

ВСЕРЕЖИМНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ В ЦЕЛЯХ ИХ УТОЧНЕННОЙ НАСТРОЙКИ

Гордиенко И.С.

Научный руководитель: Гусев А.С., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ivangs87@mail.ru

В виду сложности и быстротечности протекающих в электроэнергетических системах (ЭЭС) процессов, надежность и эффективность функционирования ЭЭС, в значительной мере определяется правильностью работы средств релейной защиты и автоматики (РЗА). Согласно статистике причин аварийности ЭЭС существенная часть системных аварий происходит из-за несрабатывания или ложного срабатывания РЗА. Основной причиной неверных действий РЗА является их неправильная настройка, обусловленная двумя факторами: 1) недостаточно достоверное определение режимных величин; 2) обобщенный учет погрешностей, определяемых процессами в измерительных трансформаторах (ИТ) и РЗА, в различных режимах функционирования ЭЭС. Для минимизации перечисленных факторов, в связи с недопустимостью в большинстве случаев проведения натурных экспериментов в ЭЭС, актуально моделирование ЭЭС, в том числе РЗА, процессы в которых тесно взаимосвязаны, особенно в аварийных и послеаварийных режимах работы. Однако в результате анализа наиболее распространенных программ моделирования ЭЭС определено, что неизбежно применяются упрощения математических моделей электротехнического, энергетического оборудования и линий электропередач (ЛЭП), а РЗА, как правило, учитываются лишь алгоритмически. Причина такого подхода связана с возможностями методов численного интегрирования дифференциальных уравнений, ограничивающих жесткость и дифференциальный порядок совокупной модели ЭЭС, которые, даже без учета РЗА, оказываются весьма высокими.

С появлением средств моделирования ЭЭС, таких как ВМК РВ ЭЭС [1], позволяющих достоверно определять режимные величины, становится актуальной задача разработки математических моделей средств РЗА с учетом конкретных реализаций и ИТ в целях их уточненной настройки.

В рамках данной работы представлены результаты всережимного моделирования дистанционных защит (ДЗ), в частности распространенной ДЗ типа ШДЭ-2801. Актуальность моделирования ДЗ обусловлена широким применением дистанционного принципа при реализации РЗ ЛЭП, резервных защит генераторов и трансформаторов, устройств автоматического прекращения асинхронного хода, защит генераторов от потери синхронизма и др.

Кроме того, ДЗ, в отличие от прочих защит, имеют достаточно сложные характеристики срабатывания (ХС), а применяемые методики расчета уставок ДЗ, не всегда обеспечивают правильность их выбора и настройки в сложных режимных условиях. Поэтому для адекватной настройки ДЗ нередко необходим дополнительный анализ их функционирования в конкретных режимах ЭЭС и соответствующая корректировка уставок.

Предлагаемый подход всережимного моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ позволит существенно повысить полноту и достоверность их настройки.

Всережимная математическая модель ДЗ ШДЭ-2801 (далее – модель ДЗ) разработана в соответствии с приведенной в [2] методикой, включающей следующие этапы: формирование адекватных схем замещения моделируемых ИТ и функциональных элементов ДЗ для получения их передаточных функций (ПФ), конвертирование полученных ПФ в дифференциальные уравнения (ДУ), программная реализация синтезированных математических моделей.

Разработанная модель ДЗ представляет совокупность математических моделей измерительных трансформаторов тока (ИТТ), напряжения (ИТН), промежуточных трансформатора тока (ПТН) и напряжения (ПТН), схемы формирования сравниваемых величин (ФСВ), блока памяти (БП), формирователя импульсов несовпадения (ФИН), реагирующих органов первого и второго вида (РО1 и РО2), реле времени (РВ). Модель ДЗ описывается следующей системой уравнений:

$$-A_2 \cdot \frac{d^2 i_{\text{вых}}(t)}{dt} - B_2 \cdot \frac{di_{\text{вых}}(t)}{dt} + B_1 \cdot \frac{di_{\text{вх}}(t)}{dt} - C_2 \cdot i_{\text{вых}}(t) = 0,$$

$$L_{\text{нам}} = f(i_{\text{нам}}),$$

$$A_2 = f(k, L_1, L_2, L_{\text{нам}}), B_1 = f(L_{\text{нам}}),$$

$$B_2 = f(k, R_1, R_2, L_1, L_2, L_{\text{нам}}, Y_{\text{нз}}), C_2 = f(k, R_1, R_2, Y_{\text{нз}}),$$

$$i_{\text{нам}}(t) = i_{\text{вх}}(t) \cdot \frac{1}{k} - i_{\text{вых}}(t).$$

где $i_{\text{вх}}$, $i_{\text{вых}}$, $i_{\text{нам}}$ – первичный, вторичный и ток ветви намагничивания ИТТ;

R_1, R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмотки ИТТ;

$L_1, L_2, L_{\text{нам}}$ – индуктивности первичной и вторичной обмотки, ветви намагничивания ИТТ;

$Y_{нз}$ – комплексная проводимость нагрузки;
 k – коэффициент трансформации ИТТ;
 A_2, B_1, B_2, C_2 и т.п. – величины, являющиеся функциями параметров схемы замещения, здесь и в других уравнениях введены для компактности их записи.

$$-A_2 \cdot \frac{d^2 u_{\text{вых}}(t)}{dt} + B_1 \cdot \frac{du_{\text{ex}}(t)}{dt} - B_2 \cdot \frac{du_{\text{вых}}(t)}{dt} - C_2 \cdot u_{\text{вых}}(t) = 0,$$

$$L_{\text{нам}} = f(i_{\text{нам}}),$$

$$i_{\text{нам}}(t) = u_{\text{ex}}(t) \cdot k \cdot Y_{W1} - u_{\text{вых}}(t) \cdot (Y_{W2} + Y_{нз}).$$

где $u_{\text{ex}}, u_{\text{вых}}$ – первичное и вторичное напряжение ИТН;

Y_{W1}, Y_{W2} – комплексные проводимости первичной и вторичной обмоток ИТН.

Модели ПТТ и ПТН реализованы аналогично моделям ИТТ и ИТН.

$$\begin{aligned} & (A_2 + A_4) \cdot \frac{d^5 e_{II}(t)}{dt} + (B_2 + B_4) \cdot \frac{d^4 e_{II}(t)}{dt} - B_1 \cdot \frac{d^4 u_{\text{ex}2}(t)}{dt} - \\ & - B_3 \cdot \frac{d^4 u_{\text{ex}1}(t)}{dt} + (C_2 + C_4) \cdot \frac{d^3 e_{II}(t)}{dt} - C_1 \cdot \frac{d^2 u_{\text{ex}2}(t)}{dt} - \\ & - C_3 \cdot \frac{d^2 u_{\text{ex}1}(t)}{dt} + (D_2 + D_4) \cdot \frac{d^2 e_{II}(t)}{dt} - D_1 \cdot \frac{d^2 u_{\text{ex}2}(t)}{dt} - \\ & - D_3 \cdot \frac{d^2 u_{\text{ex}1}(t)}{dt} + (E_2 + E_4) \cdot \frac{de_{II}(t)}{dt} + (F_2 + F_4) \cdot e_{II}(t) = 0. \end{aligned}$$

где $u_{\text{ex}1}, u_{\text{ex}2}$ – напряжения на первом и втором входе БП;

e_{II} – напряжение на выходе БП (напряжение «подпитки»).

$$A_2 \cdot \frac{de_1(t)}{dt} - A_1 \cdot \frac{du_i(t)}{dt} + B_2 \cdot e_1(t) - K_1 \cdot u_u(t) = 0,$$

$$A_4 \cdot \frac{de_2(t)}{dt} - A_3 \cdot \frac{du_i(t)}{dt} + B_4 \cdot e_2(t) - K_1 \cdot u_u(t) = 0,$$

$$e_3(t) - e_{II}(t) - K_1 \cdot u_u(t) = 0.$$

где e_1, e_2, e_3 – формируемые при помощи ФСВ сравниваемые величины;

u_i, u_u – входные напряжения ФСВ, пропорциональные измеряемой разности токов и разности напряжений соответственно.

Модели ФСВ второй и третьей ступеней ДЗ выполнены аналогичным образом, только в ФСВ второй ступени формируется не три, а четыре сравниваемые величины и не используется напряжение «подпитки». ФИН и РВ не оказывают значительного влияния на формирование

погрешностей согласно [2], поэтому в модели ДЗ учитываются алгоритмически.

Модели PO1, PO2 описываются дифференциальными уравнениями, аналогичными вышеприведенным.

В среде MATLAB выполнена программная реализация модели ДЗ, предусматривающая возможность использования в качестве измеряемых первичных режимных величин массива мгновенных значений токов и напряжений, полученных при помощи регистраторов аварийных событий (РАС) в формате Comtrade.

В целях экспериментальной проверки, подтверждающей адекватность разработанной модели ДЗ, выполнено сравнение ее функционирования с функционированием реальной ДЗ ШДЭ-2801, зарегистрированного РАС при КЗ фаз В и С на ЛЭП 110 кВ.

Осциллограммы результатов моделирования первой ступени ДЗ ШДЭ-2801, а также фазных токов в ЛЭП, фазных напряжений ЛЭП в месте установки защиты и сигнал срабатывания первой ступени ДЗ ШДЭ-2801, записанные при помощи РАС, приведены на рисунке 1.

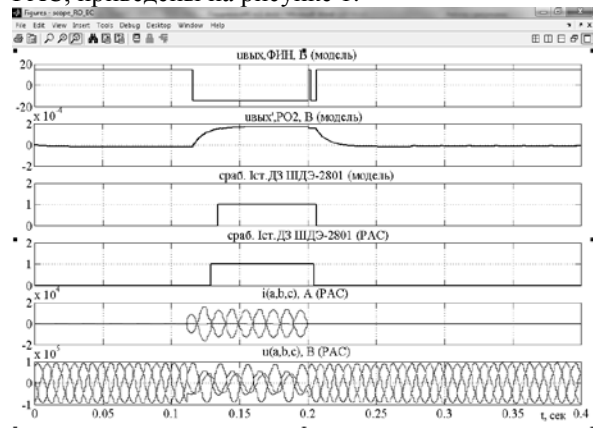


Рис.1. Осциллограммы результатов моделирования ДЗ и данные РАС

Список литературы

1. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Многопроцессорная программно-техническая система реального времени гибридного типа для всережимного моделирования энергосистем // Технологии управления режимами энергосистем XXI века: Сб. докладов Всеросс. науч.-практич. конф.-Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - С.125-131.
2. Боровиков Ю.С., Гордиенко И.С., Сулайманов А.О. Методика и средства адекватной настройки дистанционных защит. // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки, 2013. – № 2(38). – С. 145–151.