

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

УДК 621. 311

© Сапунков М.Л., Пеленев Д.Н., Мухаметшин Р.И., 2013

УСТРОЙСТВО АДАПТИВНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

М.Л. Сапунков, Д.Н. Пеленев*, Р.И. Мухаметшин**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург, Россия

**ЗАО «НИПО», Пермь, Россия

Многие известные токовые защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) оказываются неработоспособными, если замыкание фазы на землю происходит через переходное сопротивление. Причиной является понижение напряжения нулевой последовательности и, как следствие, токов нулевой последовательности защищаемых линий, в то время как уставки защит рассчитывают и выбирают по условию глухого «металлического» замыкания. Данная публикация посвящена созданию усовершенствованной токовой защиты, способной функционировать при различных видах замыкания. Задача совершенствования защиты от ОЗЗ является весьма важной для повышения надежности и безопасности электроснабжения.

Результатом работы будет создание на базе микроконтроллера устройства защиты, принцип работы которого основан на непрерывном контроле фазного напряжения и напряжения нулевой последовательности. По отношению этих величин определяется показатель неполноты замыкания на землю, который характеризует влияние переходного сопротивления в месте ОЗЗ на величину напряжения и токов нулевой последовательности. Использование показателя неполноты замыкания позволяет скорректировать величину токов нулевой последовательности, что достигается путем применения разработанного алгоритма адаптивной коррекции входных параметров защиты. В результате этого обеспечивается универсальность работы усовершенствованной токовой защиты.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, переходное сопротивление, напряжение нулевой последовательности, показатель неполноты замыкания, адаптивная коррекция входных параметров, скорректированный ток, микроконтроллер.

ADAPTIVE CURRENT PROTECTION OF ELECTRIC NETWORKS FROM THE SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULT

M.L. Sapunkov, D.N. Pelenev*, R.I. Muxametshin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

*National Mineral and Resources University, Saint-Petersburg, Russia

**JSC "NIPO", Perm, Russia

Many famous current protection against single phase-to-ground fault are inoperative if phase-to-ground fault occurs through the contact resistance. The reason is reducing residual voltage and, consequently, the zero sequence currents protected lines, while the set points are calculated and selected by the condition of the deaf "metallic" circuit. This publication is dedicated to the creation of improved overcurrent protection, capable of operating at different types of circuit. The need to improve the protection against single phase-to-ground fault is very important to improve the reliability and security of supply.

The result will be the creation of microcontroller-based protection device, the principle of which is based on continuous monitoring of phase voltage and residual voltage. In relation of these quantities determined figure incompleteness earth fault that characterizes the influence of transition resistance in the single phase-to-ground fault on the voltage and current zero sequence. Using index of incompleteness circuit allows adjusting the value of zero sequence currents, which is achieved by applying the developed algorithm of adaptive correction protection input parameters. As a result improved flexibility of overcurrent protection is achieved.

Keywords: single-phase-to-ground fault, contact resistance, residual voltage, the rate of circuit incompleteness, adaptive correction of input parameters, adjusted current, microcontroller.

Однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) является наиболее частым видом повреждений в трехфазных электрических сетях всех классов напряжения (75–90 % от общего числа электрических повреждений). В электрических сетях 6–35 кВ России, работающих, как правило, с изолированной или компенсированной нейтралью, значения токов в режиме ОЗЗ невелики, обычно они не превышают 20–30 А [1]. Однако замыкания фазы на землю в таких сетях могут привести к ряду негативных последствий [2].

На сегодняшний день в России и за рубежом применяются следующие разновидности защит от ОЗЗ [3]:

1. Защиты, измеряющие напряжение нулевой последовательности.

2. Ненаправленные защиты, регистрирующие составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности.

3. Направленные защиты, реагирующие на составляющие промышленной частоты тока и напряжения нулевой последовательности.

4. Защиты, фиксирующие «наложенный» ток с частотой, отличной от промышленной.

5. Защиты, реагирующие на высокочастотные составляющие в токе нулевой последовательности, возникающие естественным путем.

6. Защиты, реагирующие на составляющие тока и напряжения нулевой последовательности в переходном процессе ОЗЗ и др.

Наиболее распространенной в сетях 6–35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью является защита, основанная на контроле действующего значения токов нулевой последовательности линий.

В условиях эксплуатации часто возникают трудности с выбором уставок и проверкой чувствительности токовых защит нулевой последовательности на воздушных линиях электропередачи [4]. В качестве источников тока нулевой

последовательности здесь приходится использовать трехтрансформаторные фильтры, небаланс на выходе которых может быть весьма большим, что вызывает необходимость выбора большого тока срабатывания [5]. А при ОЗЗ на воздушных ЛЭП с падением провода на землю, как показали проведенные эксперименты [6], в месте замыкания могут возникать большие, порядка 5–7 кОм и более, переходные сопротивления, что приводит к значительному уменьшению напряжения и токов нулевой последовательности и снижает чувствительность защиты поврежденного присоединения.

Для оценки чувствительности защиты целесообразно ввести в рассмотрение величину, которую далее будем называть коэффициентом неполноты замыкания на землю [7]:

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_n \cdot Y_c)^2}},$$

где R_n – переходное сопротивление в месте ОЗЗ; Y_c – емкостная проводимость сети.

Величина n тесно связана с расчетным коэффициентом чувствительности защиты $K_{\text{ч}}$. Защита перестанет реагировать на ОЗЗ [8] при $n \leq \frac{1}{K_{\text{ч}}}$, где $K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности.

Например, если принять нормируемое значение коэффициента чувствительности равным 2,0, то защита будет «чувствовать» ОЗЗ с переходным сопротивлением не больше 1,3 кОм. Если же принять $K_{\text{ч}} = 1,5$, то предельное переходное сопротивление, при котором защита еще будет реагировать на ОЗЗ, составит примерно 0,7 кОм.

Как отмечалось ранее, в месте замыкания на землю переходное сопротивление может быть порядка 5–7 кОм. В таких случаях нормируемые коэффициенты чувствительности защиты не могут быть обеспечены.

Для наглядного отображения зависимости напряжения нулевой последовательности от переходного сопротивления в месте ОЗЗ на рис. 1 приведены расчетные кривые изменения относительной величины напряжения U_0^* от относительного переходного сопротивления d_n в месте замыкания на землю.

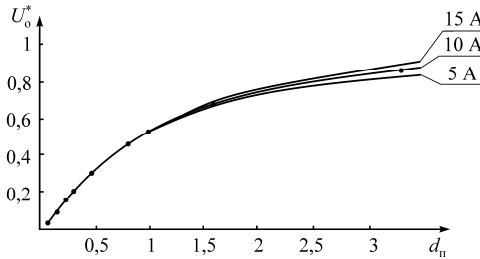


Рис. 1. Зависимости напряжения нулевой последовательности от переходного сопротивления в месте ОЗЗ

Расчеты выполнены для сети напряжением 10 кВ при различных значениях емкостного тока замыкания на землю $I_3^{(1)}$.

Вычисления основывались на формуле

$$I_3^{(1)} = 3U_{\phi} \omega C_{0\Sigma} 10^{-6},$$

где $C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фаз сети относительно земли.

$$Y_c = 3\omega C_{0\Sigma}.$$

В общем виде зависимость напряжения нулевой последовательности от переходного сопротивления выражается формулой [9]

$$\dot{U}_0 = \frac{Y_{A\Sigma} \dot{E}_A + Y_{B\Sigma} \dot{E}_B + Y_{C\Sigma} \dot{E}_C}{Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma} + Y_n},$$

где $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – комплексы ЭДС трех фаз; $Y_{A\Sigma}, Y_{B\Sigma}, Y_{C\Sigma}$ – суммарные проводимости фаз на землю; Y_n – проводимость в месте ОЗЗ.

Относительная величина напряжения нулевой последовательности определялась как

$$U_0^* = \frac{U_0}{U_{\phi}} = n.$$

Тогда, напряжение U_0 можно выразить как

$$U_0 = n \cdot U_{\phi}.$$

Величина относительного переходного сопротивления вычислялась по формуле

$$d_n = \frac{1}{3\omega \cdot C_{0\Sigma} \cdot Y_c} = \frac{g_n}{Y_c}.$$

Из анализа кривых рис. 1 и приведенных выражений следует, что напряжение нулевой последовательности существенно зависит от величины переходного сопротивления. Также от переходного сопротивления будут зависеть и токи нулевой последовательности. В связи с этим возникает необходимость в создании устройства токовой защиты, способного адаптироваться под изменяющиеся параметры сети.

Данное устройство защиты от ОЗЗ для электрических сетей с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью должно содержать на каждой линии датчик тока нулевой последовательности и связанный с ним по входу релейный орган с задаваемой уставкой на срабатывание. Блок защиты должен содержать функциональный модуль для вычисления показателя неполноты замыкания на землю. Его необходимо подключать к измерительному трансформатору напряжения. Устройство защиты каждой линии должно содержать и модуль автоматической адаптивной коррекции тока уставки на срабатывание защиты. На первый вход этого модуля поступает сигнал о токе уставки, а второй его вход соединен с выходом функционального модуля вычисления показателя неполноты замыкания на землю. Выход второго модуля соединен со вторым входом релейного органа блока.

В данном варианте исполнения устройства (рис. 2) защищаемая электрическая сеть содержит секцию шин 1 с группой присоединенных линий 2. Устройство токовой защиты электрических цепей от ОЗЗ содержит на каждой линии 2 датчик тока 3 нулевой последовательности в виде трансформатора или фильтра тока нулевой последовательности, блок защиты 4, включающий релейный орган 5 с двумя входами и с выходом, действующим на отключение поврежденной линии или «на сигнал».

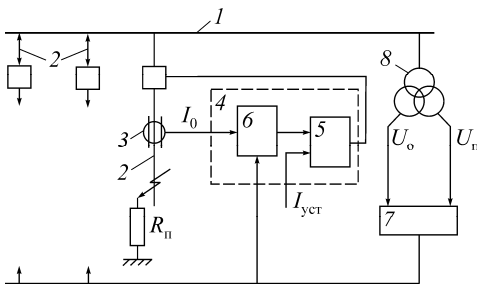


Рис. 2. Функциональная схема устройства адаптивной токовой защиты

В блок защиты 4 каждой линии введен модуль 6 для автоматической адаптивной коррекции величины сигнала о контролируемом токе нулевой последовательности линии.

В этом случае первый вход модуля 6 связан с датчиком тока 3 нулевой последовательности, а на второй его вход поступает сигнал о показателе неполноты замыкания на землю n . Модуль 6 реализует операцию деления величины сигнала о токе нулевой последовательности линии I_0 на величину показателя неполноты замыкания на землю n . На выходе модуля 6 формируется сигнал в виде скорректированного тока нулевой последовательности линии $I_{0\text{скор}} = I_0/n$. В результате такого схемного решения на первый вход релейного органа 5 блока защиты 4 поступает сигнал с модуля 6 в виде автоматически измененной (подстроенной) величины контролируемого

тока нулевой последовательности линии (с учетом неполноты замыкания), а на второй его вход поступает сигнал о фактически заданной уставке на срабатывание защиты [10].

Предлагаемая защита является более функциональной по сравнению с известными токовыми защитами от ОЗЗ, так как она работоспособна не только при глухих «металлических» замыканиях на землю, но и при неполных замыканиях через переходные сопротивления $R_n > 0$.

Для практического исполнения предлагаемого устройства защиты целесообразно применить программируемый микроконтроллер [11]. Он должен удовлетворять основным требованиям: высокое быстродействие, наличие АЦП и ЦАП, не менее трех аналоговых входов и одного аналогового выхода [12]. Для его подключения необходимы следующие устройства: трансформаторы (или фильтры) тока и напряжения нулевой последовательности, согласующие трансформаторы на входах микроконтроллера. Например, этим требованиям удовлетворяет контроллер Siemens S7-300 [13–15]. На рис. 3 приведена схема подключения устройства адаптивной защиты от ОЗЗ на примере одной линии.

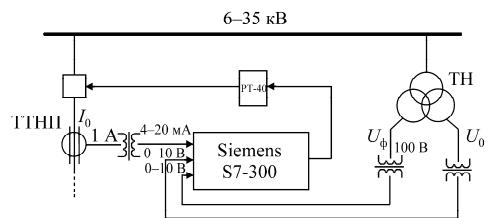


Рис. 3. Принципиальная схема подключения устройства защиты от ОЗЗ

На кафедре электрофикации и автоматизации горных предприятий ПНИПУ проводится разработка опытного образца новой защиты от ОЗЗ, которая может найти применение в электрических сетях 6–35 кВ нефтедобывающих и других предприятий.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
3. Вайнштейн Р.А., Карбышев А.Ф. Обоснование выбора тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с изолированной и заземленной через резистор нейтралью // Управление режимами электроэнергетических систем. – Новосибирск: Изд-во Нижневарт. гос. гум. ун-та, 1994. – С. 105–110.
4. Шалин А.И., Хабаров А.М. Защита от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ, реагирующая на отношение тока в резисторе к току в линии / Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докл. девятой Всерос. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2003. – Т. 1. – С. 117–120.
5. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергопресс; Энергетик, 2007. – 64 с.
6. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 73–75.
7. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
8. Вайнштейн Р.А., Головкин С.И. О гармоническом составе токов нулевой последовательности в сетях с компенсацией емкостного тока при замыкании на землю через перемежающуюся дугу // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 12. – С. 14–19.
9. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: Энергопрогресс, 2001. – 104 с.
10. Пат. 2422964 Российская Федерация / Сапунков М.Л., Худяков А.А. Оpubл. 27.06.2011, Бюл. № 18.
11. Roberts J., Altuve H.J., Schweitzer D.H. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems / Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA, 2001.
12. Lehtonen M., Hakola T. Neutral earthing and power system protection. – ABB Transmit Oy, Vaasa, 1996.
13. Waes J.B.M. van, Cobben J.F.G., Provoost F., Riet M. van, Deursen A.P.J. van, Laan P.C.T. van der. Fault Voltages in LV networks during 1-phase MV shortcircuit, On our way to a total earthing concept // 15th International Conference on Electricity Distribution, Session 2: Power Quality and EMC, CIREC Nice'99, 1–4 June 1999. – Nice, 1999. – P. 115–120.
14. Sonnemann W.K. A New Single-Phase-to-Ground Fault-Detecting Relay // AIEE Trans. – 1942. – № 61. – P. 677–680. Discussions. – P. 995–996.
15. Claudelin P. Compensation of the earth fault current in a MV distribution network. Earth fault problems in MV Systems. Helsinki: INSKO, 1991.

References

1. Lixachev F.A. Zamykaniya na zemlyu v setyax s izolirovannoj nejtral'yu i s kompensaciej emkostnyx tokov [Earth faults in isolated neutral and compensation of capacitive currents]. Moscow: E'nergiya, 1971. 152 p.
2. Capenko E.F. Zamykaniya na zemlyu v setyax 6–35 kV [Earth fault in networks 6–35 kV]. Moscow: E'nergoatomizdat, 1986. 128 p.
3. Vajnshtejn R.A., Karbyshev A.F. Obosnovanie vybora toka srabatyvaniya zashhity ot zamykanij na zemlyu v seti s izolirovannoj i zazenlennoj cherez rezistor nejtral'yu [Justification of the choice of current tripping earth fault in isolated and grounded through a resistor neutral]. *Upravlenie rezhimami e'lektroenergeticheskix sistem*. Nizhnevartovskij gosudarstvennyj gumanitarnyj universitet, 1994, pp. 105–110.
4. Shalin A.I., Xabarov A.M. Zashhita ot zamykanij na zemlyu v setyax 6–35 kV, reagiruyushhaya na otnoshenie toka v rezistore k toku v linii [Earth fault protection in networks 6–35 kV responsive to the ratio of the current in the resistor to the current line]. *Materialy dokladov devyatoj Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "E'nergetika: e'kologiya, nadezhnost', bezopasnost'"*. Tomskij politexnicheskij universitet, 2003, vol. 1, pp. 117–120.
5. Shabad M.A. Zashhita ot odnofaznyx zamykanij v setyax 6–35 kV [Protection against single-phase circuits in networks 6–35 kV]. Moscow: E'nergoatomizdat, E'nergetik, 2007. 64 p.

6. Shalin A.I. Zamykaniya na zemlyu v liniyax e'lektrperedachi 6–35 kV. Osobennosti vozniknoveniya i pribory zashhity [Earth faults in transmission lines 6–35 kV. Features appearance and protection devices]. *Novosti e'lektrotexniki*, 2005, no. 1 (31), pp. 73–75.

7. Buxtoyarov V.F., Mavricyn A.M. Zashhita ot zamykanij na zemlyu e'lektroustanovok kar'erov [Earth fault protection of electrical quarries]. Moscow: Nedra, 1986. 184 p.

8. Vajnshtejn R.A., Golovko S.I. O garmonicheskom sostave tokov nulevoj posledovatel'nosti v setyax s kompensaciej emkostnogo toka pri zamykanii na zemlyu cherez peremezhayushhuyu dugu [Harmonic composition of residual currents in networks with compensation of capacitive current ground fault through intermittent arc]. *Izvestiya vuzov. E'nergetika*, 1978, no. 12. pp. 14–19.

9. Shuin V.A., Gusenkov A.V. Zashhity ot zamykanij na zemlyu v e'lektricheskix setyax 6–10 kV [Protection against earth faults in electrical networks 6–10 kV]. Moscow: E'nergoproggress, 2001. 104 p.

10. Sapunkov M.L., Xudyakov A.A. *Patent RF No. 2422964*, 2011.

11. Roberts J., Altuve H.J., Schweitzer D.H. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems. Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA, 2011.

12. Lehtonen M., Hakola T. Neutral earthing and power system protection. ABB Transmit Oy, Vaasa, 1996.

13. Waes J.B.M. van, Cobben J.F.G., Provoost F., Riet M. van, Deursen A.P.J. van, Laan P.C.T. van der. Fault Voltages in LV networks during 1-phase MV shortcircuit. On our way to a total earthing concept. *15th International Conference on Electricity Distribution. Session 2. Power Quality and EMC, CIRED. Nice*, 1999, pp. 115–120.

14. Sonnemann W.K. A New Single-Phase-to-Ground Fault-Detecting Relay. *AIEE Trans.*, 1942, vol. 61, pp. 677–680. Discussions, pp. 995–996.

15. Claudelin P. Compensation of the earth fault current in a MV distribution network. Earth fault problems in MV Systems. Helsinki: INSKO, 1991.

Об авторах

Сапунков Михаил Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990 г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Пеленев Денис Николаевич (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, В. О., 21-я линия, 2; e-mail: Shifer-90@mail.ru).

Мухаметшин Руслан Ильсурович (Пермь, Россия) – инженер-проектировщик ЗАО «НИПО» (614022, г. Пермь, пр. Декабристов, д. 39/2, кв. 20; e-mail: ru777lan@mail.ru).

About the authors

Sapunkov Mixail Leonidovich (Perm, Russia) – candidate of technical science, professor of electrification and automation of mining companies department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29).

Pelenev Denis Nikolaevich (Saint-Petersburg, Russia) – postgraduate of electrical engineering, electricity, electromechanics department, National Mineral and Resources University (199106, Saint-Petersburg, 21st line, 2; e-mail: Shifer-90@mail.ru).

Muxametshin Ruslan I'surovich (Perm, Russia) – design engineer JSC NIPO (614022, Perm, Dekabristov ave., 39/2, ap. 20; e-mail: ru777lan@mail.ru).

Получено 28.02.2013