© Д.Н. Киселев, Ю.А. Ершов, 2016

УДК
621.311.078

Д.Н. Киселев, Ю.А. Ершов

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Разработана модель микропроцессорной защиты от замыканий на землю для работы в распределительных сетях с изолированной нейтралью. При реализации модели была задействована программа Matlab (приложение Simulink). Принцип действия модели основан на выявлении тока прямой последовательности и тока нулевой последовательности по методу симметричных составляющих, и формировании условий срабатывания защиты. Приведена методика испытания защиты. За ее основу положен созданный в программе Matlab (приложение Simulink) лабораторный стенд, представляющий собой участок электрической сети. В состав электрической сети входит эквивалентная энергосистема, линии электропередач, трансформаторы тока и напряжения, электрические нагрузки, короткозамыкатели и комплекты разработанной защиты от замыканий на землю. Получены осциллограммы испытаний представленной модели защиты от замыканий на землю.
Ключевые слова: релейная защита, моделирование, Matlab, simulink, замыкания на землю, режим реального времени, ток нулевой последовательности.

Опыт эксплуатации токовых защит от замыканий на землю в распределительных сетях открытых горных работ свидетельствует о достаточно большом проценте ложных срабатываний, основные причины которых – наличие помех, вызванных токами самозапуска мощных электродвигателей, и броски емкостного тока, возникающие в переходном режиме при глухих замыканиях на землю [1]. Кроме того, для электрических сетей с изолированной нейтралью, в которых преимущественно работают горнодобывающие предприятия, актуальна проблема надежного определения находящейся под напряжением линии, где произошло однофазное замыкание на землю.

Авторами настоящей работы разработана модель устройства токовой защиты от замыканий на землю для работы в распределительных сетях открытых горных работ, проведены исследования модели в различных режимах электрической сети и предложены способы устранения некорректного срабатывания релейной защиты.

При реализации модели была задействована программа Matlab (приложение Simulink).

Модель включает в себя следующие устройства: формирователи ортогональных составляющих тока (*ORT I*) и напряжений (*ORT U*), фильтры токов (*CF*) и напряжений (*VF*), орган тока (*KA*), орган напряжения (*KV*), сравнительные органы (*CM, DM, EM*) и исполнительный орган *START* (рис. 1).

Принцип действия модели

На входы фильтра токов (*CF*) и напряжения (*VF*) поступают дискретные значения токов и напряжений, полученные от формирователей, ортогональных составляющих тока (*ORT I*) и напряжений (*ORT U*).

Формирование ортогональных составляющих Re[I] = Ix, Im[I] = Iy, Re[U] = Ux, Im[U] = Uy производится по принципу умножения входной величины на два опорных ортогональных сигнала.

Дальнейший алгоритм работы модели состоит из двух частей: выявление симметричных составляющих и формирование условий срабатывания.

В первой части алгоритма, блок формирования последовательностей (*CF*) осуществляет линейное преобразование вход-

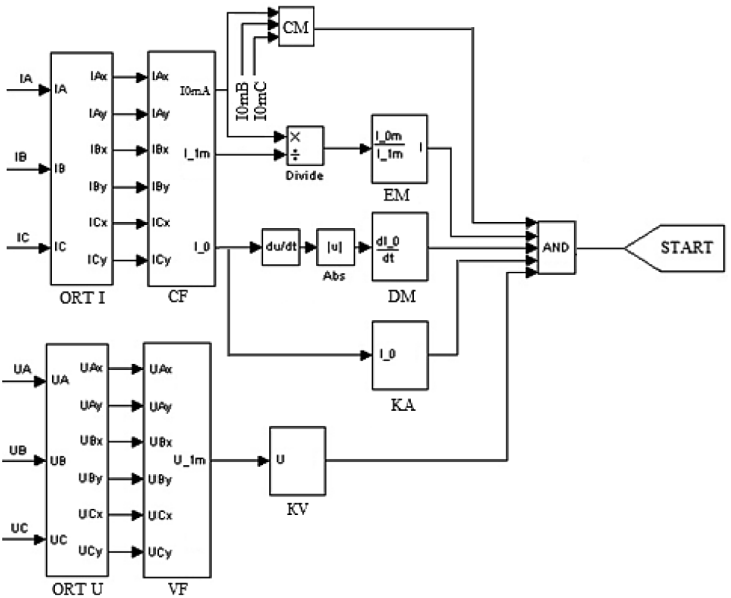

Рис. 1. Функциональная схема модели

ных токов фаз А, В, С в величины, пропорциональные симметричным составляющим трехфазной системы *I1, I2, I0*.

Получение токов прямой, обратной и нулевой последовательности производится по методу симметричных составляющих:

$$I_{A1} = \frac{1}{3} \cdot (I_A + a \cdot I_B + a^2 \cdot I_C)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3} \cdot (I_A + a^2 \cdot I_B + a \cdot I_C)$$

$$I_{A0} = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C)$$

где *a* – операторы, поворачивающие данный вектор на угол 120 градусов векторов трехфазной системы.

На выходе блока *CF* – мгновенное значение тока нулевой последовательности (*i*0), максимальные значения токов прямой последовательности *I1m* и нулевой последовательности *I0m*. На выходе блока *VF* – наименьшее из *UA, UB* и *UC* значение напряжения прямой последовательности.

Во второй части алгоритма модели *KA* производится формирование условий срабатывания модели (рис. 2):

• выявление сравнительным органом *CM* присоединения с наибольшим током нулевой последовательности (на выходе модуля логическая единица если ток нулевой последовательности рассматриваемого присоединения максимальный);

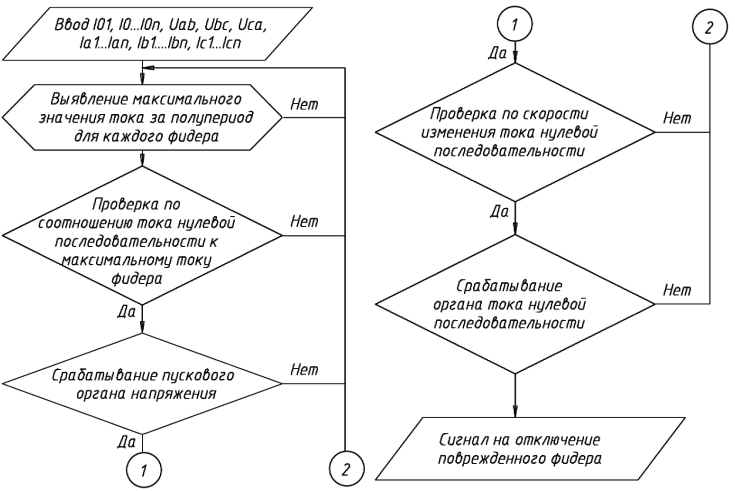

Рис. 2. Формирование условий срабатывания токовой защиты от замыканий на землю

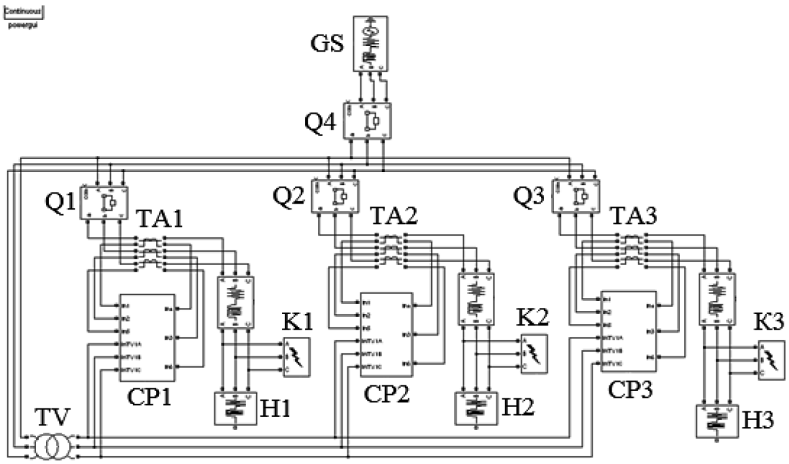

Рис. 3. Модель участка электрической сети для испытания токовой защиты от замыканий на землю

• проверка сравнительным органом *EM* соотношения тока нулевой последовательности к максимальному току фидера (для повышения чувствительности защиты);

• срабатывание пускового органа напряжения *KV* (для исключения ложного срабатывания при бросках емкостного тока);

• проверка сравнительным органом *DM* скорости изменения тока нулевой последовательности (для исключения ложного срабатывания при самозапуске электродвигателей);

• срабатывание органа тока нулевой последовательности.

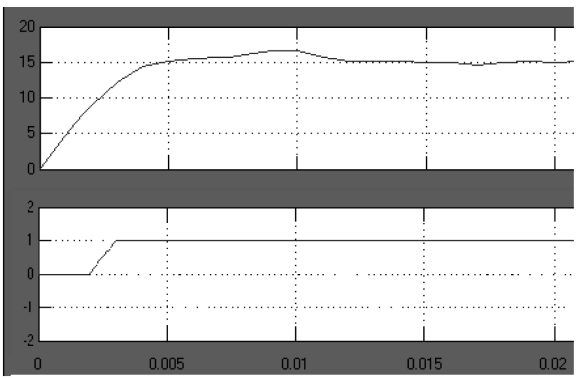

Рис. 4. Осциллограмма максимального значения тока нулевой последовательности (сверху) и срабатывания токового органа KA (снизу)

Для испытания модели в программе Simulink был создан лабораторный стенд (рис. 3), состоящий из энергосистемы *GS*, трансформаторов тока *TA1, TA2, TA3*, трансформатора напряжения *TV*, комплектов защиты от замыканий на землю *CP1, CP2, CP3*, выключателей *Q1, Q2, Q3, Q4*, нагрузок *H1, H2, H3* и короткозамыкателей *K1, K2, K3*.

Моделируемое устройство защиты подключается к трансформаторам тока *TA1, TA2, TA3* и напряжения *TV* и является индивидуальным, то есть устанавливается на каждое присоединение.

Результаты срабатывания защиты представлены в виде осциллограмм (рис. 4).

Все вычисления производятся в режиме реального времени.

Испытание модели производится в следующем порядке:

1. Задание уставок органов защиты *CP1, CP2, CP3*.
2. Запуск модели.
3. Анализ результатов испытаний в виде осциллограмм и анализ работы органов защиты путем контроля входных и выходных данных.

Данная модель позволяет исследовать возможность применения защит от замыкания на землю с разным набором функций. В зависимости от конфигурации сети можно ввести или вывести из алгоритма проверку условий срабатывания по напряжению или проверку по производной тока нулевой последовательности. Кроме того, введя в работу проверку по соотношению токов нулевой и прямой последовательностей можно получить лучшую чувствительность защиты.

Работа находит применение как в лабораторных, так и в научных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пивняк Г. Г.*, *Шкрабец Ф. П.*, *Горбунов Я. С.* Релейная защита электроустановок на открытых горных работах. – М.: Недра, 1992. – 240 с.

2. *Ершов Ю. А.*, *Киселев Д. Н.* Моделирование устройств релейной защиты в среде MATLAB. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 148 с.

3. *Андреева А. В.*, *Киселев Д. Н.* Моделирование цифровых органов тока URL: http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/5331 (дата обращения 29.12.2015).

4. *Лихачев Ф. А.* Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

5. *Черных И. В.* Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

6. *Федосеев А. М.* Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 532 с.

7. *Овчаренко Н. И.* Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем. – М.: НТФ Энергопрогресс, 2006. – 120 с.
8. *Phadke A. G.* Hidden failures in electric power systems // International Journal of Critical Infrastructures, 2004. vol. 1 №1
9. *Гуревич В. И.* Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 336 с.
10. *Horowitz S. H.*, *Phadke A. G.* Power system relaying – Chichester.: Research Studies Press Limited, 2008. – 332 p.
11. *Шнеерсон Э. М.* Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
12. *Интернет-форум* «Советы бывалого релейщика» http://rza.communityhost.ru (дата обращения 29.12.2015).
13. *Terzija V., Valverde G., Deyu Cai.* Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks // Proceedings of the IEEE, 2011, Vol. 99, No. 1 pp. 80–93.
14. *Emilson P. L.* Scientific and Engineering Applications Using MATLAB. Rijeka.: InTech, 2011. – 214 p. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ершов Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ershovyua@yandex.ru,
Киселев Дмитрий Николаевич – аспирант,
инженер, ООО «Полюс Проект», e-mail: KiselevDN@polyusgold.com,
Сибирский федеральный университет (СФУ).

UDC
621.311.078

D.N. Kiselev, Yu.A. Ershov

MICROPROCESSOR GROUND FAULT RELAY PROTECTION

The model of microprocessor-based earth fault relay protection for distribution networks with isolated neutral is developed. For computer model realisation it was used Matlab application Simulink.

The protection model algorithm allows to identify the feeder, which has the highest earth fault current, to eliminate false tripping during inrush capacitive current, to eliminate false tripping during self-start of electric motors, to disable the damaged feeder. A method of increasing sensitivity of relay protection is presented.

The protection model includes current and voltage orthogonal components formers, voltage filter, current filters, zero-sequence current relay, voltage relay, comparative module to identify the the highest earth fault current, locking module to avoid false tripping during inrush capacitive current, locking module to avoid false tripping during the self-start of electric motors, an executive module.

The model principle of operation is based on identification of zero-sequence current by the symmetrical components method and the protection tripping conditions.

The protection testing is presented. It is based on the Matlab-based programmable laboratory stand, which is representing a part of an electrical system. This system include three

phase electrical source, transmission lines, current and voltage transformers, electrical loads, shorting plug and developed earth fault relay protection.

Waveforms of the protection model testing are received. The work finds application both in laboratory and for scientific purposes.

Key words: relay protection, modelling, Matlab, simulink, earth faults, real-time mode, zero-sequence current.

AUTHORS

Kiselev D.N.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: ershovyua@yandex.ru,
Ershov Yu.A.[1], Graduate Student, Engineer,
e-mail: KiselevDN@polyusgold.com,
[1] Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia.

REFERENCES

1. Pivnyak G. G., Shkrabets F. P., Gorbunov Ya. S. *Releynaya zashchita elektroustanovok na otkrytykh gornykh rabotakh* (Relay protection for electrical devices in surface mining), Moscow, Nedra, 1992, 240 p.

2. Ershov Yu. A., Kiselev D. N. *Modelirovanie ustroystv releynoy zashchity v srede MATLAB* (Relay protection modelling in Matlab), LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 148 p.

3. Andreeva A. V., Kiselev D. N. *Modelirovanie tsifrovykh organov toka*, available at: http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/5331, 2015 (accessed 29.12.2015).

4. Likhachev F. A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* (Earth fauls in isolated neutral networks with capacitive currents compensation), Moscow, Energiya, 1971, 152 p.

5. Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* (Electrical devices modelling in Matlab, SimPowerSystems и Simulink), Moscow, DMK Press, 2008, 288 p.

6. Fedoseev A. M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* (Power system relay protection), Moscow, Energoatomizdat, 1992, 532 p.

7. Ovcharenko N. I. *Tsifrovye apparatnye i programmnye elementy mikroprotsessornoy releynoy zashchity i avtomatiki energosistem* (Digital hardware and software elements of power system relay protection and automatization), Moscow, NTF Energoprogress, 2006, 120 p.

8. Phadke A. G. Hidden failures in electric power systems. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2004, vol. 1, no 1.

9. Gurevich V. I. *Mikroprotsessornye rele zashchity. Ustroystvo, problemy, perspektivy* (Microprocessor-based relay protection. Structure, problems, prospects), Moscow, Infra-Inzheneriya, 2011, 336 p.

10. Horowitz S. H., Phadke A. G. *Power system relaying Chichester*. Research Studies Press Limited, 2008. 332 p.

11. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита (Digital relay protection), Moscow, Energoatomizdat, 2007, 549 p.

12. *Internet-forum «Sovety byvalogo releyshchika»* http://rza.communityhost.ru (accessed 29.12.2015).

13. Terzija V., Valverde G., Deyu Cai. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*, 2011, Vol. 99, No. 1 pp. 80–93.

14. Emilson P. L. *Scientific and Engineering Applications Using MATLAB*. Rijeka.: In-Tech, 2011. 214 p.