

Testing methods of power swing blocking functions of distance protection relays

Author

Adam Smolarczyk

Keywords

power system, power swings, power swing blocking functions, protection relays testing

Abstract

The paper describes testing of distance protection relays' power swing blocking functions (schemes). Basic and extended scopes of tests are proposed for power swing blocking functions. Test systems are proposed, and test modules of microprocessor tester software are described, which can be used for testing power swing blocking functions.

1. Introduction

Power swing blocking functions are available in most distance relays. They are designed to block the distance protection relay function's undesired responses to power swings, during which the operating impedance may enter the distance protections' response zones. Protection relay manufacturers apply power swing blocking functions that employ different methods of power swing detection. The most common power swing detection method employed by the classic blocking functions of the $Z(t)$ type is based on measurement of the rate of operating impedance change between the function's inner and outer zones. Power swing blocking function types applied by selected protection relay manufacturers are summarized in [1, 2] and papers [3, 4] describe the power swing detection methods they employ.

A power swing blocking function's response should be blocked (the feature should be disabled) at an internal (symmetrical or unsymmetrical) fault occurring during power swings to allow its elimination by the distance protection function. In addition, in some cases a power swing blocking function may not react properly. A blocking function's malfunction means its missing or unnecessary activation in a given situation. Selected situations and factors, to which a power swing blocking function may respond improperly, are summarized in [2, 5].

As with other protection functions available in a protection relay, power swing blocking functions should be tested. The tests, to which protection relays should be subjected, are summarised, classified, and described in [6÷8]. There are two main types of relay testing: (a) type tests and (b) individual tests. Type tests of particular importance include: (a) functional conformance tests, (b) functional performance tests, and (c) scheme performance tests. These types of tests are briefly characterised below.

Functional conformance tests. In these tests relays are tested

using signals that can be described with simple relationships between currents and voltages. Analogue signals are fed to a tested relay, usually of the fundamental frequency, defined as phasors. Sometimes an additional aperiodic component is introduced to a "pure sine" test signal. In tests pre-fault, fault, and post-fault conditions are simulated.

Tests of this type are typically used to check the settings of protection functions: starting (pickup) characteristics, operating times, and ratios of return (dropout level). For testing software is used which is installed in modern microprocessor testers.

Functional performance tests. These tests verify a relay's appropriate response to the power system's specific operating conditions, and to a specific course of an interference in the system. They can be done in such a way that electrical quantities are recorded by a digital disturbance recorder just before, during, and after a disturbance. Then the records are transferred to a laboratory and uploaded to the software of a tester (simulator reproducing the recorded waveforms). If no records are available, then the electrical waveforms just before and during a disturbance can be obtained by computer simulation of the power system or a relevant portion of it.

The tester plays back the recorded current and voltage waveforms, converts digital signals to analogue, and amplifies them to the tested relay's input level. These signals are fed to the tested device and its response is monitored by recording activation and tripping signals. Tests of this type are referred to as an open-loop test.

Scheme performance tests. This testing method treats a test of a power protection relay as a black box, in which all features are thus configured and set, as in the case of its installation in a bay. The relay testing procedure may be similar to functional

performance tests. However, the testing method using the power system's real time simulators is much more sophisticated and realistic.

Results of such real time simulation are output as soon as events take place in the system. With such a simulator a tested relay can be included in a power system model so that the instantaneous voltages and currents output from the simulator are converted to analogue signals, appropriately amplified and input into the relay. Output signals from the relay are entered to the power system model mapped in the simulator. If the output signal is a signal for the opening of a system component's circuit breaker, and this signal occurs during a simulated waveform, then the corresponding circuit is opened in the system model. Such testing is called closed-loop testing, because the modelled system's performance, just as in the real system, depends on the tested relay's actions.

Some microprocessor testers are provided with software for performing functional conformance tests and simple functional performance tests of power swing blocking functions. Papers [9, 10] describe power swing blocking function testing with State Sequencer, Ramping, and NetSim test modules of OMICRON electronics' Test Universe software [11].

2. Situations and factors that may contribute to a power swing blocking functions' inappropriate performance

When testing power swing blocking functions their performance should be examined in situations to which they may inappropriately respond. Inappropriate performance of power swing blocking functions - mainly those impedance based of the $Z(t)$ type - may result from:

- long, too heavily loaded lines
- high-resistance developing faults, at which a slow impedance change can be mistakenly recognised as a power swing (blocking function's erroneous response)
- arc faults
- long durations of three-phase external short circuits, and large angle changes during a fault, to which a power swing blocking function fails to respond
- internal three-phase faults during power swings and swing blocking function's response (failure to disable the feature)
- asymmetric faults (internal or external) during power swings and swing blocking functions' response
- faults during power swings (in healthy phases) occurring in single-phase auto-reclose's dead time
- different directions of operating impedance changes in the impedance plane during power swings (changes from and to the relay point)
- adverse effects of current transformers (CT saturation) and of capacitance voltage transformers (after short circuit transients) on.

It should be noted that usually cited reasons of a power swing blocking function's malfunction are not isolated. For example, high-resistance faults occur in conjunction with arc faults and are usually single phase short circuits. A more detailed description of individual cases in which power swing blocking functions fail can be found in [2, 5].

3. Power swing blocking functions testing

A power swing blocking function testing algorithm should enable validation of the function's performance in the basic and extended scope [2]. The basic testing scope should allow an initial assessment of the function's performance (synchronous and asynchronous swings excluding unusual situations listed in Sec. 2). The extended testing should also take into account modelling of unusual disturbances in a quite precisely modelled portion of the power system (accurate models of generator and its controls, accurate models of transformer and lines, accurate models of current and voltage transformers, etc.). In terms of the tests breakdown described in Sec. 1 the basic scope may be identified as a functional conformance test, while the extended scope covers functional conformance tests and functional performance tests.

Basic testing may be performed in such a way that by means of a simulation program a simple test system is modelled, by which the generated current and voltage samples are saved to files in a COMTRADE format. These files are then played back using a microprocessor tester software and on this basis the tester generates appropriate currents and voltages. For example, in [2] the test systems were developed in the PSCAD/EMTDC v.4.2.1 [12] simulation program. The COMTRADE files with current and voltage samples generated were played back by the Advanced TransPlay test module of OMICRON electronics CMC tester's Test Universe software [11].

Another basic testing method may consist in the use of ready-made test modules designed for the given microprocessor tester. For example, papers [9, 10] describe power swing blocking function testing with State Sequencer, Ramping, and NetSim test modules of OMICRON electronics CMC tester's Test Universe software [11].

Extended testing differs from the basic testing in that more extensive test systems are modelled in the simulation programme. In these systems power system components are modelled much more accurately (accurate models of generators and their control systems, accurate line models). For testing of this type two-machine (with two-circuit line), four-machine, and seven-machine system models can be used.

3.1. Basic testing of power swing blocking functions

Testing on a system model developed in a simulation programme For basic testing of power swing blocking functions the system shown in fig. 1 may be used. In this system, the generator (and its

controls) and the unit generator transformer are not modelled as exactly as it should be done in a model for extended testing. Instead, an appropriately controlled voltage source is used. In this system, by means of the controlled voltage source the voltage amplitude and angle are changed so that the operating impedance runs on the impedance plane have the same shapes as at synchronous and asynchronous power swings. A (single circuit) line can be modelled by four-terminal networks of PI type (series reactances and resistances, shunt susceptances), or without taking into account the shunt susceptances (only series reactances and resistances).

At various points in the system during the power swing modelling of individual 3ph, 3ph-n, 2ph, 2ph-n, 1ph-n faults with different fault resistances R_f should be possible. In phase-to-phase short-faults from $R_f = 0$ (metallic short-circuit) up to several tens of ohms, and in ground faults from $R_f = 0$ in the case of (rare) metallic short-circuit up to R_f amounting to hundreds of ohms (high-resistance single-phase short-circuit). It is assumed that the fault resistance of a low-resistance ground fault $R_f < 20 \Omega$, and of a high-resistance ground fault $R_f = (100 \div 200) \Omega$.

A current or voltage instrument transformer in the system for basic tests at a relay point should be modelled as ideal.

In the case of power swing modelling voltage angle E_b of SEE2 source should be constant and equal to 0, while angle $\delta(t)$ of voltage E_a of SEE1 source should change in the case of asynchronous swings according to formula:

$$\delta(t) = \delta_{obc} + 2\pi f_n \cdot \Delta f \cdot t = \delta_{obc} + \omega_n \cdot \Delta f \cdot t \quad (1)$$

where: $\delta(t)$ – angle of voltage E_a in [deg], δ_{obc} – initial voltage angle in [deg], $f_n = 50$ Hz – rated frequency, $\omega_n = 314$ rad/s – rated angular velocity, Δf – slip frequency in [Hz], t – time in [s].

In the case of synchronous swings angle $\delta(t)$ of voltage E_a of source SEE1 should change according to formula:

$$\delta(t) = \delta_{obc} + A_1(1 - e^{B_1 \cdot t}) + A_2 e^{B_2 \cdot t} \cdot \sin(\omega_n \cdot \Delta f \cdot t) \quad (2)$$

where: $\delta(t)$ – angle of voltage E_a in [deg], δ_{obc} – initial voltage angle in [deg], $f_n = 50$ Hz – rated frequency, $\omega_n = 314$ rad/s – rated angular velocity, Δf – slip frequency in [Hz], t – time in [s]; A_1, A_2, B_1, B_2 – coefficients influencing the swing depth, for example: $A_1 = 50$; $A_2 = 80$; $B_1 = -5$; $B_2 = -0.01$.

Power swing blocking functions' basic testing should take into account the following situations:

- asynchronous swings with different frequencies, for example in the range from 0.2 Hz to 10 Hz
- synchronous swings with different frequencies and different "depths" (different degrees of "entry" in the area of distance protection zones)

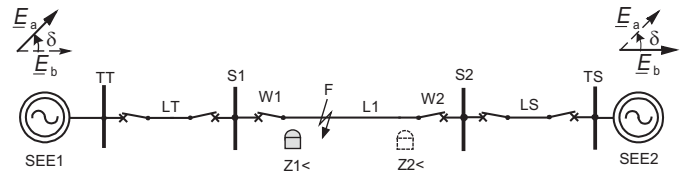


Fig. 1. System for basic testing of power swing blocking functions

- swings with different source voltage modules ratios $k_E = E_a/E_b$ – typically k_E fits in the range from 0.7 to 1.3. This ratio, together with k_X ratio that rules the power flow direction and determines whether the node with relay point is "sending" or "receiving" [1, 2]
- swings with different reactances ratio $k_X = X_a/X_b$ in the relay point (X_a, X_b – means the equivalent reactances on the relay point's left and right sides). Usually k_X may be considered in the range of 0.5 to 4. This ratio describes the location of the circles describing power swings in plane $X(R)$, and it also has some impact on the radius of a given circle. For $k_E > 1$ higher k_X value increases the circle radius, and for $k_E < 1$ higher k_X decreases it. This ratio, together with ratio k_E rules the power flow direction and determines whether the node with relay point is "sending" or "receiving" [1, 2]
- single 3ph, 3ph-n, 2ph, 2ph-n, 1ph-n faults occurring during power swings when the operating impedance is in the area of a power swing blocking function's inner zone (for different phase voltage angles at the relay point, and different ratios k_E and k_X). The modelled faults' fault resistances R_f should differ: in phase to phase faults from $R_f = 0$ (metallic short-circuit) up to several tens of ohms, and in ground faults from $R_f = 0$ (metallic short-circuit) up to hundreds of ohms (high-resistance short-circuit). It can be assumed that the fault resistance of a low-resistance ground fault $R_f < 20 \Omega$, and of a high-resistance ground fault $R_f = (100 \div 200) \Omega$.
- impedance trajectory during power swings (owing to properly selected ratios k_E and k_X) "passing through" (during asynchronous swings) and "entering" (during synchronous swings) the distance protection relay's first or second or third or reverse zone, both on the impedance plane's right side (sending node) and left side (receiving node).

In a power swing blocking function's basic testing the above cases should be combined. A case should be modelled, for example, of 1 Hz asynchronous swings. During these swings the impedance trajectory should move from the impedance plane's right to left side (sending node) through the distance protection relay's first zone. While the operating impedance has entered the distance protection's active zone, a three-phase metallic short circuit should be simulated.

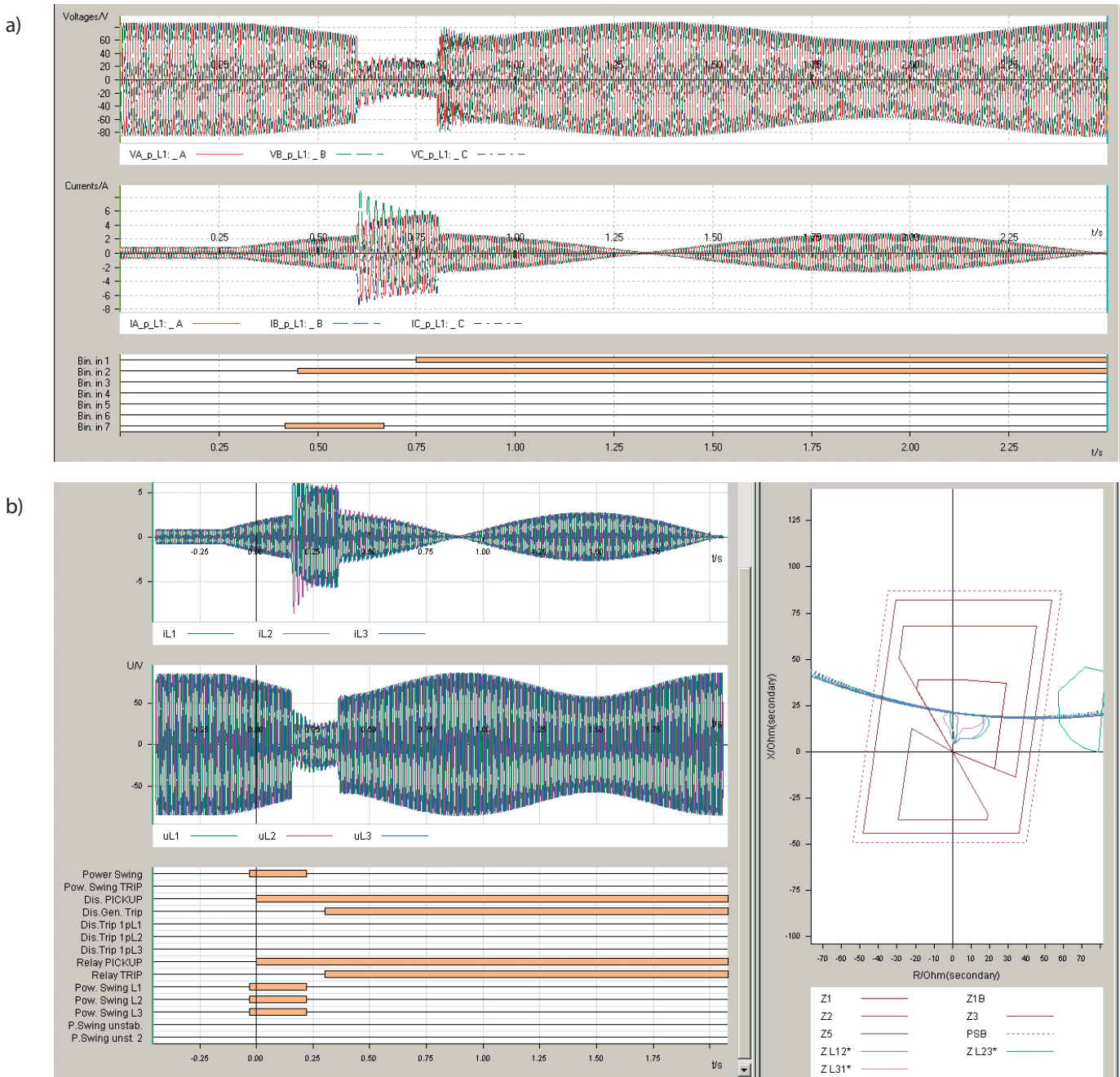


Fig. 2. Example testing results of 7SA522 relay's power swing blocking: a) waveforms generated by CMC tester's Advanced TransPlay software module, b) visualization of results of power swing blocking function testing by SIGRA4 software

Fig. 2 shows sample testing results of a Siemens 7SA522 relay's power swing blocking function obtained by the above described method [2]. In the test 1 Hz asynchronous power swings were modelled. During the swings a 200 ms long three-phase metallic circuit (3ph) was modelled. After the fault's elimination the swings persisted. As shown in fig. 2b, the 7SA522 relay properly detected the 3ph fault and triggered three-phase tripping. From the fault occurrence until the distance protection's tripping signal approx. 147 ms passed. From the fault occurrence until the blocking function's deactivation approx. 67 ms passed, i.e. from the blocking function deactivation until the distance protection tripping signal 80 ms passed. Such distance protection response is associated with the *Trip delay after Power Swing Blocking: 80 ms*

setting of the blocking function (distance protection responds 80 ms after the blocking function deactivation).

Testing with test modules of microprocessor tester software.

In addition to the swing blocking functions testing method described above, the functions can be tested by selected test modules of microprocessor tester software. Example test modules of OMICRON electronics CMC tester's Test Universe software that can be used for power swing blocking functions testing are the Ramping and NetSim modules [11].

Ramping module. With the Ramping module operating impedance's slow and fast entries into the active area of distance

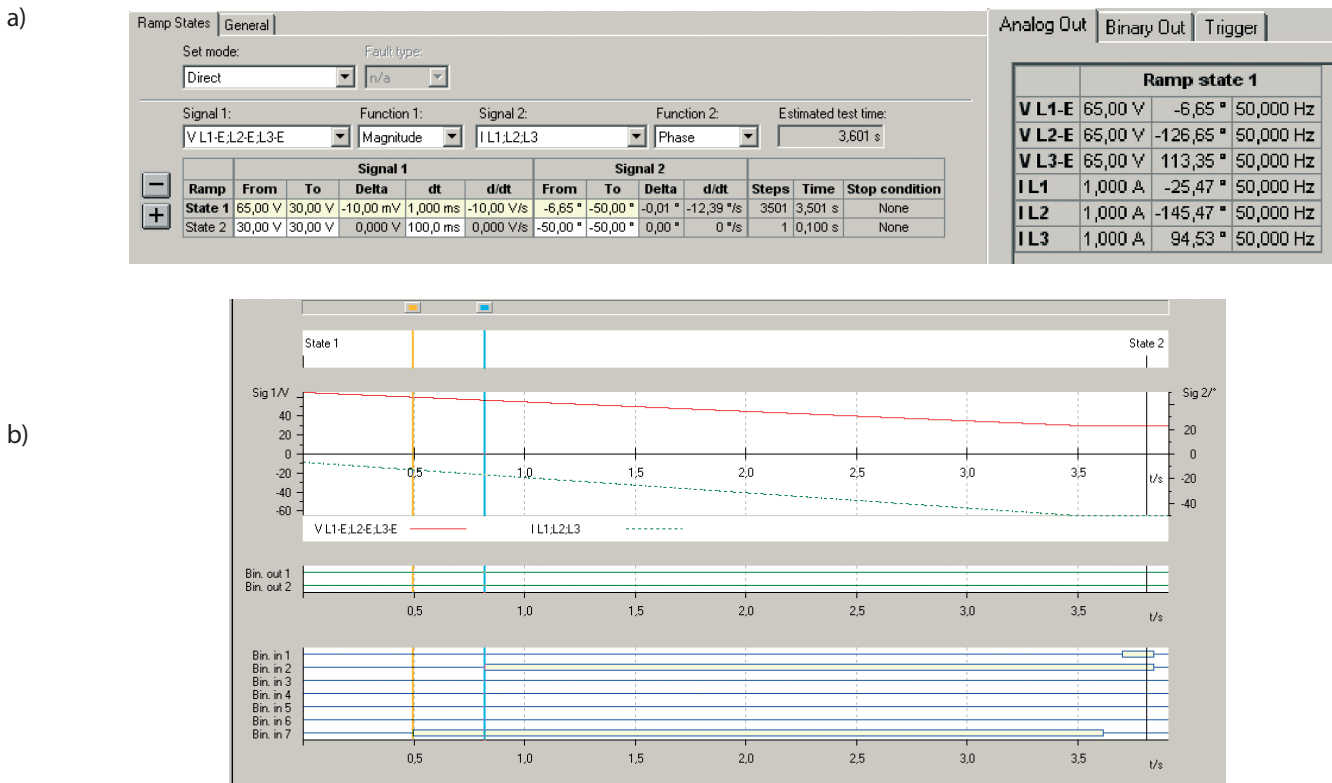


Fig. 3. Sections of Ramping module dialogue windows: a) voltage and current changes simulated at test, b) visualisation of voltage amplitude and current phase angle changes and of activation of CMC tester's binary inputs

protection zones can be modelled, and performance of the power swing blocking function and distance protection can be checked.

By simulating the operating impedance's slow entry into the areas of distance protection zones the power swing blocking function performance can be checked at slow operating impedance changes, which may occur, for example, at load changes (current and voltage waveforms at load changes have different "shapes" than at power swings). By simulating faster impedance changes with a Ramping module a power swing can be simulated, and by simulation of very rapid impedance changes short circuits can be simulated.

Power swing blocking function testing with a Ramping module is based on changes in operating impedance that comes from the operating load area to the distance protection area. In tests, the changing impedance should pass, on the impedance plane, through the power swing blocking function's outer and inner zones.

The fact should be considered that in tests with this module the current and voltage waveform shapes do not fully match the shapes occurring during power swings.

In the course of tests reported in [2] voltages and currents were changed in three phases at the same time (impedance changes were symmetric). The following were changed in the tests:

- modules of three phase voltages (at $\Delta t = 1$ ms interval) between certain thresholds (voltage phase angles do not change). Voltage change rate was determined by the respective voltage gains ΔU corresponding to the adopted voltage change time interval Δt
- phase angles of three phase currents at constant forced current amplitudes $I_{wym} = 1$ A.

An example of a test with a Ramping module, whereby the operating impedance's slow entry (10 Ω/s) to the 7SA522 relay's distance zone was simulated, is shown in fig. 3. A screenshot of the test results is shown in fig. 4. As seen in the figure, the power swing blocking function was properly activated upon the operating impedance's entry to its outer zone.

NetSim module. This is a module for simple functional operation tests. Sections of the system are mapped there, in which faults can be simulated in single-line, parallel-lines, and line with tapped line. In addition, it enables simulation of synchronous and asynchronous power swings (with and without a concurrent short-circuit). The types of tests that can be performed with NetSim are shown in fig. 5.

Fig. 6 shows examples of waveforms obtained from the modelling of an asynchronous power swing with a slip frequency of 1 Hz, with a concurrent three-phase metallic short-circuit at the beginning of line L2 (fig. 5).

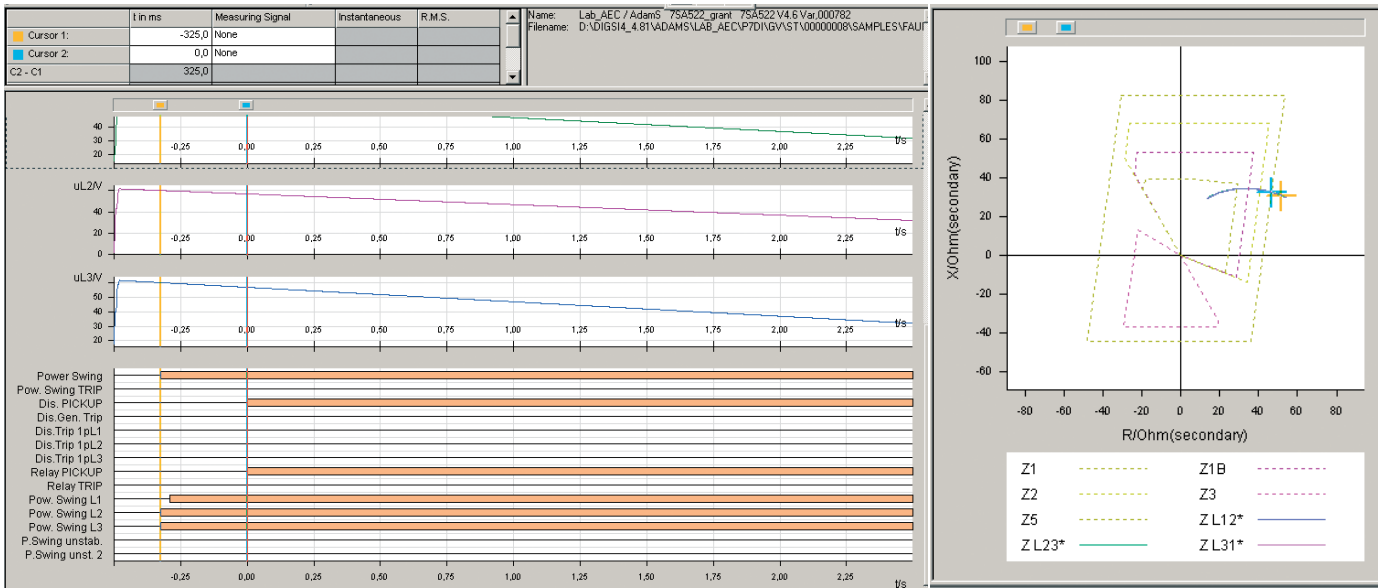


Fig. 4. Sections of screenshots of waveforms recorded by 7SA522 relay

3.2. Extended testing of power swing blocking functions

Extended testing of power swing blocking functions should, in comparison with the basic testing, additionally include modeling of the untypical disturbances listed in Sec. 2 of the paper. For testing of this type the power system portion should be modelled quite accurately (accurate models of generator and its controls, accurate models of transformer and lines, accurate models of current and voltage transformers, option of single-phase control of on-off switches, etc.).

For extended testing of power swing blocking functions the system shown in fig. 7 may be used. In this system, the generator (and its control systems) and the unit generator transformer have

been accurately modelled. Instead of a single line (fig. 1), two line circuits are provided for (the magnetic coupling between a line's parallel circuits can also be considered in the test). Lines can be modelled by four-terminal networks of PI type (series reactances and resistances, shunt susceptances), or using a frequency model (taking into account tower geometry, line parameters' dependence on the frequency, etc.). The test system shown in fig. 7 can be simplified by replacing the generator and unit generator transformer with a controlled voltage source. In this case, angle $\delta(t)$ of the source voltage can be changed using a simple controller based on the generator rotor motion equation.

During power swings modelling should be possible at various points in the system of 3ph, 3ph-n, 2ph, 2ph-n, 1ph-n faults with

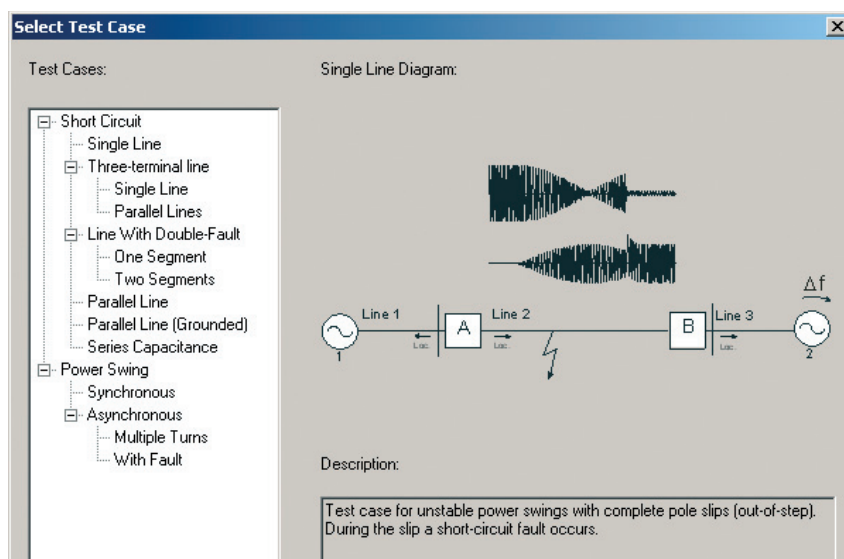


Fig. 5. Types of tests available in NetSim module

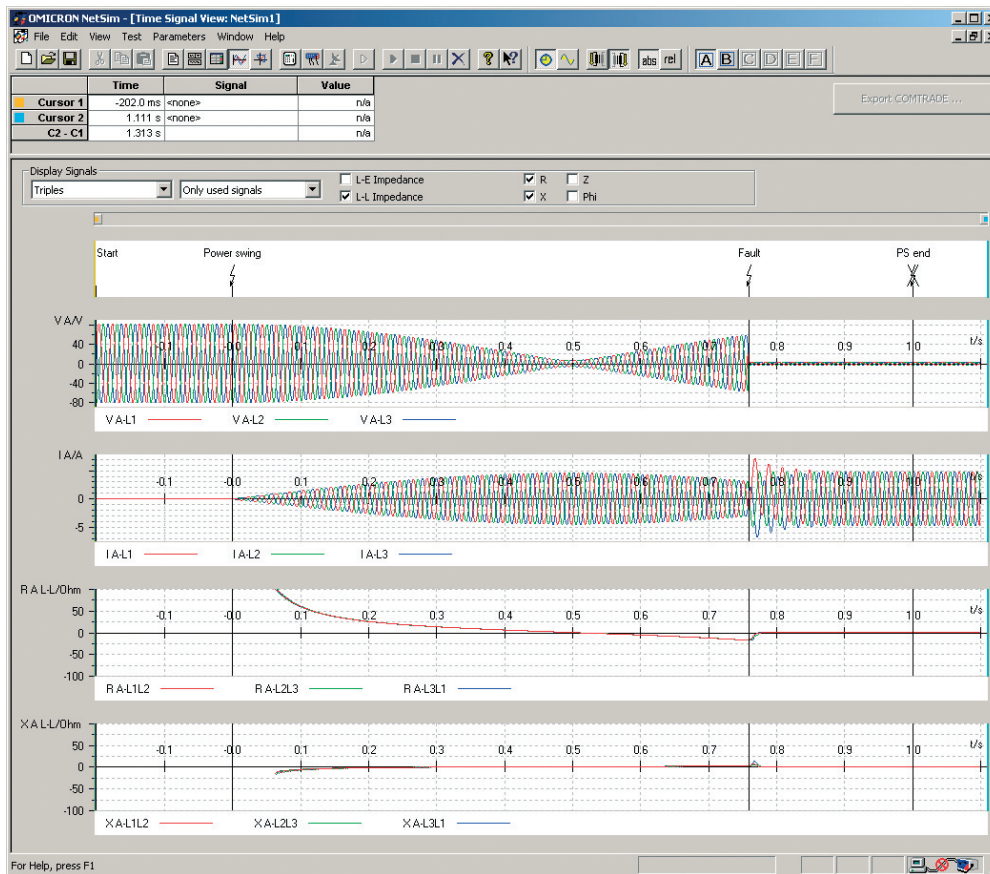


Fig. 6. Asynchronous swings with concurrent three-phase short-circuit generated by NetSim module

different fault resistances R_f : in phase-to-phase short-faults from $R_f = 0$ (metallic short-circuit) up to several tens of ohms, and in ground faults from $R_f = 0$ in the case of (rare) metallic short-circuit up to R_f amounting to hundreds of ohms (high-resistance single-phase short-circuit). It is assumed that the fault resistances of a low-resistance ground fault is $R_f < 20 \Omega$, and of a high-resistance ground fault $R_f = (100 \div 200) \Omega$. In addition to individual short-circuits, multiple faults (in different areas of the line) should also be capable of modelling, and developing faults, such as a single phase-to-neutral short circuit that after a certain time evolves to two-phase-to-neutral, and then to pure-phase-to-neutral. Additionally, besides purely resistive faults, also transient currents and voltages can be modelled, which occur at arc faults. The following should be borne in mind:

- primary arc associated with large current in the short circuit's location since its occurrence until there is no current in the line anymore
- secondary arc after the single-pole opening of a circuit breaker (dead time in a single-phase auto-reclose cycle), which is maintained by the line phases' magnetic coupling, and thus with small current (tens of amperes).

Current and voltage transformers at the relay point should be modelled as real items, taking into account their magnetization characteristics. This will enable testing the impact of current transformer saturation and transient states in capacitive voltage transformers on the power swing blocking function performance.

On-off switches should be capable of controlling their individual poles in order to implement a single-phase auto-reclose cycle.

Some tests cannot be performed in part of the power system near-real model which can be performed in basic testing (using controlled voltage sources). For example, only asynchronous power swings with one specific frequency, resulting from the modelled system's parameters, can be modelled. No swings with various frequencies can be modelled (without altering the modelled system's parameters). Moreover, in part of the power system model for power swing blocking function's extended testing constant k_x and k_E ratios resulting from the modelled system and power flow parameters should be reckoned with.

Power swing blocking function's extended testing should take into account the following situations:

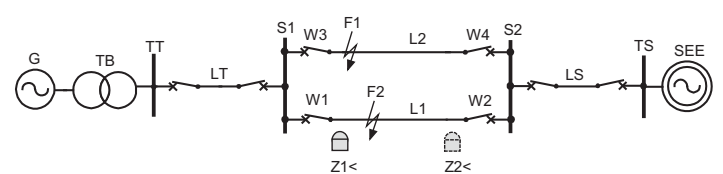


Fig. 7. Two-machine system for extended testing of power swing blocking function

- asynchronous (synchronous) swings modelled in such a way that 3ph short circuits are generated in different locations in line L2 (F1 in fig. 7) with pre-defined durations. After a pre-defined fault duration W3, W4 line circuit breakers are opened, and line L2 is switched off. In relay points (at circuit breakers W1, W2) in line L1 such impedance changes can be observed, like those at asynchronous (synchronous) swings in the receiving and sending nodes. In order to model synchronous swings, the duration of F1 fault (and opening of the on-off switches in line L2) should be short enough for maintaining the generator's synchronism
- swings (asynchronous and synchronous) modelled in such a way that a 3ph short circuit (F1 in fig. 7) is generated at W4 on-off switch in line L2. After the response times of the distance protection's first and second zones the off-on switches W4 and W3 in line L2 are opened, respectively. With this the F2 fault is eliminated non-uniformly. In relay points (at circuit breakers W1, W2) in line L1 such impedance changes can be observed as those at asynchronous swings in the receiving and sending nodes
- 3ph external faults (in line L2 in fig. 7), at which the operating impedance in L1 line's relay points after the external fault's elimination does not leave the blocking function's outer zone, and enters (resulting from power swings caused by the fault elimination liquidation of short swing) the area of distance protection's first zone
- long-term external 3ph faults (in lines L2, LT and LS in fig. 7), at which the operating impedance in line L1's relay points enters (during the fault short circuit) the area of the distance protection's first zone
- 3ph, 3ph-n, 2ph, 2ph-n, 1ph-n internal faults F2 (in line L1) during power swings (synchronous and asynchronous), when the operating impedance has entered the area of the power swing blocking function's inner zone (for various phase voltage angles at the relay point). Faults (F1 in fig. 7) should be modelled in the first, second, third, and reverse zones. The modelled faults' fault resistances R_f should differ: in phase to phase faults from $R_f = 0$ (metallic short-circuit) up to several tens of ohms, and in ground faults from $R_f = 0$ (metallic short-circuit) up to hundreds of ohms (high-resistance short-circuit). It can be assumed that the fault resistance of a low-resistance ground fault $R_f < 20 \Omega$, and of a high-resistance ground fault $R_f = (100 \div 200) \Omega$
- developing short circuits in line L1, for example 1ph-n fault evolving after a certain time into 2ph-n, and then into 3ph-n, or 2ph fault evolving after a certain time into 3ph. The time gap between subsequent short circuits should be greater than 50 ms
- short circuits in line L1 during power swings, in the course of which current transformers become saturated
- arc faults in line L1 during power swings (synchronous and asynchronous), when the operating impedance has entered the area of the distance-protection's response. Faults should be modelled in the first, second, third, and reverse zones
- single-phase short-circuit in line L1 followed by a single-phase auto reclosing cycle, during which impedances in the two healthy phases (during the dead time) change as at power swings
- single-phase short-circuit in line L1 followed by a single-phase auto reclosing cycle, during which impedances in the two healthy phases (during the dead time) change as at power swings. During the automatic reclose cycle's dead time a secondary arc should be modelled
- single-phase short-circuit in line L1 followed by a single-phase auto reclosing cycle, during which impedances in the two healthy phases (during the dead time) change as at power swings. Additionally, during the automatic reclose cycle's dead time another single-phase fault should be modelled (in a healthy phase)
- different locations for the relay during swings (at circuit breaker W1 or W2) to verify the performance of the power swing blocking function in the sending and receiving nodes.

In a power swing blocking function's extended testing the above cases should be combined. For example, a case of asynchronous swing occurrence should be modelled (by modelling sufficiently long F1 fault in line L2) in the sending node (impedance trajectory during the swing should pass from the right to the left side of the impedance plane) through the distance protection's first zone. At the time when the operating impedance has entered the distance protection's response zone ($Z1 <$ in fig. 7), a high-resistant single-phase short circuit should be simulated (F2 in fig. 7) eliminated in a single-phase automatic reclose cycle. During the cycle's dead time another single-phase fault should be modelled in a healthy phase.

Of course, more complex test systems for the expanded testing can be imagined than that presented in fig. 7, for example, a four-machine system (fig. 8) or a seven-machine system (CIGRE Test System) [1]. According to this author, however, multi-machine systems more complex than the one shown in fig. 7 (e.g. seven-machine system) are better suited for testing out-of-step protecting systems [1] (including distance protection of generator-transformer set, under-impedance protection of generator, grid splitting protections, generator pole-slip protections), than for accurate testing of power swing blocking functions, because in such systems many more disturbance variants can be simulated than in the system shown in fig. 7.

4. Summary

A power swing blocking function is an integral part of distance protection and supports its performance in disturbances, such as power swings. In simple terms, a power swing blocking function should block a distance protection's response to power swings when the operating impedance has entered its response area, and should not block its response to short circuits.

A power swing blocking function, like any other protection functions, should be tested. Its settings should be tested, as well as its performance in specific system conditions. The tests may be performed in the following two scopes:

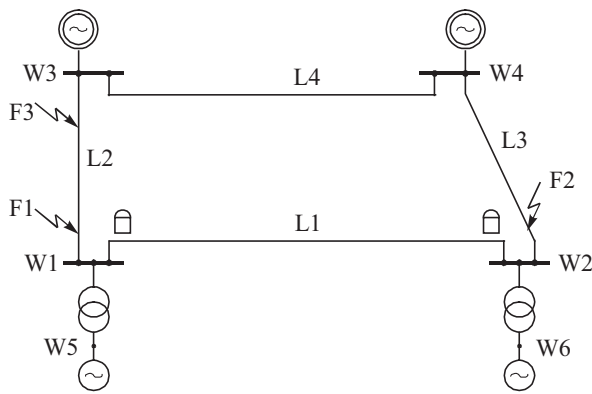


Fig. 8. Four-machine system for extended testing of power swing blocking function

- basic test, whereby the blocking function performance is tested in typical operating situations which they have to deal with (e.g., synchronous and asynchronous swings with various frequencies, short circuit concurrent with power swings)
- extended test, whereby the blocking function is tested in unusual situations (e.g., swings in healthy phases during automatic reclose cycle's dead time, long-term external faults).

For power swing blocking function testing software can be used which microprocessor testers are provided with. This approach allows testing the blocking functions in a limited scope. More sophisticated power swing blocking function testing methods consist in modelling of a part of the power system and disturbances occurring there in a simulation programme, and then reconstructing them (currents and voltages on current transformers' secondary side) with microprocessor testers, and assessing its performance based on the tested device's response.

The advantage of the blocking function testing using test modules of microprocessor testers' software is the ability to test relatively easily and quickly. The disadvantage is its suitability for simple and typical interference cases only.

The advantage of the blocking function testing by way of software-enabled simulation of dynamic states in the power system is its suitability for cases of simple and unusual disturbance alike. The disadvantage is the relatively long testing process, which consists of the time required to model the test system and selected disturbances, and of reconstruction by a microprocessor tester of the waveforms resulting from the simulation.

REFERENCES

1. Machowski J., Smolarczyk A., Brzeszczak L., Opracowanie zasad nastaw blokad przeciwkołysaniowych zabezpieczeń pod kątem odbudowy systemu [Setting principles for protection relays' power swing blocking functions with a view to system recovery], Power Engineering Institute of Warsaw University of Technology, research and development study commissioned by PSE-Operator SA, Agreement No. SR/RB/IS/008/05, Warsaw 2005.
2. Smolarczyk A., Nowe metody selektywnego rozróżniania kołysań mocy od zwarcí oporowych, rozwijających się i innych złożonych zakłóceń zapewniające niezawodną pracę zabezpieczeń odległościowych [New methods of selective distinguishing between power swings and resistance, developing, and other complex disturbances to ensure reliable distance protection relay operation], The Ministry's of Science and Higher Education own research project N N511 358234, Warsaw 2008–2010.
3. Smolarczyk A., Blokady przeciwkołysaniowe stosowane w zabezpieczeniach odległościowych [Power swing blocking functions of distance protection relays], *Wiadomości Elektrotechniczne*, issue 10/2010.
4. Smolarczyk A., Blokady przeciwkołysaniowe stosowane w zabezpieczeniach odległościowych [Power swing blocking functions of distance protection relays], XV International Scientific Conference – APE'11, Jurata 8–10 June 2011, vol. 2, pp. 13–22.
5. Smolarczyk A., Sytuacje i czynniki mogące powodować nieprawidłowe działanie blokad przeciwkołysaniowych [Situations and factors that may cause inappropriate performance of the power swing blocking functions], *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010, issue 11, pp. 7–12.
6. CIGRE, Analysis and guidelines for testing numerical protection schemes, CIGRE Report No. 159, Working Group 34.10, August 2000.
7. Smolarczyk A., Badanie przekaźników elektroenergetycznych [Power relay testing], *Przegląd Elektrotechniczny* 2004, issue 11.
8. Smolarczyk A., Metody testowania przekaźników elektroenergetycznych [Power relay testing methods], *Automatyka Elektroenergetyczna* 2004, issue 2, pp. 22–29.
9. Steinhauser F., Testing of the power swing blocking in distance relays, OMICRON User Meeting 2000, Munich 2000.
10. Meinhardt P., Testing approaches for the power swing blocking function, International Protection Testing Symposium, OMICRON electronics, Vienna 2009.
11. OMICRON electronics: Software description: Test Universe v.2.30, [online, 2010] <http://www.omicron.at/>.
12. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Information on PSCAD/EMTDC v.4.2.1 software, [online, 2012] <http://www.pscad.com/>.

Adam Smolarczyk

Warsaw University of Technology
e-mail: Adam.Smolarczyk@ien.pw.edu.pl

A graduate of Warsaw University of Technology. In December 1999 he started working at the University's Institute of Electrical Power Engineering. He is currently an assistant professor at the Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology. He is an author and co-author of research reports on digital power relays. His research interests are related to the digital power protection automatics and the modelling of phenomena occurring in power systems.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 124–132. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Sposoby badania blokad kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych

Autor

Adam Smolarczyk

Słowa kluczowe

system elektroenergetyczny, kołysania mocy, blokady kołysaniowe, badanie przekładników elektroenergetycznych

Streszczenie

W artykule opisano sposoby badania blokad kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych. Zaproponowano badania, jakim powinny podlegać blokady kołysaniowe w zakresie podstawowym i rozszerzonym. Przedstawiono propozycje układów testowych oraz opisano moduły testowe oprogramowania testera mikroprocesorowego, które mogą zostać wykorzystane do badania blokad kołysaniowych.

1. Wstęp

Funkcje blokad kołysaniowych są dostępne w większości przekładników odległościowych. Ich zadaniem jest blokowanie niepożądanego działania funkcji zabezpieczeń odległościowych podczas kołysań mocy, w trakcie których impedancja ruchowa może wejść w obszar stref działania funkcji odległościowej. Producenci urządzeń zabezpieczeniowych stosują blokady kołysaniowe, wykorzystujące różne sposoby detekcji kołysań mocy. Najczęściej stosowanym sposobem detekcji kołysań mocy, wykorzystywanym przez blokady klasyczną typu $Z(t)$, jest bazowanie na pomiarze szybkości zmian impedancji ruchowej między strefami zewnętrzną i wewnętrzną blokady. Rodzaje blokad kołysaniowych, stosowanych przez wybranych producentów urządzeń zabezpieczeniowych, zebrano w [1, 2], a w artykułach [3, 4] opisano stosowane przez nie sposoby detekcji kołysań mocy.

Działanie blokad kołysaniowych powinno być blokowane (blokada powinna zostać zdjęta) podczas zwarć wewnętrznych (symetrycznych i niesymetrycznych), występujących podczas kołysań mocy, aby umożliwić ich likwidację za pomocą funkcji zabezpieczenia odległościowego. Ponadto w niektórych sytuacjach blokady kołysaniowe mogą działać niepoprawnie. Niepoprawne działanie blokady sprowadza się do brakującego lub zbędnego pobudzenia blokady w określonej sytuacji. Wybrane sytuacje i czynniki, w których blokady kołysaniowe mogą działać niepoprawnie, zebrano w [2, 5].

Podobnie jak pozostałe funkcje zabezpieczeniowe, dostępne w urządzeniach zabezpieczeniowych, funkcje blokad kołysaniowych powinny być badane. Podziały testów, jakim powinny podlegać urządzenia zabezpieczeniowe, zebrano i opisano w [6–8]. Rozróżnia się dwa główne rodzaje badań (testów) przekładników: (a) testy typu i (b) testy indywidualne. Wśród testów typu istotną rolę odgrywają: (a) funkcjonalne testy zgodności, (b) funkcjonalne testy działania i (c) systemowe testy działania. Poniżej krótko scharakteryzowano wymienione rodzaje testów.

Funkcjonalne testy zgodności. Przekładnik podczas tych testów jest poddany badaniom za pomocą sygnałów, które mogą zostać opisane prostymi zależnościami między prądami i napięciami. Podczas testów do badanego przekładnika doprowadzane są sygnały analogowe, zwykle o częstotliwości podstawowej, zdefiniowane jako fazory. Niekiedy do „czystych sinusoid” sygnałów testowych wprowadzana jest dodatkowa składowa nieokresowa. Podczas testów symuluje się warunki przedzwarciove, zwarciove i pozwarciove.

Testy tego typu zwykle są wykorzystywane do weryfikacji nastawień funkcji zabezpieczeniowych: charakterystyk rozruchowych, czasów działania, współczynników powrotu. Do ich wykonywania wykorzystuje się oprogramowanie, w które wyposażone są współczesne testery mikroprocesorowe.

Funkcjonalne testy działania. Testy te dotyczą poprawności działania przekładnika w konkretnych warunkach pracy systemu elektroenergetycznego (SEE) oraz konkretnego przebiegu zakłócenia w SEE. Można je wykonać w ten sposób, że przebieg wielkości elektrycznych tuż przed oraz w trakcie zakłócenia i po zakłóceniu rejestruje się za pomocą cyfrowych rejestratorów zakłóceń. Następnie zarejestrowany przebieg przenosi się za pomocą nośnika danych do laboratorium i wgrzywa do oprogramowania testera (symulatora odtwarzającego zarejestrowane przebiegi). Jeśli nie dysponuje się zarejestrowanymi przebiegami, to przebiegi wielkości elektrycznych tuż przed i w trakcie zakłócenia można uzyskać za pomocą komputerowej symulacji SEE lub odpowiedniego jego fragmentu.

Tester odtwarza zarejestrowane przebiegi prądów i napięć, zamienia sygnały cyfrowe na analogowe i wzmacnia do poziomu wejść sprawdzanego przekładnika. Sygnały te wprowadza się do badanego urządzenia i obserwuje jego działanie, rejestrując sygnały pobudzeń i zadziałań. Testy tego typu nazywane są testami w otwartej pętli.

Systemowe testy działania. Ta metoda testowania polega na tym, że podczas testów przekładnik elektroenergetyczny traktowany jest jak czarna skrzynka, w której wszystkie funkcje są tak skonfigurowane i nastawione, jak w przypadku zainstalowania go w polu. Sposób przeprowadzania badań przekładnika może być podobny jak w przypadku funkcjonalnych testów działania. Jednak o wiele bardziej wyrafinowana i odpowiadająca rzeczywistości jest metoda testowania z wykorzystaniem symulatorów SEE działających w czasie rzeczywistym zjawisk (ang. *real time simulators*).

Dzięki takim symulatorom wyniki symulacji wyprowadzane są tak samo szybko, jak przebiegają zjawiska w systemie. Dysponując takim symulatorem, można badany przekładnik włączyć do modelu SEE w ten sposób, że chwilowe wartości napięć i prądów uzyskane z symulatora zamieniane są na sygnały analogowe, odpowiednio wzmacniane i wprowadzane do przekładnika. Natomiast sygnały wyjściowe z przekładnika wprowadza się do modelu SEE odwzorowanego w symulatorze. Jeśli sygnałem wyjściowym jest sygnał na otwarcie wyłącznika jakiegoś elementu systemu i sygnał ten pojawia się w trakcie symulowanego przebiegu, to w modelu systemu zostaje przerwany odpowiedni obwód. O takim testowaniu mówi się, że odbywa się w zamkniętej pętli, gdyż na zachowanie się modelowanego systemu, tak jak w rzeczywistym systemie, wpływ ma działanie badanych przekładników.

Niektóre testery mikroprocesorowe wyposażone są w oprogramowanie umożliwiające wykonywanie funkcjonalnych testów zgodności oraz prostych funkcjonalnych testów działania blokad kołysaniowych. W artykułach [9, 10] opisane zostały sposoby testowania blokad kołysaniowych z wykorzystaniem modułów testowych State Sequencer, Ramping, NetSim oprogramowania Test Universe firmy OMICRON electronics [11].

2. Sytuacje i czynniki mogące przyczynić się do nieprawidłowego działania blokad kołysaniowych

Podczas badań blokad kołysaniowych należy sprawdzić ich zachowanie się w sytuacjach, w których mogą one błędnie działać. Błędne zadziałania blokad kołysaniowych – głównie impedancyjnych typu $Z(t)$ – mogą wystąpić na skutek:

- długich, zbyt silnie obciążonych linii
- wysokooporowych zwarć rozwijających się, podczas których powolne zmiany impedancji mogą być błędnie potraktowane jako kołysania mocy (błędne zadziałanie blokady)
- zwarć łukowych
- długich czasów trwania trójfazowych zwarć zewnętrznych i dużych zmian kątów w trakcie zwarcia, podczas których blokady kołysaniowe błędnie nie działają
- wewnętrznych zwarć trójfazowych występujących podczas kołysań mocy i działania blokady kołysaniowej (błędny brak zablokowania działania blokady kołysaniowej)
- zwarć niesymetrycznych (wewnętrznych i zewnętrznych) występujących podczas kołysań mocy i działania blokady kołysaniowej
- zwarć podczas kołysań mocy (w zdrowych fazach) występujących w trakcie przerwy bezprądowej cyklu SPZ jednofazowego
- różnych kierunków zmian impedancji ruchowej na płaszczyźnie impedancyjnej podczas kołysań mocy (zmiany „od” i „do” punktu przekąźnikowego)
- niekorzystnego wpływu przekładników prądowych (nasycanie się przekładników) i pojemnościowych napięciowych (stany przejściowe po zwarciu) na poprawność działania blokady kołysaniowej.

Należy podkreślić, że zwykle przywołane przyczyny błędnego działania blokad kołysaniowych nie występują samodzielnie. Przykładowo zwarcia wysokooporowe występują w powiązaniu ze zvarciami łukowymi i mają zwykle charakter zwarć jednofazowych. Dokładniejszy opis poszczególnych przypadków, w których blokady kołysaniowe zawodzą, można znaleźć w [2, 5].

3. Sposoby badania blokad kołysaniowych
Algotrymy badania blokad kołysaniowych powinny umożliwiać sprawdzenie poprawności ich działania w zakresie podstawowym oraz rozszerzonym [2]. Sprawdzenie blokad w zakresie podstawowym powinno umożliwić wstępną ocenę poprawności działania blokady (kołysania synchroniczne i asynchroniczne bez uwzględnienia nietypowych sytuacji wymienionych w rozdz. 2). Natomiast sprawdzenie w zakresie rozszerzonym powinno dodatkowo uwzględniać zamodelowanie zakłóceń nietypowych w dość dokładnie zamodelowanym fragmencie SEE (dokładne modele generatora i jego regulatorów, dokładne modele transformatora i linii, dokładne modele przekładników prądowych i napięciowych itp.). Biorąc pod uwagę podział testów przedstawiony w rozdz. 1, badania w zakresie podstawowym można zaliczyć do funkcjonalnych testów zgodności, a badania w zakresie rozszerzonym obejmują funkcjonalne testy zgodności i funkcjonalne testy działania.

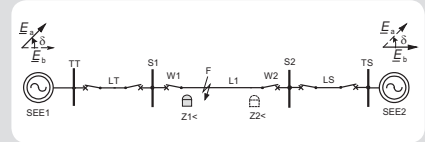
Badania w zakresie podstawowym mogą zostać wykonane w ten sposób, że za pomocą programu symulacyjnego zamodelowany jest prosty układ testowy, za pomocą którego generowane próbki prądów i napięć zapisywane są do plików w formacie COMTRADE. Pliki te są następnie odtwarzane za pomocą oprogramowania testera mikroprocesorowego i na ich podstawie tester generuje odpowiednie prądy i napięcia. Przykładowo w pracy [2] układy testowe zbudowane zostały w programie symulacyjnym PSCAD/EMTDC v.4.2.1 [12]. Wygenerowane pliki typu COMTRADE z próbkami prądów i napięć odtwarzane były za pomocą modułu testowego Advanced TransPlay oprogramowania Test Universe, testera typu CMC firmy OMICRON electronics [11].

Inny sposób wykonywania badań w zakresie podstawowym może polegać na wykorzystaniu gotowych modułów testowych, przeznaczonych dla danego testera mikroprocesorowego. Przykładowo w artykułach [9, 10] opisane zostały sposoby badania blokad kołysaniowych za pomocą modułów testowych State Sequencer, Ramping, NetSim oprogramowania Test Universe, testera typu CMC firmy OMICRON electronics.

Badania w zakresie rozszerzonym różnią się w tym od badań w zakresie podstawowym, że w programie symulacyjnym zamodelowane są bardziej rozbudowane układy testowe. W układach tych o wiele dokładniej zamodelowane są elementy SEE (dokładne modele generatorów i ich układów regulacji, dokładne modele linii). Do badań tego typu może zostać wykorzystany model układu dwumaszynowego (z linią dwutorową), czteromaszynowego, siedmiomaszynowego.

3.1. Badanie blokad kołysaniowych w zakresie podstawowym
Badania z wykorzystaniem modelu układu zbudowanego w programie symulacyjnym
Do badania blokad kołysaniowych w zakresie podstawowym może zostać wykorzystany układ przedstawiony na rys. 1. W układzie tym generator (i jego układy regulacji) oraz transformator blokowy nie są dokładnie zamodelowane, tak jak powinno to być zrobione w modelu do badań w zakresie rozszerzonym. Zamiast niego wykorzystuje się odpowiednio sterowane źródło napięciowe. W układzie tym za pomocą sterowanego źródła napięciowego dokonywane są zmiany amplitudy oraz kąta napięcia, tak aby przebiegi impedancji ruchowej na płaszczyźnie impedancyjnej miały kształty takie, jak podczas kołysań synchronicznych i asynchronicznych. Linia (jednotorowa) może być zamodelowana za pomocą zworników typu PI (reaktancje i rezystancje wzdłużne, susceptancje poprzeczne) lub też bez uwzględnienia susceptancji poprzecznych (tylko reaktancje i rezystancje wzdłużne).

W różnych miejscach układu w trakcie kołysań mocy powinna istnieć możliwość zamodelowania pojedynczych zwarć typu 3f, 3f-n, 2f, 2f-n, 1f-n o różnych rezystancjach przejścia R_f . W zvarciami międzyfazowych od $R_f = 0$ (zwarcia metaliczne) do kilkudziesięciu omów, natomiast w zvarciami doziemnych od $R_f = 0$ w przypadku



Rys. 1. Układ do sprawdzania blokad kołysaniowych w zakresie podstawowym

zwarć metalicznych (rzadko spotykanych) do R_f wynoszących setki omów (w zvarciami jednofazowych wysokooporowych). Zakłada się, że zwarcia doziemne niskooporowe mają rezystancję przejścia $R_f < 20 \Omega$, a zwarcia doziemne wysokooporowe mają rezystancję przejścia w zakresie $R_f = (100 \div 200) \Omega$.

Przekładniki prądowe i napięciowe, w układzie do badań podstawowych, w punkcie przekąźnikowym powinny zostać zamodelowane jako idealne.

W przypadku modelowania kołysań kąt napięcia E_a źródła SEE2 powinien być stały i wynosić 0, natomiast kąt $\delta(t)$ napięcia E_a źródła SEE1 powinien się zmieniać w przypadku kołysań asynchronicznych zgodnie ze wzorem:

$$\delta(t) = \delta_{obc} + 2\pi f_n \cdot \Delta f \cdot t = \delta_{obc} + \omega_n \cdot \Delta f \cdot t \quad (1)$$

przy czym: $\delta(t)$ – kąt napięcia E_a w [deg], δ_{obc} – kąt początkowy napięcia w [deg], $f_n = 50 \text{ Hz}$ – częstotliwość znamionowa, $\omega_n = 314 \text{ rad/s}$ – prędkość kątowa znamionowa, Δf – poślizg w [Hz], t – czas w [s].

W przypadku kołysań synchronicznych kąt $\delta(t)$ napięcia E_a źródła SEE1 powinien zmieniać się zgodnie ze wzorem:

$$\delta(t) = \delta_{obc} + A_1(1 - e^{B_1 \cdot t}) + A_2 e^{B_2 \cdot t} \cdot \sin(\omega_n \cdot \Delta f \cdot t) \quad (2)$$

przy czym: $\delta(t)$ – kąt napięcia E_a w [deg], δ_{obc} – kąt początkowy napięcia w [deg], $f_n = 50 \text{ Hz}$ – częstotliwość znamionowa, $\omega_n = 314 \text{ rad/s}$ – prędkość kątowa znamionowa, Δf – poślizg w [Hz], t – czas w [s]; A_1, A_2, B_1, B_2 – współczynniki wpływające na głębokość kołysań, np.: $A_1 = 50$; $A_2 = 80$; $B_1 = -5$; $B_2 = -0,01$.

W ramach podstawowego zakresu badań blokady kołysaniowe powinny zostać sprawdzone z uwzględnieniem następujących sytuacji:

- kołysań asynchronicznych o różnych częstotliwościach, np. w zakresie od 0,2 Hz do 10 Hz
- kołysań synchronicznych o różnych częstotliwościach i różnej „głębokości” kołysań (różnym stopniu „wejścia” w obszar stref działania funkcji odległościowej)
- kołysań o różnym stosunku modułów napięć źródłowych $k_E = E_a/E_b$ – typowo k_E mieści się w zakresie od 0,7 do 1,3. Współczynnik ten, razem ze współczynnikiem k_{Σ} , decyduje o kierunku przesyłu mocy i określa, czy węzeł z punktem

przełącznikowym ma charakter węzła „wysyłającego”, czy węzła „odbiorczego” [1, 2]

- kołysań o różnym stosunku reaktancji $k_X = X_a/X_b$ w punkcie przełącznikowym (X_a, X_b – oznaczają reaktancje zastępcze po lewej i prawej stronie punktu przełącznikowego). Zwykle k_X można rozpatrywać w zakresie od 0,5 do 4. Współczynnik ten opisuje położenie okręgów opisujących kołysania mocy na płaszczyźnie $X(R)$, a poza tym ma pewien wpływ na promień danego okręgu. Dla $k_E > 1$ większa wartość współczynnika k_X zwiększa promień okręgu, a dla $k_E < 1$ większa wartość k_X zmniejsza promień okręgu. Współczynnik ten, razem ze współczynnikiem k_E , decyduje o kierunku przesyłu mocy i określa, czy węzeł z punktem przełącznikowym ma

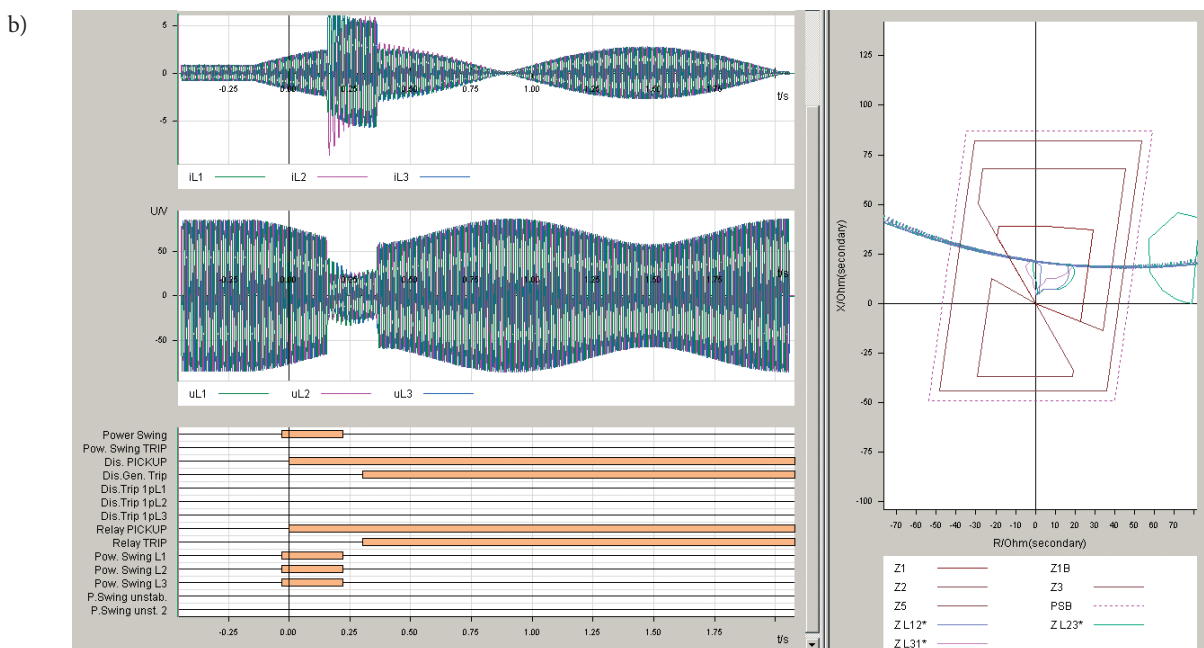
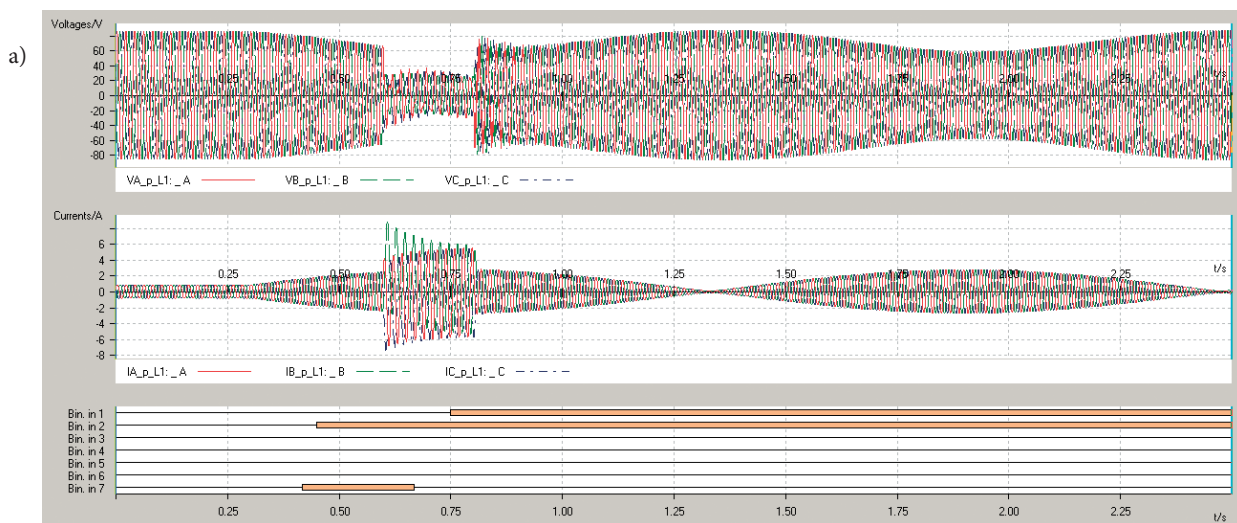
charakter węzła „wysyłającego”, czy węzła „odbiorczego” [1, 2]

- pojedynczych zwarcia typu 3f, 3f-n, 2f, 2f-n, 1f-n występujących w trakcie kołysań mocy, gdy impedancja ruchowa znajdzie się w obszarze strefy wewnętrznej blokady kołysaniowej (dla różnych kątów napięć fazowych w punkcie przełącznikowym i różnych współczynników k_E oraz k_X). Zamodelowane zwarcia powinny być o różnych rezystancjach przejścia R_f : w zwarcia międzyfazowych od $R_f = 0$ (zwarcia metaliczne) do kilkudziesięciu omów, natomiast w zwarciach doziemnych od $R_f = 0$ (zwarcia metaliczne) do setek omów (zwarcia wysokooporowe). Można przyjąć, że zwarcia doziemne niskooporowe mają rezystancję przejścia $R_f < 20 \Omega$, a zwarcia doziemne

wysokooporowe mają rezystancję przejścia w zakresie $R_f = (100 \div 200) \Omega$

- trajektorii impedancji podczas kołysań mocy (dzięki odpowiednio dobranym współczynnikom k_E i k_X) „przechodzących” (podczas kołysań asynchronicznych) i „wchodzących” (podczas kołysań synchronicznych) do stref pierwszej lub drugiej lub trzeciej lub wstecznej zabezpieczenia odległościowego, zarówno z prawej strony płaszczyzny impedancyjnej (węzeł wysyłający), jak i z lewej strony płaszczyzny impedancyjnej (węzeł odbiorczy).

Podczas przeprowadzania badań blokad kołysaniowych w zakresie podstawowym należy wyżej wymienione przypadki łączyć ze sobą. Przykładowo należy zamodelować



Rys. 2. Przykładowe wyniki badań blokady kołysaniowej przełącznika 7SA522: a) przebiegi wygenerowane za pomocą modułu Advanced TransPlay oprogramowania testera CMC, b) wizualizacja wyników testu blokady za pomocą oprogramowania SIGRA4

przypadek, w którym wystąpi kołysanie asynchroniczne o częstotliwości kołysań 1 Hz. Trajektoria impedancji podczas tego kołysania powinna przechodzić z prawej strony na lewą płaszczyzny impedancyjnej (węzeł wysyłający) przez pierwszą strefę działania funkcji odległościowej. W chwili, gdy impedancja ruchowa znajdzie się w pierwszej strefie działania funkcji odległościowej, należy zasymulować zwarcie trójfazowe metaliczne.

Na rys. 2 przedstawione zostały przykładowe wyniki badań blokady kołysaniowej przełącznika 7SA522 firmy Siemens, wykonane za pomocą opisaną wyżej metody [2]. Podczas testu zamodelowano kołysanie asynchroniczne o częstotliwości 1 Hz. W trakcie kołysania zamodelowano zwarcie trójfazowe metaliczne (3f) o czasie trwania 200 ms. Po zakończeniu zwarcia kołysanie trwało nadal. Jak widać na rys. 2b, przełącznik 7SA522 poprawnie wykrył zwarcie 3f i dał impuls do wyłączenia trójfazowego. Od chwili wystąpienia zwarcia do chwili podania impulsu na wyłączenie (Trip) przez funkcję odległościową upłynęło ok. 147 ms.

Od chwili wystąpienia zwarcia do chwili odzbudzenia się funkcji blokady upłynęło ok. 67 ms, czyli od momentu odzbudzenia się funkcji blokady do momentu podania impulsu na wyłączenie przez funkcję odległościową upłynęło 80 ms. Takie działanie funkcji odległościowej jest związane z nastawą czasu *Trip delay after Power Swing Blocking: 80 ms* funkcji blokady (funkcja odległościowa działa po czasie 80 ms od momentu odzbudzenia się funkcji blokady).

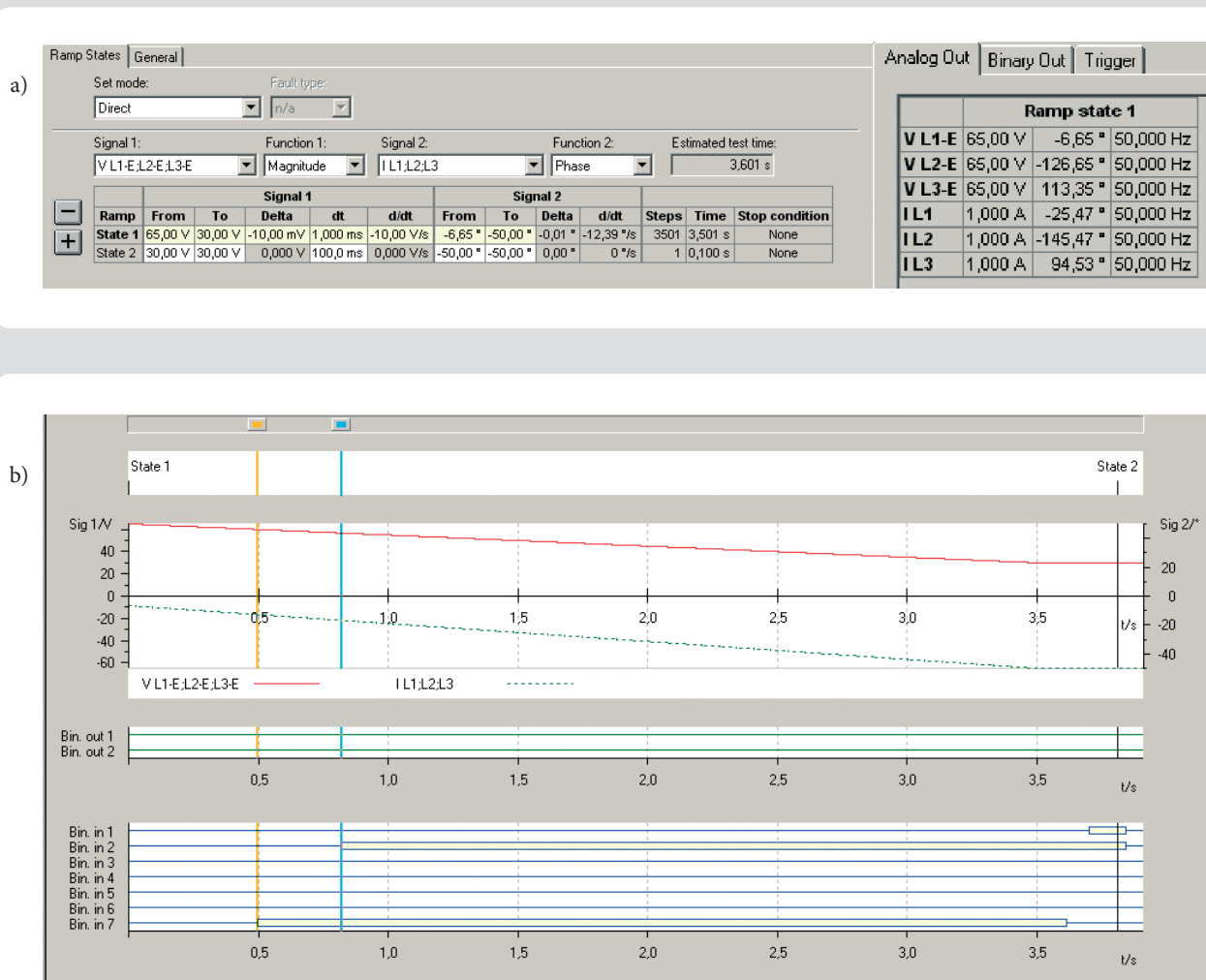
Badania z wykorzystaniem modułów testowych oprogramowania testera mikroprocesorowego

Oprócz sposobu badania blokad kołysaniowych, opisanego wyżej, istnieje możliwość badania blokad za pomocą wybranych modułów testowych oprogramowania testerów mikroprocesorowych. Przykładami modułów testowych oprogramowania Test Universe, testera typu CMC firmy OMICRON electronics, które mogą być wykorzystane do badania blokad kołysaniowych, są moduł Ramping i moduł NetSim [11].

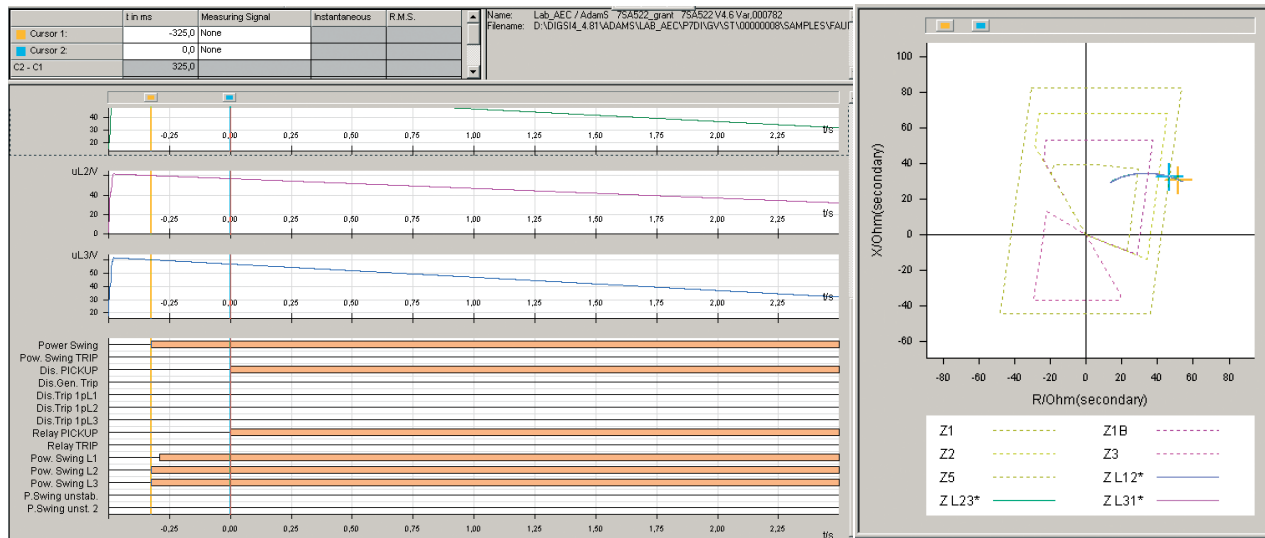
Moduł Ramping. Za pomocą modułu Ramping można modelować wolne i szybkie wejścia impedancji ruchowej w obszar działania stref funkcji odległościowej i sprawdzić poprawność działania blokady kołysaniowej i funkcji odległościowej.

Symulując wolne wejście impedancji ruchowej w obszar stref funkcji odległościowej, można sprawdzić poprawność działania blokady kołysaniowej podczas wolnych zmian impedancji ruchowej, takich jakie mogą występować np. podczas zmian obciążenia (przebiegi prądów i napięć podczas zmian obciążenia mają inne „kształty” niż w kołysaniach mocy). Przy symulacji szybszych zmian impedancji za pomocą modułu Ramping można zasymulować kołysania mocy, a przy symulacji bardzo szybkich zmian impedancji można zasymulować zwarcia.

Testy blokady kołysaniowej wykonywane za pomocą modułu Ramping polegają na zmianach impedancji ruchowej, która wchodzi z obszaru obciążenia ruchowego do obszaru działania funkcji odległościowej.



Rys. 3. Fragmenty okien dialogowych modułu Ramping: a) symulowane zmiany napięć fazowych i prądów podczas wykonywania testu, b) wizualizacja zmian amplitud napięcia i kątów prądów fazowych oraz pobudzenia wejść dwustanowych testera CMC



Rys. 4. Fragmenty zrzutów ekranu zarejestrowanych przebiegów przez rejestrator przełącznika 7SA522

Podczas testów zmieniająca się impedancja powinna przechodzić, na płaszczyźnie impedancyjnej, przez strefy zewnętrzną i wewnętrzną blokady kołysaniowej.

Należy wziąć pod uwagę fakt, że podczas testów z wykorzystaniem tego modułu kształty prądów i napięć nie do końca odpowiadają kształtom prądów i napięć występującym podczas kołysań mocy.

W trakcie badań wykonanych w ramach raportu [2] zmiany napięć i prądów wykonywane były w trzech fazach jednocześnie (zmiany impedancji miały charakter symetryczny). Podczas testów zmieniane były:

- moduły trzech napięć fazowych (z krokiem $t = 1$ ms) między określonymi wartościami progowymi (kąty napięć fazowych nie uległy

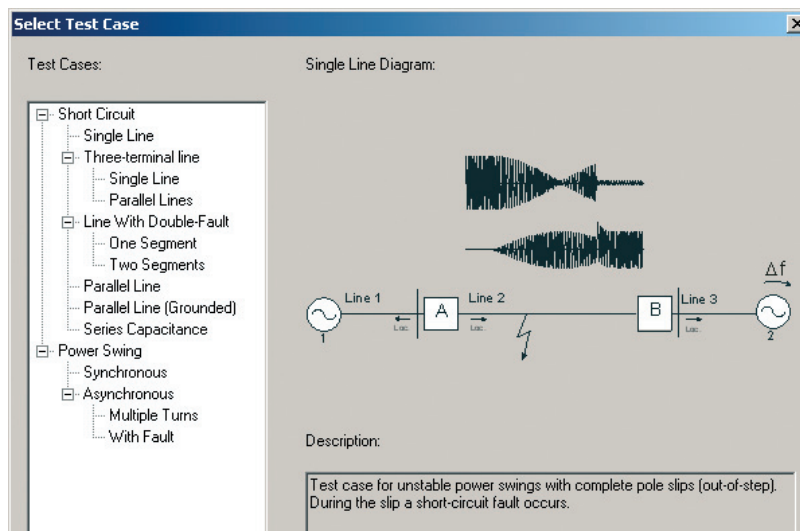
zmianie). Szybkość zmian napięcia określano za pomocą odpowiednich przyrostów napięcia ΔU odpowiadających przyjętemu krokowi czasowemu zmian napięcia Δt

- kąty fazowe trzech prądów fazowych przy stałych wartościach amplitud wymuszanych prądów $I_{w\text{ym}} = 1$ A.

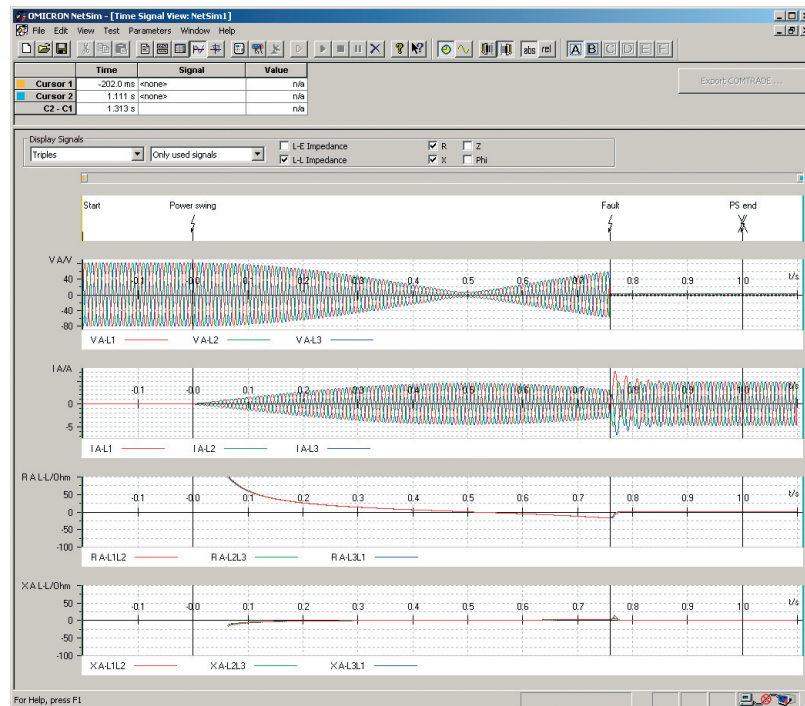
Przykład testu wykonanego za pomocą modułu Ramping, w którym zasymulowano wolne wejście ($10 \Omega/\text{s}$) impedancji ruchowej do strefy 1 funkcji odległościowej przełącznika 7SA522, pokazano na rys. 4. Jak widać na zrzutach ekranu z wynikami przeprowadzonego testu przedstawionego na rys. 4. Jak widać na przedstawionym rysunku, nastąpiło poprawne pobudzenie się blokady kołysaniowej po wejściu impedancji ruchowej w obszar strefy zewnętrznej blokady kołysaniowej.

Moduł NetSim. Moduł ten jest modułem do wykonywania prostych funkcjonalnych testów działania. Odzworowano w nim fragmenty systemu, w których można symulować zwarcia w liniach jednotorowych, dwutorowych i liniach z odczepem. Ponadto istnieje w nim możliwość zasymulowania kołysań synchronicznych, asynchronicznych (ze zwarcie i bez zwarcia w trakcie kołysania). Rodzaje testów, które można wykonać za pomocą modułu NetSim, pokazano na rys. 5.

Na rys. 6 pokazano przykładowe przebiegi otrzymane podczas zamodelowania kołysania asynchronicznego o częstotliwości poślizgu 1 Hz, podczas którego wystąpiło zwarcie 3f metaliczne na początku linii L2 (rys. 5).



Rys. 5. Rodzaje testów dostępne w module NetSim



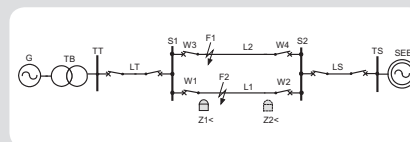
Rys. 6. Przebiegi kołysań asynchronicznych, podczas których wystąpiło zwarcie 3f wygenerowane za pomocą modułu NetSim

3.2. Badanie blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym

Badanie blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym powinno, w porównaniu z badaniami w zakresie podstawowym, dodatkowo uwzględniać zamodelowanie zakłóceń nietypowych, wymienionych w rozdz. 2 artykułu. Do badań tego typu fragment SEE powinien być dość dokładnie zamodelowany (dokładne modele generatora i jego regulatorów, dokładne modele przekładników prądowych i napięciowych, możliwość sterowania jednofazowego wyłączników itp.).

Do badania blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym może zostać wykorzystany układ przedstawiony na rys. 7. W układzie tym generator (i jego układy regulacji) oraz transformator blokowy zostały dokładnie zamodelowane. Zamiast jednej linii (rys. 1) przewidziano dwa tory linii (podczas badań dodatkowo można uwzględniać sprzężenie magnetyczne między torami równoległymi linii). Linie mogą zostać zamodelowane za pomocą czwórników typu PI (reaktancje i rezystancje wzdłużne, susceptancje poprzeczne) lub też z wykorzystaniem modelu częstotliwościowego (uwzględnianie parametrów słupów, zależności parametrów linii od częstotliwości itp.). Pewnym uproszczeniem układu testowego z rys. 7 może być wykorzystanie zamiast generatora i transformatora blokowego sterowanego źródła napięciowego. W takim przypadku kąt $\delta(t)$ napięcia tego źródła może być zmieniany z wykorzystaniem prostego regulatora bazującego na równaniu ruchu wirnika generatora.

W różnych miejscach układu w trakcie kołysań mocy powinna istnieć możliwość zamodelowania zwarć typu 3f, 3f-n, 2f, 2f-n, 1f-n o różnych rezystancjach przejścia R_f : w zwarcjach międzyfazowych od $R_f = 0$ (zwarcia metaliczne) do kilkudziesięciu omów, natomiast w zwarcjach doziemnych



Rys. 7. Układ dwumaszynowy do sprawdzania blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym

od $R_f = 0$ w przypadku zwarć metalicznych (rzadko spotykanych) do R_f wynoszących setki omów (w zwarcjach jednofazowych wysokooporowych). Zakłada się, że zwarcia doziemne niskooporowe mają rezystancję przejścia $R_f < 20 \Omega$, a zwarcia doziemne wysokooporowe mają rezystancję przejścia w zakresie $R_f = (100 \div 200) \Omega$. Oprócz zwarć pojedynczych powinna istnieć możliwość zamodelowania zwarć wielokrotnych (w różnych miejscach linii) oraz zwarć rozwijających się, np. zwarcie 1f-n przechodzące po określonym czasie w zwarcie 2f-n, a potem w zwarcie 3f-n. Dodatkowo oprócz zwarć czysto rezystancyjnych mogą zostać zamodelowane stany przejściowe w prądach i napięciach pojawiające się podczas zwarć łukowych. Należy tu mieć na uwadze:

- łuk pierwotny (ang. *primary arc*) związany z przepływem dużego prądu, który

występuje w miejscu zwarcia od chwili jego wystąpienia do momentu, kiedy w linii przestanie płynąć prąd

- łuk wtórny (ang. *secondary arc*) po otwarciu jednobiegunowym wyłącznika (przerwa bezprądowa w cyklu SPZ jednofazowego), który jest podtrzymywany wskutek sprzężenia magnetycznego faz linii, a więc z przepływem małego prądu (prądy rzędu dziesiątek amperów).

Przekładniki prądowe i napięciowe w punkcie przekątnikowym powinny zostać zamodelowane jako rzeczywiste, z uwzględnieniem ich charakterystyk magnesowania. Dzięki czemu będzie istniała możliwość sprawdzenia wpływu nasycenia przekładników prądowych oraz stanów przejściowych w pojemnościowych przekładnikach napięciowych na działanie blokad kołysaniowych.

W wyłącznikach powinna istnieć możliwość sterowania poszczególnymi biegunami wyłącznika w celu realizacji cyklu SPZ jednofazowego.

W zamodelowaniu fragmentu SEE zbliżonego do rzeczywistego nie ma możliwości przeprowadzenia niektórych badań, które były możliwe w badaniach w zakresie podstawowym (przy wykorzystaniu sterowanych źródeł napięcia). Przykładowo istnieje możliwość zamodelowania kołysań asynchronicznych tylko o jednej, określonej częstotliwości, wynikającej z parametrów zamodelowanego układu. Natomiast nie ma możliwości (bez ingerencji w parametry zamodelowanego układu) zamodelowania kołysań o różnych częstotliwościach.

Ponadto dla zamodelowanego fragmentu SEE, przeznaczonego do badań blokady w zakresie rozszerzonym, należy się liczyć ze stałymi współczynnikami k_x i k_E wynikającymi z parametrów zamodelowanego układu i rozplywu mocy.

W ramach rozszerzonego zakresu badań blokady kołysaniowe powinny zostać sprawdzone z uwzględnieniem następujących sytuacji:

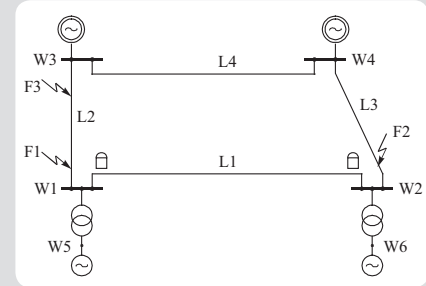
- kołysań asynchronicznych (synchronicznych) modelowanych w ten sposób, że w różnych miejscach linii L2 generowane są zwarcia 3f (F1 na rys. 7) o zdefiniowanym wcześniej czasie trwania. Po zdefiniowanym czasie trwania zwarcia otwierane są wyłączniki W3, W4 linii, a co za tym idzie linia L2 jest wyłączana. W punktach przekaźnikowych (przy wyłącznikach W1, W2) w linii L1 można zaobserwować zmiany impedancji, jak dla kołysań asynchronicznych (synchronicznych) w węźle odbiorczym i wysyłającym. W celu zamodelowania kołysań synchronicznych czas zwarcia F1 (i otwarcie wyłączników w linii L2) powinien być na tyle krótki, aby generator nie wypadł z synchronizmu
- kołysań (asynchronicznych i synchronicznych) modelowanych w ten sposób, że przy wyłączniku W4 linii L2 generowane jest zwarcie 3f (F1 na rys. 7). Po czasie działania pierwszej strefy zabezpieczenia odległościowego otwierany jest wyłącznik W4, a po czasie działania drugiej strefy zabezpieczenia odległościowego otwierany jest wyłącznik W3 linii L2. Dzięki takiemu działaniu występuje nierównomierna likwidacja zwarcia F2. W punktach przekaźnikowych (przy wyłącznikach W1, W2) w linii L1 można zaobserwować zmiany impedancji jak dla kołysań asynchronicznych w węźle odbiorczym i wysyłającym
- zwarc zewnętrżnych 3f (w linii L2 na rys. 7), podczas których impedancja ruchowa w punktach przekaźnikowych linii L1 po likwidacji zwarcia zewnętrżnego nie wychodzi poza strefę zewnętrżną blokady i wchodzi (na skutek powstałych po likwidacji zwarcia kołysań) w obszar strefy pierwszej funkcji odległościowej
- długotrwałych zwarc zewnętrżnych 3f (w liniach L2, LT i LS na rys. 7), podczas których impedancja ruchowa w punktach przekaźnikowych linii L1 wchodzi (w trakcie trwania zwarcia) w obszar strefy pierwszej funkcji odległościowej
- zwarc wewnętrznych F2 (w linii L1) typu 3f, 3f-n, 2f, 2f-n, 1f-n, występujących w trakcie kołysań mocy (synchronicznych i asynchronicznych), gdy impedancja ruchowa znajdzie się w obszarze strefy wewnętrznej blokady kołysaniowej (dla różnych kątów napięć fazowych w punkcie przekaźnikowym). Zwarcia (F1 na rys. 7) powinny być zamodelowane w strefie pierwszej, drugiej, trzeciej i wstecznej. Zamodelowane zwarcia powinny być o różnych rezystancjach przejścia R_f : w zwarciach międzyfazowych od $R_f = 0$ (zwarcia metaliczne) do kilkudziesięciu omów, natomiast w zwarciach doziemnych od $R_f = 0$ (zwarcia metaliczne)

do setek omów (zwarcia wysokooporowe). Można przyjąć, że zwarcia doziemne niskooporowe mają rezystancję przejścia $R_f < 20 \Omega$, a zwarcia doziemne wysokooporowe mają rezystancję przejścia w zakresie $R_f = (100-200) \Omega$

- zwarc rozwijających się w linii L1, np. zwarcie 1f-n przechodzące po określonym czasie w zwarcie 2f-n, a potem w zwarcie 3f-n lub zwarcie 2f przechodzące po określonym czasie w zwarcie 3f. Czas między kolejnymi zwarciami powinien być większy od 50 ms
- zwarc w linii L1 występujących podczas kołysań, w trakcie których występuje nasycenie przekładników prądowych
- zwarc łukowych w linii L1 podczas kołysań (synchronicznych i asynchronicznych), gdy impedancja ruchowa znajdzie się w obszarze strefy działania funkcji odległościowej. Zwarcia powinny być zamodelowane w strefie pierwszej, drugiej, trzeciej i wstecznej
- zwarcia jednofazowego w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ jednofazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach (w czasie przerwy bezprądowej) zmieniają się jak podczas kołysań mocy
- zwarcia jednofazowego w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ jednofazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach (w czasie przerwy bezprądowej) zmieniają się jak podczas kołysań mocy. Podczas przerwy bezprądowej cyklu SPZ należy zamodelować łuk wtórny
- zwarcia jednofazowego w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ jednofazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach (w czasie przerwy bezprądowej) zmieniają się jak podczas kołysań mocy. Dodatkowo w czasie przerwy bezprądowej należy zamodelować kolejne zwarcie jednofazowe (w jednej ze zdrowych faz)
- różnego miejsca umieszczenia przekaźnika podczas kołysań (przy wyłączniku W1 lub wyłączniku W2) w celu sprawdzenia poprawności działania blokady kołysaniowej w węźle wysyłającym i odbiorczym.

Podczas przeprowadzania badań blokady kołysaniowych w zakresie rozszerzonym należy wyżej wymienione przypadki łączyć ze sobą. Przykładowo należy zamodelować przypadek, w którym wystąpi kołysanie asynchroniczne (modelując odpowiednio długie zwarcie F1 w linii L2) w węźle wysyłającym (trajektoria impedancji podczas tego kołysania powinna przechodzić z prawej strony na lewą płaszczyzny impedancyjnej) przez pierwszą strefę działania funkcji odległościowej. W chwili, gdy impedancja ruchowa znajdzie się w strefie działania funkcji odległościowej ($Z1 <$ na rys. 7), należy zasymulować zwarcie jednofazowe wysokooporowe (F2 na rys. 7) likwidowane w cyklu SPZ jednofazowego. Podczas przerwy bezprądowej tego cyklu powinno zostać zasymulowane w jednej ze zdrowych faz kolejne zwarcie jednofazowe. Oczywiście można sobie wyobrazić bardziej rozbudowane układy testowe

wykorzystywane do badań w układzie rozszerzonym niż ten przedstawiony na rys. 7, np. układ czteromaszynowy (rys. 8) lub siedmiomaszynowy (CIGRE Test System) [1]. Układy wielomaszynowe bardziej rozbudowane niż ten przedstawiony na rys. 7



Rys. 8. Układ czteromaszynowy do sprawdzania blokady kołysaniowych w zakresie rozszerzonym

(np. układ siedmiomaszynowy) są jednak – zdaniem autora artykułu – bardziej przydatne do sprawdzania systemu zabezpieczeń związanych z kołysaniami mocy [1] (w tym zabezpieczeń odległościowych bloku generator – transformator, zabezpieczeń podimpedancyjnych generatora, zabezpieczeń rozcinających sieć, zabezpieczeń od poślizgu biegunów generatora) niż do dokładnego badania blokady kołysaniowych pojedynczych zabezpieczeń odległościowych, ponieważ liczba wariantów zakłóceń, jakie można zasymulować, jest o wiele większa niż w układzie pokazanym na rys. 7.

4. Podsumowanie

Funkcje blokady kołysaniowych są integralną częścią zabezpieczeń odległościowych i wspomagają pracę funkcji zabezpieczeń odległościowych podczas zakłóceń, jakimi są kołysania mocy. W uproszczeniu, blokada kołysaniowa powinna blokować działanie funkcji odległościowej podczas kołysań mocy, gdy impedancja ruchowa wejdzie w obszar stref działania funkcji odległościowej, i nie blokować działania stref funkcji odległościowej podczas zwarc.

Funkcje blokady kołysaniowych, tak jak i inne funkcje zabezpieczeniowe, powinny być badane. Badania powinny dotyczyć zarówno sprawdzenia poprawności nastawienia blokady, jak i jej poprawności zachowania się podczas specyficznych warunków systemowych. Mogą one mieć charakter badań w zakresie:

- podstawowym, podczas których sprawdzane jest zachowanie się blokady w typowych sytuacjach, z jakimi mają one do czynienia podczas swojej pracy (np. kołysania synchroniczne i asynchroniczne o różnej częstotliwości, zwarcia w trakcie kołysań mocy)
- rozszerzonym, podczas których badane jest zachowanie blokady w nietypowych sytuacjach (np. kołysania w zdrowych fazach podczas przerwy bezprądowej w cyklu SPZ jednofazowego, długotrwałe zwarcia zewnętrżne).

Do badań blokad kołysaniowych można wykorzystać oprogramowanie, w które są wyposażone testery mikroprocesorowe. Takie podejście pozwala na sprawdzenie blokad w ograniczonym zakresie. Bardziej wyrafinowane metody sprawdzania blokad kołysaniowych polegają na zamodelowaniu fragmentu SEE i zakłóceń w nim występujących w programie symulacyjnym, a następnie ich odtworzeniu (prądy i napięcia po stronie wtórnej przekładników prądowych) za pomocą testerów mikroprocesorowych i ocenie poprawności jego działania na podstawie zachowania się badanego urządzenia.

Zaletą testowania blokad z wykorzystaniem modułów testowych oprogramowania testerów mikroprocesorowych jest możliwość stosunkowo łatwego i szybkiego ich wykonania. Wadą – możliwość wykonania badań jedynie dla prostych i typowych przypadków zakłóceń.

Zaletą testowania blokad z wykorzystaniem oprogramowania do symulacji stanów dynamicznych w SEE jest możliwość wykonania badań zarówno w prostych, jak i nietypowych zakłóceniach. Wadą – stosunkowo długotrwały proces badania blokady kołysaniowej, na który składa się czas potrzebny do zamodelowania układu testowego i wybranych zakłóceń oraz odtworzenie przebiegów będących wynikiem symulacji za pomocą testera mikroprocesorowego.

Bibliografia

1. Machowski J., Smolarczyk A., Brzeszczak L., Opracowanie zasad nastaw blokad przeciwkołysaniowych zabezpieczeń pod kątem odbudowy systemu, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej, praca badawczo-rozwojowa zlecona przez PSE-Operator SA, umowa nr SR/RB/IS/008/05, Warszawa 2005.
2. Smolarczyk A., Nowe metody selektywnego rozróżniania kołysań mocy od zwarć oporowych, rozwijających się i innych złożonych zakłóceń zapewniające niezawodną pracę zabezpieczeń odległościowych, projekt badawczy własny MNiSW, nr N N511 358234, Warszawa 2008–2010.
3. Smolarczyk A., Blokady przeciwkołysaniowe stosowane w zabezpieczeniach odległościowych, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010, nr 10, s. 21–28, ISSN 0043-5112.
4. Smolarczyk A., Blokady przeciwkołysaniowe stosowane w zabezpieczeniach odległościowych, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa – APE'11, Jurata 8–10 czerwca 2011, tom 2, s. 13–22.
5. Smolarczyk A., Sytuacje i czynniki mogące powodować nieprawidłowe działanie blokad przeciwkołysaniowych, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010, nr 11, s. 7–12.
6. CIGRE, Analysis and guidelines for testing numerical protection schemes, CIGRE Report No. 159, Working Group 34.10, August 2000.
7. Smolarczyk A., Badanie przekaźników elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2004, nr 11.
8. Smolarczyk A., Metody testowania przekaźników elektroenergetycznych, *Automatyka Elektroenergetyczna* 2004, nr 2, s. 22–29.
9. Steinhäuser F., Testing of the power swing blocking in distance relays, OMICRON User Meeting 2000, Monachium 2000.
10. Meinhardt P., Testing approaches for the power swing blocking function, International Protection Testing Symposium, OMICRON electronics, Vienna 2009.
11. OMICRON electronics: Opis oprogramowania Test Universe v.2.30, [online, 2010] <http://www.omicron.at/>.
12. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Informacje o programie P S C A D / E M T D C v. 4. 2. 1, [online, 2012] <http://www.pscad.com/>.

Adam Smolarczyk

dr inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: Adam.Smolarczyk@ien.pw.edu.pl

Absolwent Politechniki Warszawskiej. W grudniu 1999 roku rozpoczął pracę w Instytucie Elektroenergetyki PW. Obecnie jest adiunktem na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Autor oraz współautor raportów z badań cyfrowych przekaźników elektroenergetycznych. Jego zainteresowania naukowe związane są z cyfrową elektroenergetyczną automatyką zabezpieczeniową oraz modelowaniem zjawisk występujących w systemach elektroenergetycznych.