

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ДО НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА И КОРРЕКЦИИ ИХ ВТОРИЧНОГО ТОКА

В.Ю. Татарин

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ2Н*

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Сбои в работе устройств релейной защиты в основном вызваны насыщением трансформатора тока (ТТ), что приводит к искажениям при измерениях тока и нарушениям в системах защиты энергосистемы. В работе рассмотрены способы расчета времени до насыщения ТТ, которые предназначены для обеспечения соответствия технических характеристик ТТ и подключаемых к нему устройств релейной защиты требованиям государственного стандарта Российской Федерации в данной области, согласно которому эти устройства должны гарантировать корректную работу устройств релейной защиты при коротких замыканиях (КЗ), включая случаи возникновения значительной апериодической составляющей тока. Также проанализированы способы коррекции вторичного тока при насыщении ТТ. Для решения данной задачи может использоваться алгоритм машинного обучения, который позволяет определить оптимальные параметры коррекции вторичного тока для каждого конкретного случая. Для этого необходимо иметь набор данных, на основе которых обучается модель машинного обучения, которая позволяет предсказывать оптимальные значения параметров коррекции вторичного тока в зависимости от текущего состояния ТТ и его нагрузки.

Методы расчета времени до насыщения ТТ

Насыщение ТТ искажает форму сигнала в измеряемом вторичном токе, что изначально приводит к неправильному измерению тока и приводит к неисправности защитных устройств. Чтобы оборудование не получило больших повреждений из-за насыщения ТТ, требуется правильный и точный расчет времени до насыщения, который является важным этапом проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем.

Способы расчета времени до насыщения регламентированы ГОСТ Р 58669–2019 [2]. Стандарт необходим при выборе подходящих типов ТТ при новом строительстве, реконструкции и техническом перевооружении объектов электроэнергетики, а также для выбора устройств релейной защиты, при создании новых или модернизации существующих устройств релейной защиты на существующих ТТ. Методы также используются для проверки правильности функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах при КЗ на существующих ТТ.

В стандарте рассматривается четыре основных метода определения времени до насыщения ТТ:

- аналитический;
- по паспортным данным;
- с использованием вольтамперной характеристики (ВАХ) ТТ;
- с использованием характеристики намагничивания ТТ.

Аналитический метод основан на расчёте параметров ТТ по его основным характеристикам (п. 4.2.1 [2]), расчет производится как при отсутствии сердечника ТТ остаточной намагниченности (п. 5.1.4 [2]), так и при их наличии (п. 5.1.5 [2]).

Метод по паспортным данным для установления времени насыщения необходимо определить графически в соответствии с характеристиками (приложении Б [2]), а для выбора универсальных характеристик необходимо рассчитать косинус угла сопротивления ветви вторичной нагрузки ТТ, затем определяется время до насыщения ТТ, для этого на оси коэффи-

циента переходного режима необходимо отложить значения параметра режима А, т. е. отношение потокосцепления насыщения к амплитуде потокосцепления, созданного периодической составляющей тока КЗ с учетом или без учета коэффициента остаточной намагниченности сердечника ТТ и на построенных характеристиках коэффициента переходного режима, определяются соответствующие им значения времени до насыщения.

Способ с использованием ВАХ позволяет определить время до насыщения при различных значениях напряжения и тока при этом следует учитывать исходные данные п. 4.2.1 [2]).

Метод с использованием характеристики намагничивания определяют графически, как и с методом паспортных данных, отличие состоит в том, что в данном методе нужно учитывать характеристику намагничивания ТТ, число витков на вторичной обмотке ТТ, поперечное сечение ТТ и среднюю длину линии (п. 5.4.1 [2]).

Также существуют способы расчета времени до насыщения измерительных трансформаторов вне стандарта с использованием кусочно-линейной аппроксимации средней кривой намагничивания [3] и методом построения моделей ТТ в комплексных программных обеспечениях RTDS и RSCAD [4]. Данный способ хорош тем, что модели могут быть использованы для определения времени насыщения с учётом реальных характеристик электромагнитных ТТ, остаточной намагниченности, кратности тока КЗ и т. д.

Коррекция вторичного тока на основе машинного обучения

В последнее время машинное обучение стало популярным методом для решения различных задач в электроэнергетике. Оно позволяет автоматически находить закономерности в данных и строить прогнозные модели. Для решения задачи коррекции вторичного тока на основе машинного обучения можно использовать алгоритмы регрессии или нейронные сети.

Процесс коррекции вторичного тока на основе машинного обучения обычно начинается со сбора данных о работе трансформатора тока. Затем данные обрабатываются и подготавливаются для обучения модели. После этого модель обучается на этих данных и используется для прогнозирования вторичного тока в режиме реального времени.

Существует масса разработок по данному направлению. Коллективом ученых из Белорусского национального технического университета разработана на базе программного комплекса MATLAB Simulink искусственная нейронная сеть для коррекции искаженной формы вторичного тока [6]. В статье представлен алгоритм восстановления, который основан на использовании искусственных нейронных сетей. Авторы описывают структуру и архитектуру нейронной сети, которую они используют в своей работе, т. е. метод обратного распространения ошибки для настройки весов нейронов (коэффициентов и смещений) сети таким образом, чтобы минимизировать ошибку между предсказанными значениями и фактическими данными. После обучения нейронной сети авторы проводят ее тестирование на новых данных, чтобы комплексно оценить ее точность и эффективность. Если результаты удовлетворительны, то нейронная сеть может быть использована для восстановления искаженной формы вторичного тока в реальном времени.

Коллективом из факультета электротехники университета Мёнджи (Южная Корея) также представлена работа по быстрому определению насыщения трансформатора тока с помощью встроенных автоэнкодеров для подавления шума [7]. Статья содержит описание проблемы перегрузки трансформатора тока и ее важности для безопасности и эффективности электроэнергетических систем. Затем авторы переходят к описанию алгоритма обнаружения, который основан на использовании свёрточных автоэнкодеров. Свёрточные автоэнкодеры – это тип искусственных нейронных сетей с глубоким обучением, которые хорошо подходят для обработки разного вида «шума». Они состоят из нескольких слоев, включая свёрточные слои, слои пулинга и полносвязные слои. Каждый слой выполняет определенные операции над входными данными, что позволяет сети автоматически извлекать признаки из входных

данных. В данной статье авторы используют свёрточные автоэнкодеры для обнаружения перегрузки трансформатора тока. Они подают на вход сети набор изображений, полученных с помощью токоизмерительных приборов, и используют функцию потерь для обучения сети находить перегрузку. После того, как сеть была обучена на новых данных, авторы проводят тестирование сети на программном комплексе моделирования энергосистем PSCAD/EMTDC, чтобы оценить ее точность и эффективность. Если результаты удовлетворительны, то сеть может быть использована для обнаружения перегрузки трансформатора тока в реальном времени.

В России коллектив из Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина также разработал и исследовал способы восстановления вторичного тока электромагнитных измерительных трансформаторов с использованием искусственных нейронных сетей и имитационных моделей [8]. Работа содержит описание метода восстановления вторичного сигнала с использованием эксплуатационных характеристик электромагнитного ТТ.

Заключение

В статье описаны эффективные методы расчета времени до насыщения ТТ и восстановления искаженного вторичного тока.

Как показывает практика, проведение расчётов по ГОСТ Р 58669–2019 является трудоёмкой операцией и требуется участие квалифицированных специалистов, владеющих методикой расчёта времени насыщения по стандарту, производительнее будет использовать комплексные ПО для обеспечения надежной и продуктивной работы.

Преимущества использования машинного обучения для коррекции вторичного тока включают высокую точность прогнозирования, возможность адаптации к изменяющимся условиям работы трансформатора тока и возможность обработки больших объемов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технологического функционирования электроэнергетических систем. Постановление Правительство РФ от 13 августа 2018 года № 937, п. 128.
2. ГОСТ Р 58669–2019. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях – М.: Стандартинформ, 2020.
3. Метод расчета времени до насыщения трансформатора тока с использованием кусочно-линейной аппроксимации средней кривой намагничивания / В.П. Будовский, В.С. Воробьев, А.Н. Иванченко, В.В. Москаленко, А.И. Рашепляев, А.Д. Рыбалкин // Известия НТЦ ЕЭС. Техника электрического регулирования. – 2021. – С. 20–31.
4. Яблоков А.А., Филатова Г.А., Петров А.Е., Батманов М.Р. Экспериментальное получение характеристик для разработки моделей трансформаторов тока и определения времени до насыщения магнитопровода // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 279–280.
5. Примеры выполнения расчетов времени до насыщения трансформаторов тока // Е-Досье, 2015–2023. URL: https://e-ecolog.ru/docs/qfqJ8BpBzUyWm_kBWZoU/497?ysclid=loqosr13lt129232438 (дата обращения 04.11.2023).
6. Разработка в Matlab-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока / Ю.В. Румянцев, Ф.А. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2021. – С. 479–491.
7. Fast Detection of Current Transformer Saturation Using Stacked Denoising Autoencoders, Republic of Korea/ Sophear Key, Chang-Sung Ko, Kwang-Jae Song and Soon-Ryul Nam // MDPI Journal, Energies. – 2023. – Vol. 16, Iss. 3.
8. Разработка и исследование методов восстановления вторичного тока электромагнитных измерительных трансформаторов с использованием нейросетей и имитационных моделей / А.А. Яблоков, А.Р. Тычкин, В.А. Титов, А.Е. Евдаков // Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. – С. 360–363.