

СЕКЦИЯ 8. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОСТИ НАСТРОЙКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ

М.В. Андреев, А.О. Сулайманов, Ю.С. Боровиков
Томский политехнический университе
ЭНИН, ЭЭС

Согласно данным Росстата рост потребления электроэнергии в России в среднем составляет 1,5% в год, а общий прирост за последние 10 лет – 18 % [1]. Примерно такая же ситуация в среднем существует и в мире. Следует отметить, что предпосылок к снижению этих цифр нет, а это в свою очередь приводит к логичному выводу о том, что наращивание генерируемых мощностей будет также продолжаться. В итоге, современная электроэнергетическая система (ЭЭС), которая уже на сегодняшний день представляет собой сложную, динамическую, многопараметрическую и нелинейную систему, станет еще сложнее. Управление и защита ЭЭС в настоящее время являются приоритетными задачами электроэнергетической отрасли ввиду чрезвычайной сложности их решения в указанных условиях. Ситуация усугубляется за счет современной мировой тенденции, связанной с увеличением доли распределённой генерации и активным внедрением возобновляемых источников энергии. Согласно планам Евросоюза доля распределенной генерации к 2020 году будет 20%, а к 2050 – 80-95%. Применение быстродействующих адаптивных систем управления и защиты не позволяет решить названные проблемы полностью. Об этом, в частности, свидетельствует мировая статистика аварийности в ЭЭС, согласно которой 25 % [2] приходится на неправильные действия релейной защиты (РЗ) и автоматики. История знает множество случаев тяжелых системных аварий (блэкаутов), вызванных непосредственно или косвенно неправильными действиями защит. Вот лишь несколько случаев [3], результаты расследования которых стали теперь общедоступны:

- 1965 г., США. Ввиду значительной загруженности пяти ЛЭП, соединяющих север и юг США, резервная защита одной из них инициировала отключение линии (в данном случае ложное). Это привело к перегрузке и отключению других ЛЭП. В результате 30 млн. человек остались без электричества в течение 13 часов.
- 1977 г., США. В результате 8 млн. человек оставались без электричества в течение 5-25 часов в разных районах города Нью-Йорк. Развитие аварии: молния ударила в две ЛЭП, объединяющих две части ЭЭС Нью-Йорка; РЗ этих линий сработали некорректно и отключили их; была также отключена еще одна линия (три из четырех ЛЭП объединяющих две части ЭЭС Нью-Йорка). Через 35 минут из-за перегрузки

отключилась четвертая ЛЭП. В итоге работа всей системы была нарушена.

- 1996 г., США. Развитие аварии: возник пробой между ЛЭП 345 кВ и деревом; возникшее КЗ было отключено, в результате чего возник дефицит мощности в 2 ГВт; возникшая в результате этого просадка напряжения привела к отключению нескольких гидрогенераторов ввиду значительного увеличения токов в них в течение 25 секунд; еще большая просадка напряжения в результате этого привела к ложному срабатыванию третьей ступени дистанционной защиты, что еще усугубило ситуацию и привело к ускорению генераторов ЭЭС. В итоге система была поделена на 5 «островов» и на восстановление целостности потребовалось несколько часов.
- 2003 г., США. В результате 50 млн. человек остались без электричества, было выведено 63 ГВт энергии (11% от общего объема), при этом 400 ЛЭП, 531 генерирующая единица на 261 электростанции были отключены. Главной причиной стал дефицит реактивной мощности, приведший к потере устойчивости ЭЭС. Сам дефицит возник в результате ложного отключения автоматического регулятора возбуждения из-за перегрузки. Параллельно с этим возникло КЗ в результате пробоя на дерево. Точку в этой аварии поставила третья ступень дистанционной защиты одной нагруженной ЛЭП, сработавшая ложно. Возникший после этого реверс мощности привел к каскадному блэкауту.
- 2003 г., Италия. Развитие аварии началось с пробоя на дерево линии, соединяющей Италию и Швейцарию. Автоматическое повторное включение не восстановило связь ввиду невыполнения условий синхронного включения. Дефицит мощности привел к потере синхронизма Италии и европейской ЭЭС. Связи с Францией и Австрией были потеряны ввиду ложного действия дистанционных защит. В итоге возникла перегрузка связи Италия-Словения, что привело к её отключению. Возник дефицит 6400 МВт и устойчивая работа Итальянская ЭЭС была нарушена.

Неправильные действия РЗ связаны с несоответствием настройки защит реальным условиям их функционирования, что в свою очередь определяется двумя взаимосвязанными факторами:

1. Использование неполной и/или малодостоверной информации о режимах и процессах в ЭЭС при расчете уставок РЗ.
2. Грубый расчет уставок из-за учета в соответствующих методиках процессов в конкретных реализациях РЗ и погрешностей, вносимых элементами этих РЗ, приближенными обобщенными коэффициентами.

По мере развития средств моделирования ЭЭС и, особенно, в результате создания в Энергетическом институте Томского политехнического университета Всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС), минимизирующего первый фактор, появилась возможность более глубокого полного и достоверного исследования обозначенной проблемы, выявления факторов её существования и разработки на основе результатов этих исследо-

ваний концепции решения данной проблемы, позволяющей создать методику адекватной всережимной настройки РЗ.

Решить эту задачу весьма эффективно можно с помощью средств всережимного моделирования РЗ, достаточно полно и достоверно воспроизводящих процессы в конкретных реализациях и измерительных преобразователях (ИП). Общие положения концепции для создания таких моделей представлены ниже:

1. ИП, которые в настоящее время основаны на электромагнитном принципе, являются источниками наибольших погрешностей. В связи с этим их адекватное моделирование в совокупности с самой защитой является очень важным. Следует учесть и современные тенденции развития ИП, а именно оптоэлектронные технологии преобразования сигналов, при разработке моделей РЗ.
2. В зависимости от конкретной реализации РЗ сигналы, поступающие с ИП, преобразуются и используются различным образом. Информацию об этом содержит в себе принципиальная схема защиты конкретного вида и типа. Тщательный её анализ позволит выявить все ключевые особенности РЗ.
3. Основой для математического описания процессов, протекающих в устройствах РЗ, является схема замещения, составленная в соответствии с принципиальной схемой защиты с учетом ИП. При этом:
 - все устройства электромагнитного и индукционного типа (измерительные трансформаторы, промежуточные трансформаторы, трансреакторы, реле и др.), учитываются в схемах замещения их RL-параметрами; следует учесть магнитные свойства сердечника, поскольку характеристика намагничивания в определенных режимах играет существенную роль при формировании погрешностей элемента;
 - все остальные пассивные элементы представляются соответствующими RLC-параметрами; при необходимости можно учесть и паразитные параметры этих элементов.
4. Наиболее удобной формой математического описания, позволяющей производить анализ во временной и частотной областях, является передаточная функция (ПФ), наиболее эффективным методом получения которой является метод направленных графов [4].
5. Для анализа амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик звеньев и РЗ в целом используется комплексная форма ПФ.
6. Для анализа и исследования процессов в звеньях и РЗ в целом на основе ПФ формируются дифференциальные уравнения.
7. При реализации математических моделей РЗ, в связи с возможной ограниченностью аппаратных ресурсов, таких как оперативная память и временные затраты на выполнение алгоритма, может возникнуть необходимость их упрощения, что позволяет эффективно осуществить теория точности и чувствительности.
8. Синтезированные математические модели РЗ необходимо протестировать и, в случае необходимости, скорректировать. Предварительное их

исследование наиболее удобно производить с помощью таких программных комплексов, как MATLAB Simulink, MathCAD и др.

9. Синтезированные математические модели РЗ необходимо верифицировать. Применяются два основных подхода к достоверизации математических моделей РЗ:

- сравнение результатов функционирования математической модели и реального устройства;
- сравнение полученных характеристик отдельных узлов модели с теоретическими сведениями, доступными в открытых источниках.

Следует отметить, что первый подход сложно реализуем ввиду ряда факторов, в частности, сложности извлечения информации в конкретных узлах реального устройства, а также отсутствия доступа к оборудованию.

10. Реализация синтезированных математических моделей РЗ в виде программных или программно-технических средств. В зависимости от варианта реализации расчет математических моделей может осуществляться одним из численных методов интегрирования дифференциальных уравнений, либо аппаратно – методом явного или неявного непрерывного интегрирования.

Данная концепция, в несколько ином виде уже была использована при создании моделей РЗ [5]. Полученные при этом результаты оказались удовлетворительными. Конечная цель данной работы, как уже говорилось – создание новой методики расчета уставок РЗ, учитывающей современные тенденции развития ЭЭС и РЗ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука» № 3901, тема: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сайт Института проблем естественных монополий. Доступ: <http://ipem.ru/news/publications/630.html>.
2. Кузьмичев В.А., Коновалова Е.В., Сахаров С.Н., Захаренков А.Ю. Ретроспективный анализ работы устройств РЗА в ЕНЭС // Релейная защита и автоматизация. - 2012. - №01 (06). - С. 60-65.
3. Arulampalam Atputharajah, Tapan Kumar Saha. Power System Blackouts - Literature review // Fourth International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2009, 28 - 31 December 2009, Sri Lanka, pp.460-465.
4. Дж. Абрахамс, Дж. Каверли. Анализ электрических цепей методом графов. М., «Мир», 1967.

5. Андреев М.В. Средства всережимного моделирования дифференциальных защит трансформаторов в электроэнергетических системах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; спец. 05.14.02 / М. В. Андреев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); науч. рук. Ю.С. Боровиков. — Томск, 2013. — 287 л.: ил. — Библиогр.: с. 133-143 (106 назв.).

ВОДНО-РАСТВОРНЫЙ ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

А.А. Кладько
Томский политехнический университет
ИФВТ, ВЭСЭ

Последовательный рост классов напряжения, успешно коммутируемых современными моделям промышленных вакуумных выключателей, делает актуальными вопросы дальнейшего улучшения их эксплуатационных характеристик. Одной из таких характеристик является коммутационных ресурс выключателя, напрямую связанный с эрозией контактов вакуумной дугогасительной камеры. В последующем рассмотрении будет изложен один из способов подключения вакуумного выключателя в коммутируемую им сеть, в перспективе своего применения способный минимизировать проблемы износа поверхности контактов.

Не останавливаясь подробно на детальном описании процессов, протекающих в вакуумной дугогасительной камере (ВДК) выключателя при отключении токов короткого замыкания (КЗ), в качестве основного положения в дальнейшем рассмотрении будем рассматривать тот факт, что ограничение величины токов КЗ позволяет понизить температуру нагрева контактных поверхностей, тем самым минимизируя объем испаряемого с них металла.

Обзор существующих разработок по ограничению токов КЗ, позволил установить два устройства, имеющих аналогичное назначение.

Первое – высокотемпературный сверхпроводящий ограничитель тока КЗ. Принцип его работы основывается на том, что при прохождении номинального тока ограничитель имеет небольшое сопротивление (порядка десятков мкОм и индуктивное сопротивление в единицы мкГн), а в момент КЗ сопротивление ограничителя увеличивается до нескольких Ом за сотни мкс и продолжает расти по мере нагрева ограничителя от проходящего тока, что и обеспечивает ограничение тока КЗ [1]. Конструктивно, подобный ограничитель представляет собою систему из бифилярных петель высокотемпературной сверхпроводящей ленты, закрепленной на роликовых опорах [1]. Ключевой недостаток конструкции – сложность и как следствие высокая стоимость изготовления.

Второе устройство ограничителя тока КЗ имеет в каждом из полюсов вакуумного выключателя (ВВ) две параллельно соединенных ВДК последовательно соединенных с токоограничивающими резисторами [2]. При общей про-