

стью и существенной неэкономичностью. Маломасштабные образцы космических солнечных электростанций не позволяют обеспечить финансирование последующих этапов работ.

– Выделение сколько-нибудь значительных финансовых ресурсов на программу космических солнечных электростанций, даже если это будет происходить в рамках международной программы, представляется в ближайшей перспективе маловероятным.

Известны две альтернативные точки зрения на ход дальнейших работ по космическим солнечным электростанциям. В соответствии с первой предлагается полностью прекратить разработки по космической энергетике для наземных нужд. Согласно второй – широко развернуть научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью создания полноразмерных эксплуатационных образцов электростанций.

В основу подхода положен принцип поэтапного наращивания мощностей космических солнечных электростанций с одновременным обеспечением рентабельности системы. Стоит задача разработки мало-, средне- и крупномасштабных образцов космической солнечной электростанции с уровнем вырабатываемой мощности 100 кВт, 1 МВт, 10 МВт, 100 МВт и 1000 МВт. Только после освоения малого уровня полезной мощности, получения необходимого опыта и возмещения произведенных затрат можно будет переходить к последующему этапу.

Литература

1. Нариманов, Е.А. Космические солнечные электростанции. – М.: Знание, 1991. – 64 с.
2. Гэтланд, К. Космическая техника. Иллюстрированная Энциклопедия Космической Технологии. – М.: Мир, 1986. – 292 с.

УДК 621.316.925

СПОСОБЫ ОТСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРА ОТ БРОСКОВ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ И РЕЖИМОВ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ

Булойчик Е.В.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент **ТИШЕЧКИН А.А.**

Релейная защита от внутренних коротких замыканий (КЗ) силовых трансформаторов должна правильно функционировать и надежно распознавать внутренние КЗ и аномальные режимы. К аномальным режимам относятся броски намагничивающего тока, перевозбуждения, перегрузки.

В данной работе рассматриваются способы отстройки цифровых дифференциальных защит трансформатора от бросков намагничивающего тока (БНТ) и режимов перевозбуждения (ПВ).

Одним из основных требований к дифференциальной защите силового трансформатора является правильное и быстрое распознавание БНТ. Сложность этой задачи обусловлена многообразием возможных значений и форм тока с учетом разновременности включения фаз и насыщения трансформаторов тока. Выбранный способ распознавания БНТ в значительной мере определяет сложность защиты в целом, ток и время срабатывания защиты при внутренних КЗ.

БНТ представляет собой переходной процесс, проявляющийся в резком увеличении намагничивающего тока силового трансформатора, вызванный включением под напряжение или восстановлением напряжения после отключения внешнего КЗ. Он обу-

словлен возникновением свободной аperiodической составляющей в магнитном потоке, приводящей к насыщению магнитопровода.

В общем случае в БНТ содержатся большая аperiodическая составляющая, гармоника основной частоты и высшие гармоники. Причем соотношения между этими составляющими для различных фаз отличаются и зависят от многих факторов: схем соединения силового трансформатора и трансформаторов тока, насыщения трансформаторов тока, неодновременности включения фаз выключателя, режима заземления нейтрали силового трансформатора и т. д. В практике релейной защиты пользуются предельными характеристиками БНТ при наиболее неблагоприятных режимах.

Известны различные способы распознавания БНТ, но в последнее время наибольшее распространение получили следующие способы отстройки от бросков тока намагничивания:

1) относительно большое (не менее 17 %) по отношению к первой гармонике, содержание второй гармоники в дифференциальном токе. Этот способ наиболее широко используется ведущими зарубежными фирмами. Однако гармоническое торможение может приводить к задержке срабатывания защиты в переходном режиме КЗ, сопровождающимся насыщением трансформаторов тока (ТА). Для исключения этого недостатка в схеме защиты может предусматриваться дополнительная ступень (дифференциальная токовая отсечка);

2) признаки, основанные на анализе формы БНТ, например временные интервалы, включающие в себя длительность пауз в кривой тока или в кривой производной тока на различных уровнях замера, длительность импульсов тока, длительности частей импульса между нулевым и максимальным значением, соотношение указанных интервалов;

3) комбинированные способы, использующие сочетание признаков гармонического состава и временных интервалов.

Эти признаки обеспечивают возможность снижения тока срабатывания дифференциальной защиты по условию отстройки от БНТ до 0,1–0,3 номинального тока трансформатора.

Отстройка от БНТ мощных трансформаторов по времени, как правило, не имеет смысла из-за медленного затухания БНТ (амплитудные значения БНТ могут затухать в течение времени 0,5–1 с до установившегося значения тока холостого хода).

Указанные выше способы отстройки от БНТ наиболее просты в реализации. Они основаны на контроле признаков дифференциального тока. Однако существуют способы распознавания БНТ использующие одновременно ток и напряжение силового трансформатора или параметры основного магнитного поля и поля рассеяния. Они могут обеспечивать сверхбыстродействие, но требуют дополнительных первичных преобразователей, что снижает аппаратную надежность релейной защиты.

Основные из этих способов:

1) преобразование напряжения трансформатора в ток или тока в напряжение с помощью математической или физической модели трансформатора и сравнение с измеренным током или напряжением. Этот способ эффективен при точной модели насыщенного трансформатора с учетом остаточной индукции, если трансформатор не поврежден. Однако практически используются приближенные модели, поэтому возможности этого способа не имеют существенных преимуществ перед вышеуказанными;

2) логическое произведение напряжения и дифференциального тока в течение нескольких миллисекунд. Основан на том, что при БНТ в течение примерно 2,5 мс после момента включения под напряжение трансформатор не насыщен и ток намагничивания близок к нулю. После насыщения трансформатора происходит импульс БНТ. При внутреннем КЗ ток в дифференциальной цепи появляется одновременно с подачей на-

пряжения. Таким образом, если дифференциальный ток отсутствует, фиксируется на один период возможность БНТ, в противном случае – внутреннее КЗ;

3) применение датчиков поля рассеяния или датчиков намагничивающего тока, структурно отстроенных от аномальных режимов БНТ и ПВ.

Перевозбуждением трансформатора называют режим, при котором амплитудное значение индукции в магнитопроводе превышает номинальную индукцию холостого хода. Причиной ПВ может быть повышение напряжения в обмотках трансформатора или понижение частоты в системе. При ПВ возрастает намагничивающий ток трансформатора, как и при БНТ, но характеристики тока, важные для релейной защиты, при ПВ не зависят от момента возникновения аномального режима.

Количественно величина перевозбуждения характеризуется кратностью перевозбуждения:

$$B_m = \frac{U f_n}{U_n f},$$

где B_m – максимальная индукция в магнитопроводе;

U – напряжение обмотки;

U_n – номинальное напряжение трансформатора;

f – частота напряжения;

f_n – номинальная частота системы.

Таким образом, ПВ может приводить к насыщению магнитопровода в целом или его отдельных участков. При индукциях в магнитопроводе $B_m > 1,9 - 2,0$ Тл начинается быстрый рост намагничивающего тока и деформация магнитного поля вне магнитопровода. Токи намагничивания трансформатора при ПВ воздействуют на дифференциальную защиту как ток внутреннего повреждения, что может приводить к ложному срабатыванию защиты без выдержки времени. В связи с этим необходимо предусматривать специальные ИО, обеспечивающие блокировку или загроубление этих ступеней дифференциальной защиты.

Режим ПВ отличается от режима БНТ тем, что насыщение трансформатора происходит в оба полупериода, т. е. рабочий участок кривой намагничивания симметричен, и ток является периодическим, в котором отсутствуют постоянные составляющие и четные гармоники. Для выявления режима ПВ могут быть использованы различные способы:

1) контроль одного линейного или фазного напряжений;

2) контроль токов, когда факт перевозбуждения определяется по величине пятой гармонической составляющей, так как режим ПВ характеризуется наличием нечетных гармоник. Поэтому третья и пятая гармоники подходят для определения этого явления. Но поскольку в силовом трансформаторе третья гармоника часто исключается (например, благодаря обмотке собранной по схеме треугольника), в основном используется пятая гармоника;

3) использование датчиков поля на поверхности магнитопровода трансформатора.

В современных микропроцессорных устройствах защиты ПВ определяется или по величине пятой гармоники или по отношению $\frac{U}{f}$.

При контроле ПВ по пятой гармонике необходимо учитывать схемы соединений трехфазных групп трансформаторов тока. При соединении ТА по схеме «звезда – звезда» вторичные токи в плечах дифференциальной защиты будут пропорциональны намагничивающим токам фаз трансформатора. При соединении вторичных обмоток ТА по схеме «треугольник» токи в плечах защиты будут пропорциональны разностям на-

магничивающих токов соответствующих фаз трансформатора, что приводит к изменению гармонического состава токов.

При выявлении факта ПВ по отношению $\frac{U}{f}$ необходимо оценить влияние следующих факторов: режим заземления нейтрали трансформатора; возможность контроля одного или всех линейных напряжений со стороны низшего напряжения трансформатора; целесообразность выполнения ИО от перевозбуждения односистемным.

Отстройка от режима ПВ может производиться на основе анализа кривой дифференциального тока: торможением от 3-й, 5-й и 7-й гармоники или по времени импульсному принципу.

Аналитические методы расчета режимов БНТ и ПВ отличаются высокой сложностью и трудоемкостью. Поэтому для сравнительного анализа и оптимизации характеристик цифровых защит целесообразно использовать методы вычислительного эксперимента на базе комплексных математических моделей, реализованных на ПЭВМ.

Для учета всех влияющих факторов необходимо, чтобы комплексная математическая модель включала не только математическую модель защищаемого объекта и измерительных трансформаторов, но и самой цифровой защиты.

В качестве основного математического аппарата модели используются дифференциальные уравнения, составленные на базе известных физических законов и решаемые численными методами. В основе математической модели целесообразно использовать физический и информационный подход. Физический базируется на замене реальных элементов упрощенными электрическими схемами, для которых расчет производится с помощью законов Кирхгофа. При информационном подходе описывается лишь преобразование входного сигнала в выходной, без отражения внутренних физических процессов и законов.

Литература

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Засыпкин, А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Овчаренко, Н.И., Дьяков, А.Ф. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Издательство МЭИ, 2000.
4. Линт, М.Г., Фурашов, В.С. Дифференциальные токовые защиты элементов энергосистем с применением цифровой техники. – М.: Информэлектро, 1990.
5. Романюк, Ф.А., Новащ, В.И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998.

УДК 621.315

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПЛЯСКИ ОДИНОЧНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

Дерюгина Е.А.

Научный руководитель – **КЛИМКОВИЧ П.И.**

Воздушные ЛЭП являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем. Серьезной проблемой их эксплуатации являются колебания проводов различных видов, один из которых – пляска проводов. Физическая сущность пляски заключается в аэродинамической неустойчивости сечения провода, покрытого ассиметричным гололедным осадком. Пляска относится к низкочастотным видам колебаний 0,15–1,0 Гц и характеризуется значительными амплитудами. В результате пляски происходят замыка-