УДК 621.311.
078

Д.Н. Киселев, Ю.А. Ершов

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Разработана модель микропроцессорной токовой защиты для работы в распределительных сетях, напряжением 6-35 кВ. При реализации модели была задействована программа Matlab (приложение Simulink). Алгоритм предложенной модели защиты позволяет выявить ток короткого замыкания, исключить ложные срабатывания защиты при токах нагрузки и своевременно отключить поврежденный участок сети. Принцип действия модели основан на интерполяции входных токов суммой комплексных амплитуд с комплексной частотой, а также выявлении тока прямой, обратной и нулевой последовательности по методу симметричных составляющих, и формировании условий срабатывания защиты. Предложен способ устранения некорректного срабатывания защиты. Задачей данной работы является создание модели микропроцессорной релейной защиты от коротких замыканий, позволяющей выполнить релейную защиту при однофазных, двухфазных, двухфазных на землю, трехфазных коротких замыканиях, которая корректно работает в условиях быстропротекающих переходных процессов при коротких замыканиях.

Ключевые слова: релейная защита, моделирование, Matlab, simulink, защита от коротких замыканий, режим реального времени, ток прямой последовательности, ток обратной последовательности.

Задачей настоящего технического решения является создание модели микропроцессорной релейной защиты от коротких замыканий, позволяющей выполнить защиту при однофазных, двухфазных, двухфазных на землю, трехфазных коротких замыканиях, которая корректно работает в условиях быстропротекающих переходных процессов.

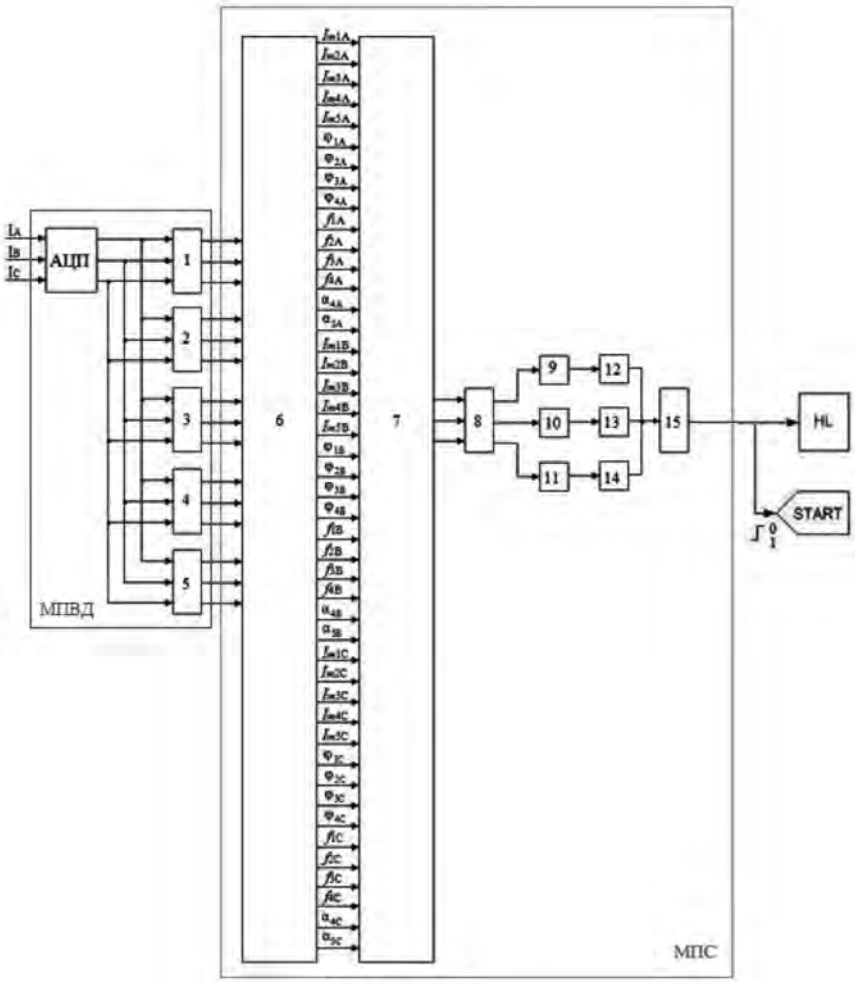
Авторами настоящей работы разработана модель устройства токовой защиты для работы в распределительных сетях 6–35 кВ, проведены исследования модели в различных режимах электрической сети и предложен способ устранения некорректного срабатывания релейной защиты.

При реализации модели была задействована программа Matlab (приложение Simulink). Функциональная схема модели представлена на рисунке.

Модель включает в себя модуль приема и обработки входных данных (МПВД), микропроцессорную систему управления вы-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 43–49.
© 2016. Д.Н. Киселев, Ю.А. Ершов.

ходными реле и сигнализацией (МПС) в соответствии с алгоритмами защиты. Блок приема и обработки входных данных состоит из блока частотных фильтров с фильтром токов нижних частот и аналого-цифрового преобразователя. Блок частотных фильтров содержит дополнительно фильтр токов промышленной частоты *1*, фильтр токов второй гармоники *2*, фильтр токов третьей гармоники *3*, полосовой фильтр токов *4*, функцией которого является формирование синусоидальных затухающих токов непромышленной частоты, причем фильтр токов нижних



Функциональная схема модели

частот *5* выполнен с возможностью формирования на выходе апериодических затухающих токов.

Принцип действия модели

В режиме симметричной нагрузки на выходе элемента *1* появляются токи промышленной частоты IA, IB, IC. На выходах элементов *2*, *3*, *4*, *5* появляются значения токов, близкие к нулю. Значения токов с выходов элементов *1–5* поступают на элемент *6*, где формируются значения I_{m1A}, I_{m2A}, I_{m3A}, I_{m4A}, I_{m5A}, φ_{1A}, φ_{2A}, φ_{3A}, φ_{4A}, f_{1A}, f_{2A}, f_{3A}, f_{4A}, α_{4A}, α_{5A}, I_{m1B}, I_{m2B}, I_{m3B}, I_{m4B}, I_{m5B}, φ_{1B}, φ_{2B}, φ_{3B}, φ_{4B}, f_{1B}, f_{2B}, f_{3B}, f_{4B}, α_{4B}, α_{5B}, I_{m1B}, I_{m2C}, I_{m3C}, I_{m4C}, I_{m5C}, φ_{1C}, φ_{2C}, φ_{3C}, φ_{4C}, f_{1C}, f_{2C}, f_{3C}, f_{4C}, α_{4C}, α_{5C}, I_{m1A}, I_{m1B}, I_{m1C}, φ_{1A}, φ_{1B}, φ_{1C}, f_{1A}, f_{1B}, f_{1C} (1), поступающие на входы элемента *7*, где осуществляется интерполяция токов фаз A, B, C. Значения векторов токов $\vec{I}_A$, $\vec{I}_B$, $\vec{I}_C$ поступают на вход элемента *8*, в котором формируется ток прямой последовательности, поступающий на вход элемента *9*, где производится его сравнение с уставкой, отстроенной от токов нагрузки, вследствие чего на выходе элемента *9* появляется логический ноль и защита не срабатывает.

В общем случае векторы токов на элементе *7* задаются с учетом токов промышленной частоты, токов второй и третьей гармоник, затухающих токов непромышленной частоты и апериодических затухающих токов:

$$\vec{I}_A = \begin{pmatrix} I_{m1A}\cos(\omega_{1A}t+\varphi_{1A}) + I_{m2A}\cos(\omega_{2A}t+\varphi_{2A}) + I_{m3A}\cos(\omega_{3A}t+\varphi_{3A}) + \\ +I_{m4A}\cos(\omega_{4A}t+\varphi_{4A})\exp(\alpha_{4A}t); \\ I_{m1A}\sin(\omega_{1A}t+\varphi_{1A}) + I_{m2A}\sin(\omega_{2A}t+\varphi_{2A}) + I_{m3A}\sin(\omega_{3A}t+\varphi_{3A}) + \\ +I_{m4A}\sin(\omega_{4A}t+\varphi_{4A})\exp(\alpha_{4A}t) + I_{m3A}\exp(\alpha_{5A}t). \end{pmatrix}$$

$$\vec{I}_A = \begin{pmatrix} I_{m1A}\cos(\omega_{1A}t+\varphi_{1A}) + I_{m2A}\cos(\omega_{2A}t+\varphi_{2A}) + I_{m3A}\cos(\omega_{3A}t+\varphi_{3A}) + \\ +I_{m4A}\cos(\omega_{4A}t+\varphi_{4A})\exp(\alpha_{4A}t); \\ I_{m1A}\sin(\omega_{1A}t+\varphi_{1A}) + I_{m2A}\sin(\omega_{2A}t+\varphi_{2A}) + I_{m3A}\sin(\omega_{3A}t+\varphi_{3A}) + \\ +I_{m4A}\sin(\omega_{4A}t+\varphi_{4A})\exp(\alpha_{4A}t) + I_{m3A}\exp(\alpha_{5A}t). \end{pmatrix}$$

$$\vec{I}_A = \begin{pmatrix} I_{m1A}\cos(\omega_{1A}t+\varphi_{1A}) + I_{m2A}\cos(\omega_{2A}t+\varphi_{2A}) + I_{m3A}\cos(\omega_{3A}t+\varphi_{3A}) + \\ +I_{m4A}\cos(\omega_{4A}t+\varphi_{4A})\exp(\alpha_{4A}t); \\ I_{m1A}\sin(\omega_{1A}t+\varphi_{1A}) + I_{m2A}\sin(\omega_{2A}t+\varphi_{2A}) + I_{m3A}\sin(\omega_{3A}t+\varphi_{3A}) + \\ +I_{m4A}\sin(\omega_{4A}t+\varphi_{4A})\exp(\alpha_{4A}t) + I_{m3A}\exp(\alpha_{5A}t). \end{pmatrix}$$

где I_m, $= 2\pi f$ и φ – амплитуда, угловая частота и начальная фаза синусоиды тока;

В режиме двухфазного КЗ на линии, на полученном интервале времени, т.е. сегменте цифровой осциллограммы тока имеются пять составляющих: синусоида с промышленной частотой (50 Гц), синусоида токов второй гармоники (100 Гц), синусоида токов третьей гармоники (150 Гц), затухающая синусоида и экспонента. Таким образом, на вход элемента *6* поступают токи промышленной частоты с выходов элемента *1*, токи второй гармоники с выходов элемента *2*, токи третьей гармоники с выходов элемента *3*, затухающие токи непромышленной частоты с выходов элемента *4*, апериодические затухающие токи с выходов элемента *5*. На выходе элемента *6* формируются значения (1), поступающие на входы элемента *7*, где осуществляется интерполяция токов фаз А, В, С. Значения векторов токов $\vec{I}_A$, $\vec{I}_B$, $\vec{I}_C$ поступают на вход элемента *8*, в котором формируется ток обратной последовательности, поступающий на вход элемента *10*, где производится его сравнение с уставкой, вследствие чего на выходе элемента *10* появляется логическая единица и защита срабатывает через выдержку времени на элементе *13*, о чем сигнализирует элемент HL.

Если КЗ трехфазное, то на входе элемента *9* образуется ток больше уставки, вследствие чего на выходе элемента *9* появляется логическая единица и защита срабатывает через выдержку времени на элементе *12*, о чем сигнализирует элемент HL.

При однофазном и двухфазном коротком замыкании на землю на вход элемента *6* поступают токи промышленной частоты с выходов элемента *1*, токи второй гармоники с выходов элемента *2*, токи третьей гармоники с выходов элемента *3*, затухающие токи непромышленной частоты с выходов элемента *4*, апериодические затухающие токи с выходов элемента *5*. На выходе элемента *6* формируются значения (1) поступающие на входы элемента *7*, где осуществляется интерполяция токов фаз А, В, С. Значения векторов токов $\vec{I}_A$, $\vec{I}_B$, $\vec{I}_C$ поступают на вход элемента *8*, в котором формируется ток нулевой последовательности, поступающий на вход элемента *11*, где производится его сравнение с уставкой, вследствие чего на выходе элемента *11* появляется логическая единица и защита срабатывает через выдержку времени на элементе *14*, о чем сигнализирует элемент HL. Все вычисления производятся в режиме реального времени.

Технико-экономическая эффективность заключается в том, что предлагаемая модель микропроцессорной токовой защиты

точнее рассчитывает токи в момент короткого замыкания в виду учета затухающих токов непромышленной частоты, апериодических затухающих токов, токов второй и третьей гармоник и как следствие адекватнее реагирует на короткие замыкания.

Устройство может использоваться при выполнении релейной защиты линий распределительной сети с односторонним питанием.

Данная модель позволяет исследовать возможность применения токовых защит с разным набором функций. В зависимости от конфигурации сети можно ввести или вывести из алгоритма учет высших гармоник. Кроме того, введя в учет высших гармоник и несинусоидальных токов можно получить лучшую чувствительность защиты при быстропротекающих переходных процессах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Emilson P. L.* Scientific and Engineering Applications Using MATLAB. Rijeka.: InTech, 2011. – 214 p.

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 10.03.2016).

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

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

6. *Овчаренко Н. И.* Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем. – М.: НТФ Энергопрогресс, 2006. – 120 с.

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

8. *Гуревич В. И.* Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 336 с.

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

10. *Шнеерсон Э. М.* Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

11. Интернет-форум «Советы бывалого релейщика», http://rza.communityhost.ru (дата обращения 29.12.2016).

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

13. *Киселев Д. Н.*, *Ершов Ю. А.* Патент РФ № 159224, 10.02.2016. Микропроцессорная релейная защита от коротких замыканий. 2016. Бюл. № 4.

14. *Журавлев Д. М.* Исследование и разработка применения векторного представления электрических величин в переходных режимах электроэнергетических систем: Дис. канд. техн. наук. канд. – М.: МЭИ, 2010. – 161 с. РИАЗ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ершов Юрий Александрович[1] – кандидат технических наук, доцент,
Киселев Дмитрий Николаевич[1] – аспирант,
e-mail: KiselevDN@polyusgold.com
[1] Сибирский федеральный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 5, pp. 43–49.

UDC 621.311.078

D.N. Kiselev, Yu.A. Ershov

MICROPROCESSOR-BASED CURRENT PROTECTION

The model of microprocessor-based current protection for distribution networks 6–35 kv is developed. For computer model realisation it was used Matlab application Simulink.

The protection model algorithm allows to identify the fault curent, to eliminate false tripping during load conditions, to disable the damaged element.

The model principle of operation is based on input current interpolation and identification of positive sequence current, negative sequence current and zero sequence current by the symmetrical components method and the protection tripping conditions. This option use complex magnitude and complex frequency in calculations. A method of false tripping elimination is presented.

The model of relay protection includes the module of input data receiving and data processing, microprocessor-based control system of output relay and alarm that operate according to working algorithm. The module of input data receiving and data processing includes the module of frequency filters and analog-to-digital converter. The module of frequency filters include current filter of mains frequency, current filter of second harmonic, current filter of third harmonic, band-pass current filter, that forms damped currents of unprofitable frequencies. The low pass filter has a possibility to form damped exponential currents.

The main purpose of this work is to design the model of microprocessor-based current protection, which can eliminate single-phase faults, double phase faults, double-phase-to-ground faults, three phase faults in electromagnetic transient conditions during short circuits.

The work finds application both in laboratory and for scientific purposes.

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

AUTHORS

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

REFERENCES

1. Emilson P.L. *Scientific and Engineering Applications Using MATLAB*. Rijeka.: InTech, 2011. 214 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 (accessed 10.03.2016).

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

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

6. 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.

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

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

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

10. Shneerson E.M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* (Digital relay protection), Moscow, Energoatomizdat, 2007, 549 p.

11. *Internet-forum «Sovety byvalogo releyshchika»*, available at: http://rza.community-host.ru (accessed 29.12.2016).

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

13. Kiselev D.N., Ershov Yu.A. *Patent RU 159224*, 10.02.2016.

14. Zhuravlev D.M. *Issledovanie i razrabotka primeneniya vektornogo predstavleniya elektricheskikh velichin v perekhodnykh rezhimakh elektroenergeticheskikh sistem* (Research and development of the use of the vector representation of electrical quantities in transitive modes of electric power systems), Candidate's thesis, Moscow, MEI, 2010, 161 p.