
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.925

А.А. Яблоков, Г.А. Филатова, А.Е. Петров

ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ивановский государственный энергетический университет
им. В.И. Ленина

Предложена концепция информационной системы (ИС), подключаемой к цифровым трансформаторам тока и напряжения, реализующей, в том числе, функцию дистанционного определения места повреждения (ДОМП). Приведены результаты исследования способа ДОМП на компьютерных имитационных моделях, а также результаты исследования макета ИС на комплексе моделирования RTDS. Разработка автоматического ДОМП актуальна, поскольку существующие методы ДОМП часто не обеспечивают требуемую точность и оказываются неустойчивыми к влиянию искажающих замер факторов. Инновационные цифровые малогабаритные трансформаторы тока и напряжения при установке их непосредственно на опоре линий электропередач (ЛЭП) позволяют осуществлять замер электрических величин в нормальном и аварийном режиме в промежуточных точках электрической сети, например, на границе балансовой принадлежности.

Ключевые слова: информационная система, определение места повреждения, цифровые измерительные трансформаторы.

1. Введение

Концепция Smart Grid предполагает совмещение релейной защиты с информационно-измерительными функциями [1]. Развитие микропроцессорной техники открыло возможность применения новых измерительных преобразователей тока и напряжения. К таким преобразователям относятся: пояс Роговского, магнитотранзисторный преобразователь, резистивный делитель и др. Инновационные преобразователи обладают высокой точностью измерения (погрешность не более 0,1 % по току и напряжению); широким частотным диапазоном измерений, в том числе, возможностью из-

мерения постоянного тока; отсутствием насыщения от токов КЗ и апериодической составляющей [2, 3].

Нетрадиционные первичные преобразователи совместно с устройствами оцифровки и передачи сигнала получили название «цифровые трансформаторы». Использование нетрадиционных первичных преобразователей требует разработки новых методов и алгоритмов релейной защиты и автоматики, в том числе – алгоритмов автоматического дистанционного определения мест повреждений (ДОМП). Последние должны учитывать особенности данных первичных преобразователей и цифровых трансформаторов тока и напряжения в целом (например, возможности использования производных первичных величин, первичной обработки данных непосредственно в блоках цифрового трансформатора, использование новых характеристик дифференциальных защит и т.д.)

Разработка автоматического ДОМП по-прежнему является актуальной задачей, поскольку существующие методы ДОМП зачастую не обеспечивают требуемую точность (например, из-за погрешностей первичных преобразователей), оказываются неустойчивыми к влиянию искажающих замер факторов [4-7]. Актуальной задачей является разработка методов ДОМП на линиях с односторонним питанием. Применяемые ныне методы одностороннего ДОМП, имеют, как правило, низкую точность и существенную зависимость от величины переходного сопротивления [8].

II. Предлагаемое решение

Низкие массогабаритные показатели цифровых трансформаторов с нетрадиционными первичными преобразователями тока и напряжения делают возможным монтаж измерительных устройств (информационной системы (ИС) с функциями ДОМП) на анкерных опорах линий электропередач (ЛЭП) без необходимости установки дополнительных монтажных конструкций. Установка ИС в промежуточных точках сети позволяет повысить наблюдаемость сети, а также организовать замер электрических величин не только на магистральных ЛЭП, но и на ответвлениях, что повышает точность ДОМП и устраняет «зоны неопределенности» при одностороннем замере.

В составе ИС разработан алгоритм ДОМП, осуществляющий односторонний замер расстояния до места повреждения (КЗ) по параметрам аварийного режима. Предложенный способ ДОМП предполагает использование сигналов с нетрадиционных датчиков тока и напряжения, в том числе, производных токов с поясов Роговского, входящих в состав цифровых трансформаторов.

III. Алгоритм ДОМП

Разработанный алгоритм определения места повреждения основан на одностороннем замере мгновенных значений производной тока и мгновенных значений напряжения в моменты перехода тока через нулевые значения [4, 9]. Способ отличается от аналогов физическим измерением производной тока при помощи пояса Роговского (одного из первичных преобразователей тока цифрового трансформатора). В качестве датчика тока, по которому определяются моменты перехода тока через нулевые значения, используется безиндуктивный шунт, а в качестве датчика напряжения – резистивный делитель. В алгоритме реализована интервальная оценка точности замера.

Идентификация вида КЗ осуществляется по числу поврежденных фаз, токам нулевой и обратной последовательностей. По виду КЗ определяется расчетное выражение для ДОМП, по которому выполняется вычисление индуктивности и расстояния l до места повреждения. Разработанный алгоритм ДОМП не содержит активных составляющих сопротивления (и, соответственно, падений напряжения на них) и не зависит от основного искажающего замер фактора – переходного сопротивления в месте КЗ.

IV. Методика проведения исследований алгоритма ДОМП на компьютерных моделях

Для исследования переходных процессов при повреждениях (КЗ) в программном продукте Simulink были разработаны модели электрических сетей 110-330 кВ с односторонним питанием: упрощенные и комплексные, соответствующие реальным схемам электроснабжения (рис. 1) [8]. Результатом моделирования переходных процессов являются зависимости (осциллограммы) электрических величин, зарегистрированные с моделей первичных преобразователей, установленных в точке замера (месте установки ИС).

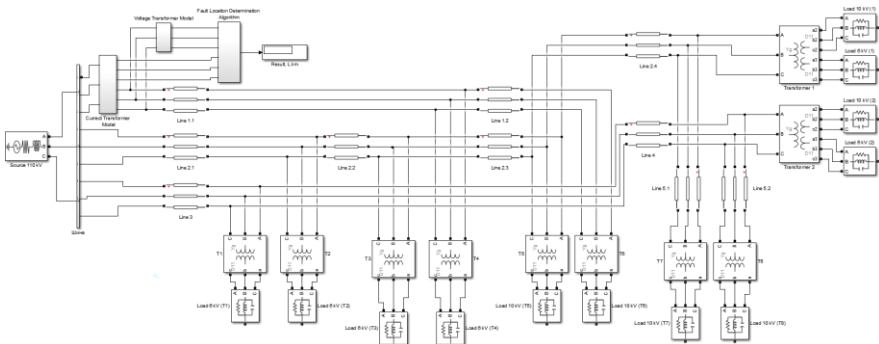


Рис. 1. Модель реального участка сети 110 кВ в Simulink

Разработана программа в MATLAB, выполняющая серию вычислительных экспериментов без участия исследователя. Программа в MATLAB работает следующим образом: при помощи специализированных функций программа выполняет задание параметров модели в Simulink, запускает расчет модели, получает мгновенные значения тока, производной тока и напряжения, выполняет их обработку согласно исследуемому алгоритму определения места повреждения, записывает результаты расчетов в массив и повторяет указанную последовательность действий для следующего набора параметров.

V. Исследование алгоритма ДОМП на имитационных моделях

Исследования были проведены для трех типов первичных преобразователей тока и следующих вариантов реализаций алгоритма (рис. 2):

- 1) первичный преобразователь тока – электромагнитный трансформатор, производная тока вычисляется математически;
- 2) не насыщающийся первичный преобразователь тока (магнитотранзисторный преобразователь, оптический трансформатор, пояс Роговского с интегрированием сигнала и др.), производная тока вычисляется математически;
- 3) первичный преобразователь тока – пояс Роговского без интегрирования сигнала.

В разработанной программе были выполнены следующие исследования работы алгоритмов определения мест повреждения: действие избирателя поврежденных фаз при различных видах КЗ; расчет индуктивности (расстояния) до места повреждения по мгновенным значениям выборок измеряемых электрических величин; оценка точности алгоритма в условиях влияния искажающих замер факторов.

Для всех видов КЗ поврежденные фазы определялись верно, в том числе, при КЗ через переходное сопротивление. Результаты оценки точности алгоритма в зависимости от изменения факторов представлены на рис. 2-6. На рис. 2 представлен результат оценки погрешности способа ДОМП для случая однофазного КЗ при различных удаленностях КЗ. Полученная зависимость погрешности от расстояния аппроксимировалась полиномом второго порядка. На рис. 3-6 представлены только аппроксимирующие кривые.

Результаты исследований вариантов организации системы определения места повреждения (рис. 2) показывают, что при физическом получении производной тока с пояса Роговского погрешность расчета расстояния до места КЗ будет наименьшей (кривая 1 на рис. 1). Погрешности электромагнитных трансформаторов возрастают при малых и при больших (при насыщении магнитопровода) первичных токах. Необходимо отметить, что приведенная оценка погрешности алгоритма ДОМП, использу-

ющего мгновенные значения тока от электромагнитного трансформатора (кривая 3), выполнена при небольшом насыщении магнитопровода трансформатора (малые значения апериодической составляющей). При глубоком насыщении магнитопровода трансформатора погрешность ДОМП составляет более 50 %.

Погрешность способа ДОМП при использовании пояса Роговского (без интегрирования сигнала) была наименьшей и при исследовании влияния других искажающих замер факторов, поэтому далее показаны результаты исследований погрешностей только указанного способа.

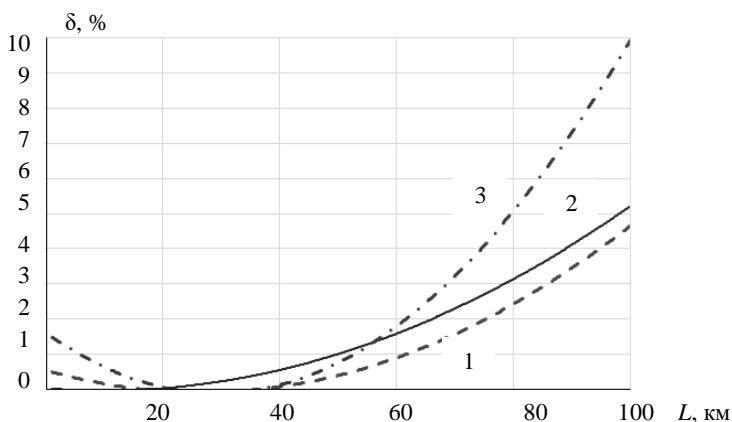


Рис. 2. Погрешность способа ДОМП от удаленности КЗ (аппроксимация замеров полиномом второго порядка) при использовании в качестве первичных датчиков тока:

- 1 – пояса Роговского для получения производной тока и безиндуктивного шунта;
- 2 – не насыщаемого датчика тока с последующим дифференцированием;
- 3 – электромагнитного ТТ с последующим дифференцированием

На рис. 3-6 представлены зависимости погрешностей способа ДОМП при изменяющихся значениях переходного сопротивления, фазы пробоя и электрической нагрузки на примере расчета расстояния до места однофазного КЗ А0. Переходное сопротивление (рис. 3-4) моделировалось двумя способами: во-первых, активным сопротивлением в месте повреждения (до 50 Ом [9]); во-вторых, дугой, представленной двумя противо-ЭДС (U_{arc}). При изменениях переходного сопротивления погрешность способа не превышает 7 или 2 % в зависимости от модели переходного сопротивления. Фаза напряжения на поврежденной фазе, изменение нагрузки и наличие емкостей фаз на землю не оказывают значительного влияния на точность измерения (рис. 5, 6). На рис. 6 нагрузка показана в процентах от нагрузки данной линии в нормальном режиме.

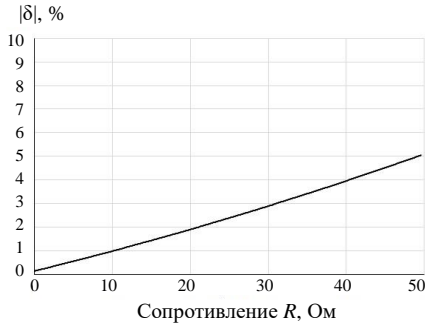


Рис. 3. Погрешность способа ДОМП от переходного сопротивления (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

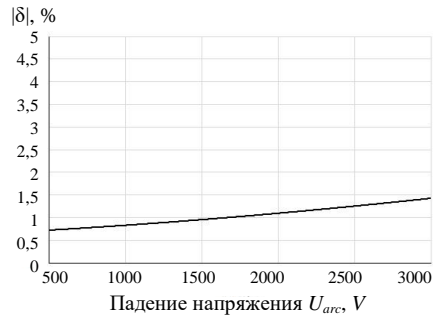


Рис. 4. Погрешность способа ДОМП от падения напряжения на дуге в месте КЗ (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

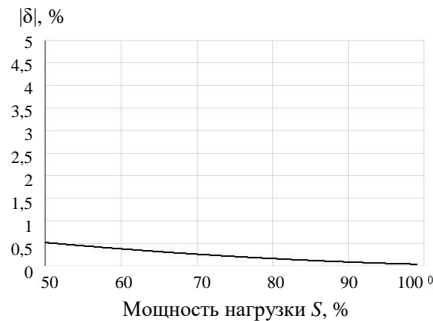


Рис. 5. Погрешность способа ДОМП от изменения нагрузки (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

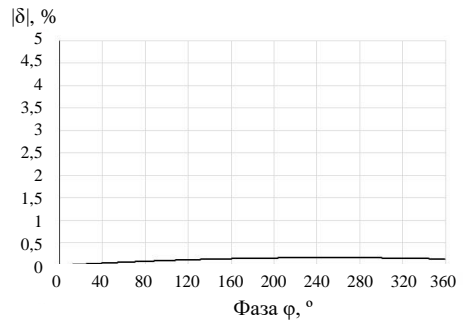


Рис. 6. Погрешность способа ДОМП от фазы пробоя (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

VI. Исследование макетного образца ИС с функцией ДОМП

Была проведена оценка работы алгоритма при моделировании переходных процессов в среде RSCAD и выдачи SV-потока первичных сигналов с платы GTNETx2-SV-v6 комплекса моделирования RTDS непосредственно в режиме реального времени. Программа испытаний (диапазон изменения искажающих замер факторов) была аналогична той, что указана в предыдущем пункте.

При моделировании переходных процессов в RSCAD и подаче сигналов первичных величин непосредственно на ИС погрешности способа ДОМП получились сопоставимыми с погрешностями, полученными в предыдущих опытах. Точность способа не зависит от величины переходного сопротивления, величины электрической нагрузки и угла пробоя. При изменении указанных факторов для одной удаленности КЗ погрешность не превышает 1-2 %. Наибольшее влияние на точность ДОМП оказывает удаленность КЗ. При удаленности 100 км от точки замера погрешность может составить 8 %.

Была проведена оценка работы других устройств (функций) ДОМП отечественного производства, в том числе, работающих по протоколу МЭК-61850 (Устройство 1 – Релематика), по программам испытаний, описанных в предыдущих пунктах. Алгоритмы ДОМП производителями не раскрываются.

Устройство 1 (с шиной процесса) содержит функцию ДОМП одностороннего замера. При подаче Comtrade-осциллограмм в виде SV -потока были получены погрешности ДОМП не более 10 %. Однако при больших переходных сопротивлениях (50 Ом), расстояние определено не было. Устройство 2 (Сириус ОМП) является отдельным устройством одностороннего или (при наличии канала связи) двухстороннего замера. При проверке устройства Comtrade-осциллограммы воспроизводились поверочным устройством Omicron-356 СМС. При подаче токов и напряжений на устройство были получены погрешности ДОМП не более 10 %. Однако, при удаленности 10 км расстояние определено не было.

Исследования алгоритма ДОМП показали устойчивость его функционирования и приемлемую точность, в том числе при влиянии основного искажающего замер фактора – переходного сопротивления. При испытаниях ИС точность алгоритма оказалась сопоставимой с точностью алгоритмов других устройств (погрешность не более 8 %), не было выявлено случаев сбоя работы или отсутствия расчета (в отличие от испытываемых образцов других фирм).

Исследование выполнено в Ивановском государственном энергетическом университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10455).

© Яблоков А.А., 2019

© Филатова Г.А., 2019

© Петров А.Е., 2019

Библиографический список

- [1] Csanii E. What is the digital substation and what makes it digital? // Electrical Engineering Portal. [Электронный ресурс]. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation> (дата обращения 23.08.2019).
- [2] Richards S., Pavaiya N., Boucherit M., Ferret P., Diemer P. Denmark digital substations: Feedback on site experience [Электронный ресурс]. URL: https://www.pacw.org/issue/june_2014_issue/lessons_learned/digital_substations_feedback_on_site_experience/complete_article/1.html (дата обращения 23.08.2019).
- [3] Lebedev V.D., Yablokov A.A. Studies in electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 177. 012099. P. 1-9.
- [4] Кувшинов Г.Е., Соловьев Д.Б. Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики. Владивосток: Владивостокский филиал Российской таможенной академии, 2012. – 316 с.
- [5] Yablokov A., Filatova G., Timofeev A. Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location // Proc. of MATEC Web Conf. 2017. № 141. 01058. P. 1-5.
- [6] Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16-21.
- [7] Stojcevski B., Kalam A. Fault location in overhead power lines using the IEC61850 international protocol // International Review on Modelling and Simulations (IREMOS.). 2010. № 3 (5). P. 888-899.
- [8] Козлов В.Н., Бычков Ю.В., Ермаков К.И. О точности современных устройств ОМП // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 1. С. 42-46.
- [9] СТО 56947007-29.240.55.224-2016. Методические указания по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Введ. 2016-08-17. ПАО «ФСК ЕЭС», 2016. – 75 с.
- [10] Яблоков А.А., Тимофеев А.С., Филатова Г.А. Разработка алгоритма дистанционного определения места повреждения на основе данных от цифровых трансформаторов тока и напряжения // Кибернетика энергетических систем: сборник мат. XL научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования», Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), Россия, 2018. С. 443-447.

A.A. Yablokov, G.A. Filatova, A.E. Petrov

RESEARCH OF FAULT LOCATION FUNCTION IN COMPOSITION OF INFORMATION SYSTEM

Ivanovo State Power University n.a. V.I. Lenin
Ivanovo, Russia

Abstract. The development of remote fault location (RFL) is still an urgent task, since the existing RFL methods often do not provide the required accuracy, are unstable to the influence of measurement-distorting factors. Innovative digital small-sized current and voltage transformers, installed directly on a power transmission line support, make possible to measure electrical values in the normal and emergency mode at intermediate points of the electrical network, for example, at the border of balance accessories. The concept of an information system (IS) connected to digital current and voltage transformers with the function of remote fault location (RFL) is proposed. The results of the study of the RFL method on the computer-assisted simulation models, as well as the results of the study of the IS device at the RTDS simulation complex are given.

Keywords: digital instrument transformers, fault location, information system.

References

- [1] E. Csanyi, What is the digital substation and what makes it digital? // Electrical Engineering Portal [Online]. Available at: <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation>. [Accessed: Aug. 23, 2019].
- [2] S. Richards, N. Pavaiya, M. Boucherit, P. Ferret and P. Diemer, Denmark digital substations: Feedback on site experience [Online]. Available at: https://www.pacw.org/issue/june_2014_issue/lessons_learned/digital_substations_feedback_on_site_experience/complete_article/1.html. [Accessed: Aug. 23, 2019].
- [3] V.D. Lebedev and A.A. Yablokov, «Studies in electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 177, 012099, pp. 1-9, Feb. 2017.
- [4] G.E. Kuvshinov and D.B. Solovyov, *Sovremennye napravleniya razvitiya izmeritel'nykh preobrazovatelej toka dlya relejnoj zashchity i avtomatiki (Modern directions of the development of the measuring current converters for relay protection and automatics)*. Vladivostok: Vladivostok Branch of the Russian Customs Academy, 2012 (in Russian).
- [5] A. Yablokov, G. Filatova and A. Timofeev, «Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location», in proc. *MATEC Web Conf.*, vol. 141, 01058, pp. 1-5, Dec. 2017.
- [6] A.L. Kulikov and I.A. Lukicheva, «Fault location in power transmission lines by instantaneous values of alarm oscillograms», *Vestnik IGEU*, vol. 5, pp. 16-21, 2016 (in Russian).

-
- [7] B. Stojcevski and A. Kalam, «Fault location in overhead power lines using the IEC61850 international protocol», *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, vol. 3, no. 5, pp. 888-899, Oct. 2010.
- [8] V.N. Koslov, Y.V. Bychkov and K.I. Ermakov, «Accuracy of modern fault location technique», *Relay Protection and Automation*, vol. 1, pp. 42-46, 2016 (in Russian).
- [9] Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu mest povrezhdenij VL napryazheniem 110 kV i vyshe (Guidelines for fault location determination on overhead power lines voltage 110 kV and more). Standard of company PJSC FGC UES 56947007-29.240.55.224-2016. Introduction date: 17.08.2016 (in Russian).
- [10] A.A. Yablokov, A.S. Timofeev and G.A. Filatova, «Razrabotka algoritma distancionnogo opredeleniya mesta povrezhdeniya na osnove dannyh ot cifrovyyh transformatorov toka i napryazheniya (Development of the remote fault location algorithm based on the data from digital current and voltage transformers)», in proc. *Kibernetika ehnergeticheskikh system (Cybernetics of power systems)*, 2018, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherskassk, Russia, 2018, pp. 443-447 (in Russian).