреждений на базе нейронной сети с интеллектуальной системой управления ART [14], который показан на рисунке 3. Местные измерения напряжений и токов после обработки формируют ряд данных. Тысячи таких данных, полученных при моделировании энергосистемы или из базы данных осциллограмм с подстанции в условиях эксплуатации, используются для обучения нейронной сети в офф-лайн режиме, затем опытные данные используются для анализа повреждения в он-лайн режиме с использованием классификатора K-NN с интеллектуальной системой управления. Использование составных нейронных сетей может также увеличить способность обработки большего количества данных [2].

3.2. Алгоритм определения места повреждения на базе синхронизированных выборок (SSFL)

Алгоритм определения места повреждения на базе синхронизированных выборок использует ряд синхронизированных выборок напряжения и токов, взятых с обоих концов линии передачи, что обеспечивает очень высокую точность в обнаружении, классификации и определении места повреждения [15,16]. По сравнению с алгоритмами определения места повреждения, которые используют данные о векторах с одного или двух концов линии, на алгоритм определения места повреждения на базе синхронизированных выборок не влияют условия повреждения и состояние энергосистемы, таким образом, алгоритм невосприимчив к качаниям мощности, перегрузкам и другим ненормальным рабочим режимам. Это дает преимущество в точности и надежности предложенной схемы над традиционными методами.

3.3. Анализ дерева событий

Анализ дерева событий — общепринятый метод в промышленности для того, чтобы идентифицировать причинно-следственные связи [17]. Анализ Деревя Событий использует структуру прогрессивной (восходящей) логики моделирования. Этот метод исследует реакцию системы на инициированные

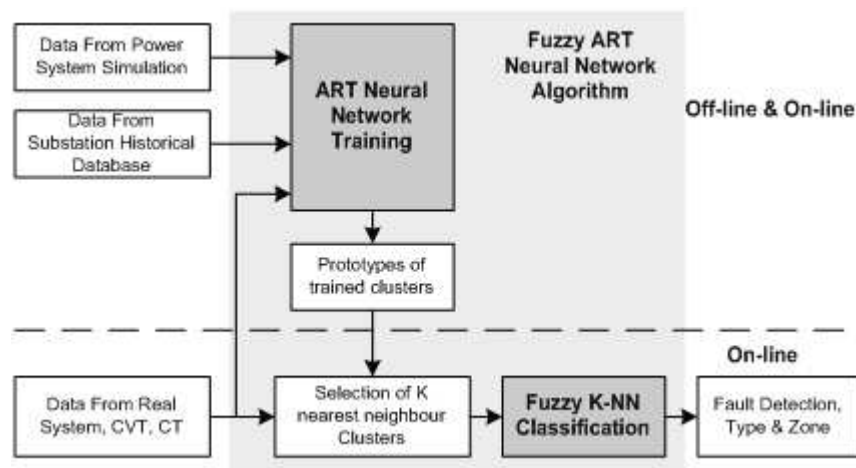


Рис. 3: Алгоритм ART нейронной сети с интеллектуальной системой управления

“запросы” и позволяет оценить вероятность неблагоприятного или благоприятного результата. В нашем случае структура дерева событий распределяется для каждой релейной системы в отдельности, и это обеспечивает эффективный путь для оперативного наблюдения за работой релейной защиты и эффективную местную диагностику неисправностей.

4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОСЛЕАВАРИЙНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

4.1. Автоматизированный анализ работы

Автоматизированный анализ функционирования реле основан на сравнении ожидаемой и фактической работы защиты с точки зрения статуса и соответствия времени активации логических операндов. Если ожидаемый и фактический статус, и время срабатывания операнда соответствуют, подтверждается его правильность. В противном случае идентифицируется неполадка, и начинается процесс диагностики, чтобы отследить причины при помощи логики причинно-следственных связей.

Концептуальная стратегия послеаварийного анализа проиллюстрирована на рисунке 4. Ожидаемая работа защиты предсказана модулем экспертной системы, который моделирует последовательность функционирования системы защиты. Входные данные модуля – информация о неполадках, уставки и спецификация блоков системы релейной защиты, которые используются, чтобы вывести ожидаемые статусы и время активизации логической функции защиты по заданным правилам. Результаты рассматриваются как предположение о работе защиты. Оперирова предпологаемыми и фактически данными о функционировании, модуль экспертной системы проверяет достоверность статусов и время активации логических операндов, основываясь на соответствии фактов и предположений. Затем диагностируются несогласованности ожидаемых и фактических статусов, так же как времена активации логических операндов, на основе причинно-следственных связей. В заключении создается отчет об анализе.

4.2. Реализация на основе экспертной системы

В приложении на основе экспертной системы [18], прямое построение цепочки логических выводов используется, чтобы предсказать работу релейной защиты, и обратное построение цепочки используется, чтобы утвердить и диагностировать фактическую работу защиты. Детальное описание среды для прямого и обратного построения цепочек логических выводов может быть найдено в источнике [19]. Среда создана с использованием Visual C ++, чтобы облегчить ввод данных от устрой-

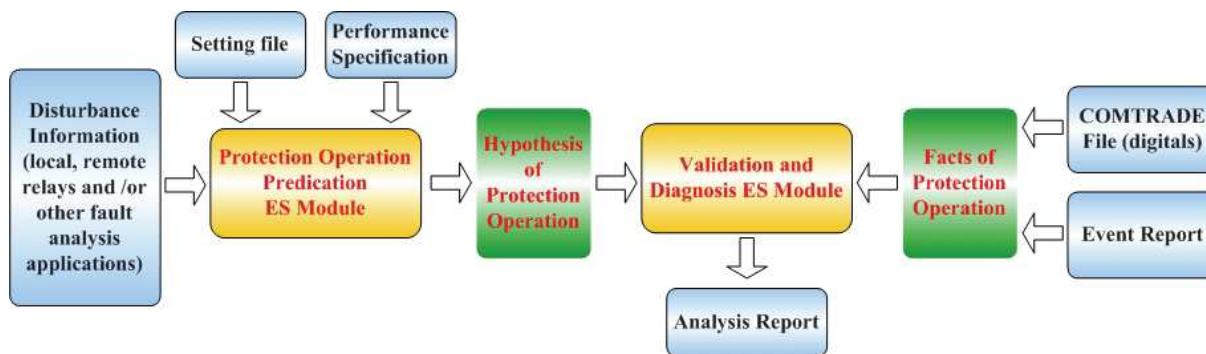


Рис. 4: Блок-схема концепции послеаварийного анализа

ства защиты, и вывод отчетов диагностики. Среда экспертной системы CLIP используется, чтобы выполнить полные диагностические исследования [20].

5. ИЗУЧЕНИЕ СЛУЧАЕВ ОЦЕНКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ПРИМЕРАХ

5.1. Тестирование релейной защиты

Три реле дистанционной защиты конфигурируются различными функциями защиты, обычно используемыми во время эксплуатации, чтобы выполнить тестирование защиты в офф-лайн режиме, используя предложенную методологию. Для примера в таблице 1 даны результаты, полученные при проверке соответствия для одного реле. В этом примере были смоделированы условия для различных типов неисправностей с разным местом и углом начала повреждения. Каждый тест был повторен 30 раз, и чтобы определить время срабатывания для тестируемого реле, были использованы статистические методы. Можно заметить очень интересные результаты относительно различий во времени срабатывания для различных условий повреждений, так же как различий между максимальными и минимальными значениями времени срабатывания для одной и той же неисправности.

Type	Loc [%]	α [deg]	Trip Zone	No.T	MeanT [ms]	MaxT [ms]	MinT [ms]	Devtn [ms]
AG	50	0	I	30	22.57	24.30	20.60	0.85
AG	90	90	II	30	318.20	357.1	313.4	7.87
BC	50	0	I	30	24.71	26.40	22.50	0.79
BC	90	90	II	30	356.23	357.1	355.1	0.59
BCG	50	0	I	30	18.73	20.10	17.90	0.58
BCG	90	90	II	30	365.47	370.3	360.0	1.12
ABC	50	0	I	30	20.88	21.90	20.00	0.61
ABC	90	90	II	30	359.65	361.3	357.2	1.41

Табл. 1: Пример статистических данных тестирования

Другой пример результатов полученных при проверке соответствия дан на рисунке 5. Показан сравнительный анализ времени отключения в зависимости от места повреждения для трех реле дистанционной защиты. Время отключения, показанное на рисунке, получено статистически после повторения нескольких испытаний. Заданы параметры защиты для отключения от зоны I с охватом 80% линии. Интересный результат – время отключения для некоторых реле оказалось намного

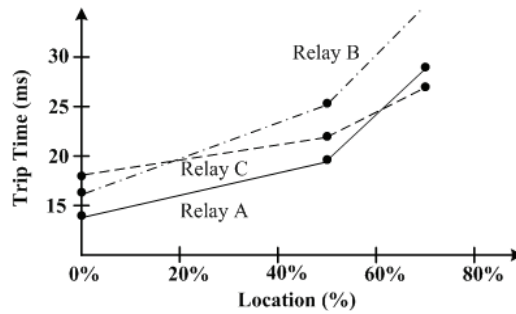


Рис. 5: Пример сравнительного анализа результатов

больше, чем ожидалось. Эти результаты предоставляют дополнительную информацию, которой нет в руководстве на устройство релейной защиты, и определенно могут повлиять на согласование схем релейной защиты.

Как видно из результатов проверки соответствия, некоторые реле работают не так как предусмотрено в условиях расширенного или сокращенного охвата зоны. Проверка также показывает, что во время некоторых ненормальных эксплуатационных режимов энергосистемы, а именно во время качаний мощности и в условиях большой нагрузки, зона 3 релейной защиты срабатывает неправильно, отключая исправные линии.

5.2. Мониторинг работы релейной защиты в он-лайн режиме

Приведен пример исследования, чтобы продемонстрировать процесс он-лайн мониторинга и анализа технических характеристик релейной защиты передовыми средствами обнаружения повреждений [21]. Подробно требования к данным и источники данных для осуществления исследования описаны в источнике [22]. Продвинутое средство он-лайн анализа повреждения обнаруживают неисправность, анализируя местные измерения. Прием анализа дерева событий предназначен для того, чтобы утвердить работу релейной защиты после того, как неисправность обнаружена и классифицирована. Для проверки точности алгоритмов генерируются различные сценарии повреждений. В качестве модели исследования выбрана линия передачи 500 кВ энергетической системы США, связывающая центральную область с юго-западной областью энергосистемы.

Было сгенерировано большое количество состояний неисправности и рабочих режимов, чтобы довести до конца процесс обучения для алгоритма NNFDC, в том числе повреждения различного типа, с различным местом, сопротивлением и углом повреждения. Всего существует 209 групп определенных метками в зависимости от типа неисправности. Для обучения нейронной сети было протестировано 5000 случаев. В процессе тестирования используются два алгоритма для классификации: алгоритм ближайшего соседнего элемента и нечеткий алгоритм k -го ближайшего соседнего элемента. На рисунке 6 показаны ошибки классификации неисправности для алгоритма ближайшего соседнего элемента и нечеткого алгоритма k -го ближайшего соседнего элемента. В данном примере $k = 4$.

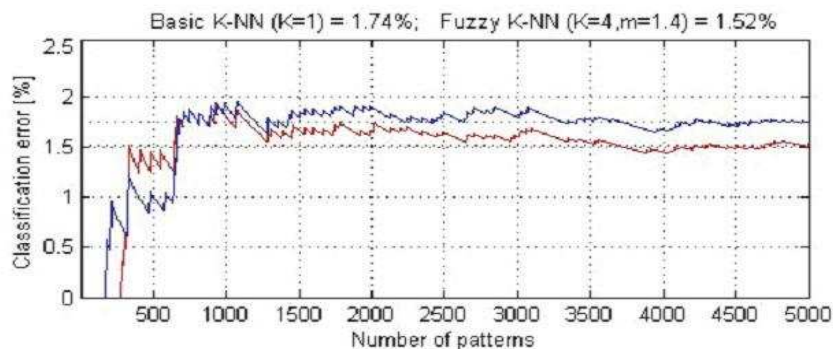


Рис. 6: Ошибки для методов классификации неисправностей с использованием нейронной сети

SSFL алгоритм был протестирован на модели той же линии передач. 140 неисправностей было сформировано путем произвольного задания параметров. Задаваемые данные это также напряжения и токи повреждений, поданные с двух концов линии, что охватывает случаи различных типов повреждений, с различным местом и сопротивлением повреждения. В таблице 2 приведены шесть случаев расчетов по SSFL алгоритму. Из всех случаев максимальная ошибка составила 3,6992%; минимальная ошибка – 0,0234%.

	Fault Type	Fault Distance (mile)	Fault Resistance (Ω)	Fault Angle (degree)	Fault Location (mile)	Error (%)
1	CAG	85.2	3.1	199.9	85.25	0.0234
2	ABCG	23.1	13.1	38.2	22.51	0.2870
3	AB	38.3	15.1	3.8	37.48	0.3933
4	BCG	19.6	2.5	239.7	21.57	1.0016
5	AG	176.4	9.2	98.5	174.60	0.8917
6	ABCG	68.0	2.3	102.8	66.60	3.6992

Табл. 2: Результаты для SSFL алгоритма

5.3. Применение экспертной системы для диагностики функционирования релейной защиты

Для демонстрации возможностей диагностики релейной защиты использован простой случай неисправности. Чтобы вызвать срабатывание релейной защиты, было сформировано междуфазное замыкание на землю при помощи средств, показанных на рисунке 2.

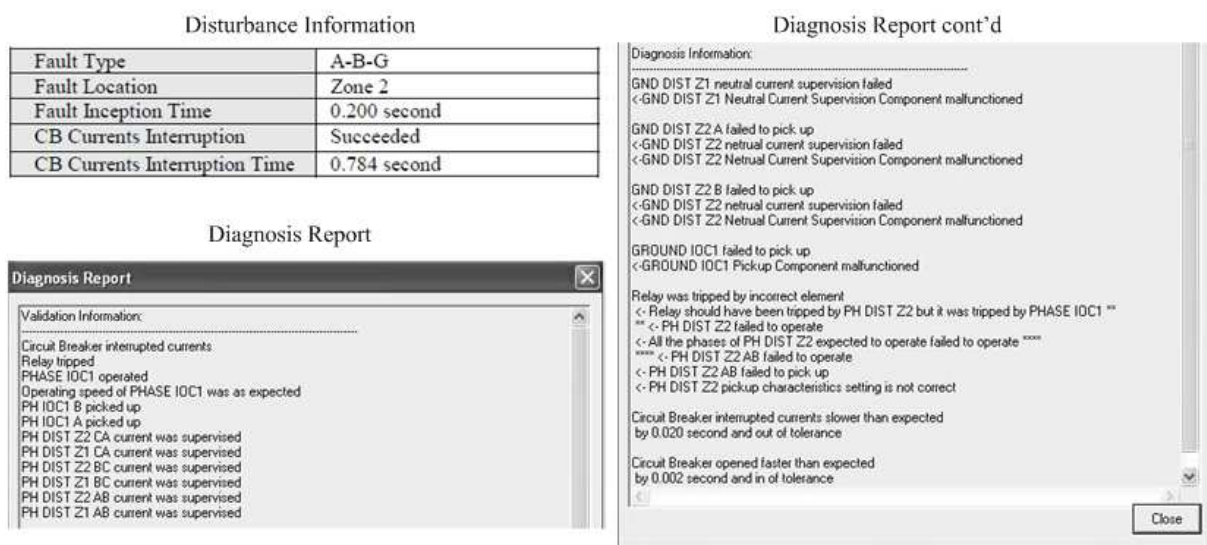


Рис. 7: Информация о неисправности и отчет о диагностике работы релейной защиты

Как показано в окне отчета диагностики на рисунке 7, отключение от релейной защиты было произведено по сигналу PHASE IOC. От релейной защиты был отключен выключатель, и прекратилось протекание токов повреждения. Как можно видеть в окне диагностики, было обнаружено и диагностировано несколько отклонений от нормальной работы. Контур от междуфазных повреждений второй зоны дистанционной защиты не сработал из-за неверных уставок чувствительного органа. Измерительный орган контура второй зоны от замыканий на землю не сработал из-за неверного

измерения тока нейтрали. Также не срабатывает дополнительная функция отсечки по току нулевой последовательности. Основываясь на этих результатах, можно заключить, что имела место неисправность токового канала нейтрали. Также имеется информация по диагностике времени работы выключателя. Выключатель был отключен несколько быстрее, чем ожидалось, но в пределах допустимого. Однако время разрыва токов повреждения превысило допустимую норму.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном докладе представлено три группы способов и методов оценки исполнения релейной защиты. Тестирование релейной защиты позволяет подтвердить эффективность разработанной логики алгоритмов защиты, снять характеристики работы реле, проверить выбранные уставки и обнаружить режимы, которые могут привести к непредусмотренным срабатываниям. Передовой подход к анализу повреждений в он-лайн режиме сочетает обнаружение и классификацию повреждений с использованием нейронных сетей (NNFDC), алгоритм определения места повреждения на базе синхронизированных выборок (SSFL) и анализ дерева событий. Результаты анализа могут быть использованы для выбора действий направленных на подавление неверной или непредусмотренной работы релейной защиты в сложных режимах. Послеаварийный анализ с использованием экспертной системы определяет, соответствуют ли действия релейной защиты по устранению повреждения ожидаемым, исходя из анализа отчетов об аномальных режимах и осциллограмм. Это позволяет обнаружить неверно заданные уставки и отследить неисправности в работе компонентов защиты.

7. БЛАГОДАРНОСТЬ

Глубоко признателен выпускникам аспирантуры S. Vasilic, N. Zhang, and X. Luo за содействие при подготовке данного доклада.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] U.S.-Canada Power System Outage Task Force, "Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations", April 5, 2004. [Online]. Available: <http://www.nerc.com>
- [2] N. Zhang and M. Kezunovic, "A Real Time Fault Analysis Tool for Monitoring Operation of Transmission Line Protective Relay," *Electric Power Systems Research Journal*, Vol. 77, No. 3-4, pp. 361-370, March 2007.
- [3] O.A.S. Youssef, "Fault Classification Based on Wavelet Transforms," *IEEE T&D Conf.*, Atlanta, GA, Oct. 28–Nov.2 2001.
- [4] J. Jiang, C. Chen, C. Liu, "A New Protection Scheme for Fault Detection, Direction Discrimination, Classification, and Location in Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, pp. 34-42, 2004.
- [5] A.A. Girgis, M.B. Johns, "A Hybrid Expert System for Faulted Section Identification, Fault Type Classification and Selection of Fault Location Algorithms," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 978-985, 1996.
- [6] M. Kezunovic, J. Ren, "New Test Methodology for Evaluating Protective Relay Security and Dependability," *IEEE PES General Meeting*, Pittsburgh, July 2008.
- [7] P.G. McLaren, C. Henville, V. Skendzic, A. Girgis, M. Sachdev, G. Benmouyal, K. Mustaphi, M. Kezunovic, Lj. Kojovic, M. Meisinger, C. Simon, T. Sidhu, R. Marttila, D. Tziouvaras, "Software Models for Relays," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 16, No. 2, pp. 238-246, April 2001.
- [8] M. Kezunovic, B.A. Pickett, M.G. Adamiak, G.E. Alexander, K.R. Carr, G. Chirco, J. Esztergalyos, M. Jerosolimski, W.C. Kotheimer, R. Marttila, J.L. McElray, S.M. McKenna, P.G. McLaren, R.J. Murphy, J. Nordstrom, "Digital Simulator Performance Requirements for Relay Testing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, pp. 78-84, January 1998.

- [9] Power System Relaying Committee, “EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing Report,” draft 10a, Dec. 2004. [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org>
- [10] M. Kezunovic, Y.Q. Xia, Y. Guo, C.W. Fromen, D.R. Sevcik, “Distance Relay Application Testing Using a Digital Simulator,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 72-82, January 1997.
- [11] S.K.M. Kodsi, C.A. Canizares, “Modeling and Simulation of IEEE 14 Bus System with FACTS Controllers,” Technical Report 2003-3, Waterloo, Canada, 2003. [Online]. Available: <http://www.power.uwaterloo.ca>
- [12] IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE), IEEE Standard C37.111-1999, March 1999.
- [13] Test Laboratories International, Inc. Relay Assistant-Digital Simulator Software, 2004. [Online]. Available: <http://www.tli-inc.com>.
- [14] S. Vasilic, M. Kezunovic, “Fuzzy ART Neural Network Algorithm for Classifying the Power System Faults,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1306-1314, April 2005.
- [15] M. Kezunovic, B. Perunicic, “Automated Transmission Line Fault Analysis Using Synchronized Sampling at Two Ends,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996.
- [16] M. Kezunovic, and C. Pang, “Improved Transmission Line Protection During Cascading Events,” CIGRE B5 Colloquium, Madrid, Spain, October 2007.
- [17] N. Zhang, M. Kezunovic, “Verifying the Protection System Operation Using an Advanced Fault Analysis Tool Combined with the Event Tree Analysis”, NAPS2004, 36th Annual North American Power Symposium, Moscow, Idaho, August, 2004.
- [18] J. Giarratano, G. Riley, Expert Systems Principles and Programming, PWS Publishing Company, Boston, 1994.
- [19] X. Luo, M. Kezunovic, “An Expert System for Diagnosis of Digital Relay Operation,” 13th Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, Washington DC, USA, November 2005.
- [20] J.C. Giarratano, CLIPS User’s Guide, Version 6.20, NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, TX, 2002.
- [21] PSerc Project S29 Final Report – Part I, “Detection, Prevention and Mitigation of Cascading Events”, PSerc Publication 08-18. [Online] Available: <http://www.pserc.org>.
- [22] C. Pang, M. Kezunovic, “Information Management System for Detecting Cascading Events,” PowerCon 2008 and 2008 IEEE Power India Conference, New Delhi, India, October, 2008.