VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SYSTÉM CHRÁNĚNÍ S VYUŽITÍM VÝSTUPU Z ELEKTRONICKÉHO SENZORICKÉHO SYSTÉMU MĚŘENÍ PROUDU A NAPĚTÍ

THE PROTECTION SYSTEM WORKING ON OUTPUT OF ELECTRONIC SENSOR SYSTEM MEASURING CURRENT AND VOLTAGE

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Tomáš Bajánek
AUTHOR

ŠKOLITEL — doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2017

Bibliografická citace práce:

BAJÁNEK, T. Systém chránění s využitím výstupu z elektronického senzorického systému měření proudu a napětí. Dizertační práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017, 136 stran.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Rád by som sa na tomto mieste poďakoval doc. Ing. Jaroslave Országovej Ph.D., za odborné vedenie mojej dizertačnej práce, prístup pri konzultáciách, cenné rady a podporu počas celého môjho štúdia. Ďalej Ing. Stanislavovi Sumcovi Ph.D. za odborné konzultácie v priebehu spracovania dizertačnej práce a Ing. Vojtěchovi Wasserbauerovi za odbornú spoluprácu počas doktorského štúdia.

V Brne dňa 1.8.2017

Ing. Tomáš Bajánek

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Dizertační práce

Systém chránění s využitím výstupu z elektronického senzorického systému měření proudu a napětí

Ing. Tomáš Bajánek

Školitel: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2017

Brno

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Doctoral thesis

The protection system working on output of electronic sensor system measuring current and voltage

by

Ing. Tomáš Bajánek

Supervisor: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Brno University of Technology, 2017

Brno

ABSTRAKT

V súčasnosti dochádza k rozšírenému použitiu alternatívnych technológií merania v elektrických sieťach, medzi ktoré je možné zaradiť prúdové a napäťové senzory. S ich použitím úzko súvisí využitie štandardu IEC 61850-9-2 z dôvodu prenášania meraných hodnôt v rámci rozvodne pre účely ochranných funkcií a merania. Použitie senzorov a využitie komunikačného štandardu IEC 61850 spolu s vysokorýchlostným Ethernetom umožní zjednodušenie koncepcie usporiadania ochranných terminálov v rozvodných zariadeniach a umožňuje rozvíjať nový systém chránenia založený na centrálnej ochrane.

Dizertačná práca je zameraná na ochranné algoritmy, ktoré využívajú SV podľa IEC 61850-9-2 a ich implementáciu do modelu centrálnej ochrany. V úvode je rozpracovaný doterajší vývoj v oblasti chránenia rozvodných zariadení a súčasne dostupné riešenie využívajúce IEC 61850-9-2 a princíp centrálnej ochrany. Práca obsahuje popis algoritmov pre vybrané ochranné funkcie – nadprúdová ochrana, ochrana pri nesymetrii, logická ochrana prípojníc a diferenciálna ochrana. Následne sa práca venuje programovaniu algoritmov ochranných funkcií vo vývojovom prostredí LabView vo forme modelu centrálnej ochrany. Model spracováva dáta z procesnej zbernice podľa štandardu IEC 61850-9-2 a v prípade poruchy posiela GOOSE správu prostredníctvom Ethernetu výkonovému vypínaču. Pre overenie správnej funkcie naprogramovaných ochranných algoritmov bol navrhnutý postup testovania v spolupráci s využitím testovacieho zariadenia OMICRON 256plus, prúdového senzora a merging unit. Výsledky testovania modelu centrálnej ochrany a navrhnutých algoritmov boli porovnané s výsledkami testovania súčasne používaných ochrán.

V závere sa práca zaoberá zhodnotením prínosu centrálnej ochrany pre chránenie rozvodných zariadení a možnosťami ďalšieho využitia vytvoreného modelu centrálnej ochrany. Práca poukazuje na nový spôsob chránenia elektrizačnej sústavy využívajúc digitálne dáta z MU prostredníctvom procesnej zbernice popísanej v IEC 61850-9-2.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: Sampled Values, IEC 61850-9-2, nadprúdová ochrana, ochrana pri nesymetrii, diferenciálna ochrana, smerové relé, ochranné relé, LabView, merging unit

ABSTRACT

At present, there is a widespread use of alternative measurement technologies in electrical networks that include current and voltage sensors. Their use is closely related to the use of IEC 61850-9-2 for data transfer of measured values within the substation for the purpose of protection and measurement. The use of sensors and communication standard IEC 61850 together with high-speed Ethernet will simplify the concept of the arrangement of protection terminals in substations and enable the development of a new protection system based on central protection.

The dissertation is focused on protection algorithms, which use the SV according to IEC 61850-9-2, and their implementation into the central protection model. Thesis describes development in the field of protection of substations and the currently available solutions using IEC 61850-9-2 and the principle of central protection. Thesis explains algorithms for selected protection functions - overcurrent protection, negative sequence overcurrent protection, logic busbar protection and differential protection. Further, thesis deals with the programming of protection function algorithms in LabView development environment in the form of a central protection model. The model processes data from a process bus according to IEC 61850-9-2 and sends a GOOSE message over Ethernet in the event of a failure. To verify the correct function of the programmed protection algorithms, a testing procedure was developed using OMICRON 256plus, the current sensor and the merging unit. The results of the testing of the central protection model and the proposed algorithms were compared with the results of testing the currently used protections.

At the end, the thesis deals with the assessment of the benefits of central protection for protecting substations and the possibility of further utilization of the central protection model. The thesis highlights a new way of protecting the electrification system using digital data from MU transferred via the process bus described in IEC 61850-9-2.

KEY WORDS: Sampled Values, IEC 61850-9-2, overcurrent protection, negative sequence overcurrent protection, directional relay, protection relay, LabView, merging unit

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV **10**

ZOZNAM TABULIEK **14**

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK **16**

1 ÚVOD **21**

2 DOTERAJŠÍ VÝVOJ **22**

2.1 VÝVOJ ELEKTRICKÝCH OCHRÁN **22**

2.1.1 ELEKTROMECHANICKÉ OCHRANY 22
2.1.2 ELEKTRONICKÉ OCHRANY 22
2.1.3 DIGITÁLNE OCHRANY 22

2.2 CENTRÁLNA OCHRANA **23**

2.2.1 WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION – USA 23
2.2.2 SIPSUR – ŠPANIELSKO 24
2.2.3 ONTARIO HYDRO IPACS SYSTEM – KANADA 24
2.2.4 VATTENFALLS PROJECT – ŠVÉDSKO 25
2.2.5 TYPICKÁ ARCHITEKTÚRA CENTRÁLNEJ OCHRANY 25

2.3 LOCAMATION SASENSOR – CENTRÁLNA OCHRANA **26**

2.3.1 BIM641 – BREAKER INTERFACE MODULE 27
2.3.2 CIM631 – CURRENT INTERFACE MODULE 27
2.3.3 VIM622 – VOLTAGE INTERFACE MODULE 27
2.3.4 VCU106 – VERSATILE COMMUNICATION UNIT 28
2.3.5 CCU600 – CENTRAL CONTROL UNIT 28

2.4 IEC 61850-9-2 ..... **28**

2.5 MERGING UNIT **29**

2.6 NEKONVENČNÉ PRÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY **30**

2.6.1 PRÚDOVÉ SENZORY 30
2.6.2 NAPÄŤOVÉ SENZORY 31

2.7 APLIKÁCIE PROCESS BUS PODĽA IEC 61850-9-2 ..... **31**

2.7.1 UNIGEAR DIGITAL - ARCHITEKTÚRA ROZVODNÍ VYSOKÉHO NAPÄTIA 31
2.7.2 SIEMENS SIPROTEC 6MU805 34
2.7.3 IMPLEMENTÁCIA IEC 61850-9-2 – ENERGINET, DÁNSKO 35
2.7.4 TESTOVANIE PROCESS BUS A IEC 61850-9-2 36

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE **38**

4 POPIS OCHRANNÝCH FUNKCIÍ **39**

4.1 NADPRÚDOVÁ OCHRANA **39**

4.1.1 ROZDELENIE NADPRÚDOVÝCH OCHRÁN 40
4.1.2 ALGORITMUS NADPRÚDOVEJ OCHRANY 42

4.2 SMEROVÝ ČLEN **46**

4.2.1 POLARIZÁCIA PODĽA ZDRUŽENÝCH NAPÄTÍ 46
4.2.2 POLARIZÁCIA PODĽA FÁZOVÝCH NAPÄTÍ 48
4.2.3 POLARIZÁCIA PODĽA SPÄTNEJ ZLOŽKY NAPÄTÍ 50

4.2.4 POLARIZÁCIA PODĽA SÚSLEDNEJ ZLOŽKY NAPÄTÍ 50
4.2.5 ZÁZNAM NAPÄTÍ PRE SMEROVÝ ČLEN 52
4.3 LOGICKÁ OCHRANA PRÍPOJNÍC 52
4.3.1 POPIS ALGORITMU LOGICKEJ OCHRANY PRÍPOJNÍC 53
4.4 OCHRANA PRI NESYMETRII 53
4.4.1 POPIS ALGORITMU OCHRANY PRI NESYMETRII 54
4.5 DIFERENCIÁLNA OCHRANA 55
4.5.1 PRIEČNA DIFERENCIÁLNA OCHRANA 55
4.5.2 POZDĹŽNA DIFERENCIÁLNA OCHRANA 58
4.5.3 VPLYV PRÚDOVÝCH SENZOROV NA CHARAKTERISTIKU DIFERENCIÁLNEJ OCHRANY 61
4.5.4 POPIS ALGORITMU DIFERENCIÁLNEJ OCHRANY 62
5 MODEL CENTRÁLNEJ OCHRANY V LABVIEW 64
5.1 SOFTWAROVÉ NÁSTROJE PRE FUNKCIU MODELU CENTRÁLNEJ OCHRANY 65
5.1.1 SVA - SAMPLED VALUE ANALYSER 65
5.1.2 KNIŽNICA SVRLIB 66
5.1.3 SVG - SAMPLED VALUE GENERATOR 67
5.2 POPIS MODELU CENTRÁLNEJ OCHRANY 68
5.2.1 IMPORT HODNÔT POMOCOU KNIŽNICE SVRLIB 68
5.2.2 MERACIE FUNKCIE MODELU 70
5.3 OCHRANNÉ FUNKCIE MODELU 74
5.3.1 MŽIKOVÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA 74
5.3.2 ČASOVO NEZÁVISLÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA 75
5.3.3 ČASOVO ZÁVISLÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA 77
5.3.4 SMEROVÉ RELÉ PRE ČASOVO ZÁVISLÚ/NEZÁVISLÚ NADPRÚDOVÚ OCHRANU 78
5.3.5 LOGICKÁ OCHRANA PRÍPOJNÍC 79
5.3.6 OCHRANA PRI NESYMETRII 80
5.3.7 DIFERENCIÁLNA OCHRANA 81
5.4 TESTOVANIE MODELU CENTRÁLNEJ OCHRANY 83
5.4.1 TESTOVANIE POMOCOU OMICRON 256PLUS 84
5.4.2 TESTOVANIE POMOCOU VYVINUTÉHO HARDWARE 84
5.4.3 TESTOVANIE POMOCOU SOFTWAROVÝCH NÁSTROJOV 86
5.4.4 POPIS ZARIADENÍ PRE TESTOVANIE 87
5.4.5 MŽIKOVÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA 91
5.4.6 ČASOVO NEZÁVISLÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA 93
5.4.7 ČASOVO ZÁVISLÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA 96
5.4.8 SMEROVÉ RELÉ PRE ČASOVO ZÁVISLÚ/NEZÁVISLÚ NADPRÚDOVÚ OCHRANU 98
5.4.9 LOGICKÁ OCHRANA PRÍPOJNÍC 101
5.4.10 OCHRANA PRI NESYMETRII 103
5.4.11 DIFERENCIÁLNA OCHRANA 105
5.5 NEISTOTY NAVRHNUTÝCH ALGORITMOV OCHRANNÝCH FUNKCIÍ 109
5.5.1 VYHODNOTENIE NEISTOTY JEDNOTLIVÝCH ČLENOV MERACIEHO REŤAZCA 109
5.5.2 VYHODNOTENIE NEISTOTY NAVRHNUTÝCH OCHRANNÝCH ALGORITMOV 110
5.6 TESTY KOMPATIBILITY MU 124
5.7 TEST KAPACITY ETHERNETU PRE IEC 61850-9-2 SV 124
5.8 TEST SPRACOVANIA IEC 61850-9-2 SV V LABVIEW 125
6 ZHODNOTENIE PRÍNOSU CENTRÁLNEJ OCHRANY 126

7 ZÁVER **128**
7.1 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE **129**
7.2 NÁVRH ĎALŠIEHO POSTUPU **129**
POUŽITÁ LITERATÚRA **130**
PUBLIKÁCIE AUTORA **133**
PRODUKTY AUTORA **134**
CURRICULUM VITAE **135**

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Bloková schéma systému WESPAC 23
Obr. 2 Koncept záložného CPU v projekte SIPSUR 24
Obr. 3 Bloková schéma systému Ontario Hydro IPACS 24
Obr. 4 Bloková schéma pre systém Vattenfalls – Gotland – Švédsko 25
Obr. 5 Tradičná architektúra centrálnej ochrany 25
Obr. 6 Bloková schéma centrálnej ochrany firmy Locamation 26
Obr. 7 Modul BIM641 27
Obr. 8 Modul CIM631 27
Obr. 9 Modul VIM622 27
Obr. 10 Modul VCU106 28
Obr. 11 Centrálna riadiaca jednotka CCU600 28
Obr. 12 Funkčná hierarchia podľa IEC 61850 29
Obr. 13 Blokový diagram MU 29
Obr. 14 Princíp Rogowskeho cievky 30
Obr. 15 Odporový delič 31
Obr. 16 UniGear ZS1 Digital 32
Obr. 17 Jednopólová schéma rozvodne využívajúca riešenie UniGear Digital 32
Obr. 18 IED ABB REF615 33
Obr. 19 Siemens SIPROTEC 6MU80 34
Obr. 20 Ovládací panel Siemens SIPROTEC 6MU80 34
Obr. 21 A – Prúdový senzor v rozvodni 400kV firmy Energinet, Dánsko; B – 19“ rack s ochranami Alstom a MU 35
Obr. 22 Model prenosového vedenia 36
Obr. 23 Konfigurácia zapojenia pri teste porovnania vypínacích časov 36
Obr. 24 Konfigurácia pri teste preťaženia procesnej zbernice 36
Obr. 25 Závislosť vypínacieho času na zaťažení procesnej zbernice 37
Obr. 26 Základný blokový diagram nadprúdovej ochrany 39
Obr. 27 Krivka charakteristiky mžikovej nadprúdovej ochrany 40
Obr. 28 Krivka charakteristiky časovo nezávislej nadprúdovej ochrany 40
Obr. 29 Krivka charakteristiky časovo závislej nadprúdovej ochrany 41
Obr. 30 Závislosť prúdu na čase – výsledky predikčného algoritmu v MS Excel 44
Obr. 31 Charakteristika pevného časového nulovania podľa IEC 60255-151 45

Obr. 32 Konfigurovateľné parametre smerového členu 46

Obr. 33 Fázorový diagram jednofázovej zemnej poruchy 47

Obr. 34 Fázorový diagram dvojfázového skratu medzi fázami B a C 48

Obr. 35 Fázorový diagram jednofázovej zemnej poruchy 49

Obr. 36 Fázorový diagram dvojfázového skratu medzi fázami B a C 49

Obr. 37 Fázorové diagramy pre jednofázovú zemnú poruchu vo fáze A-N (A) a dvojfázový skrat medzi fázami B a C (B), v prípade ak je ako polarizačná premenná uvažovaná spätná zložka napätia 50

Obr. 38 Fázorové diagramy pre jednofázovú zemnú poruchu vo fáze A-N (A) a dvojfázový skrat medzi fázami B a C (B), v prípade ak je ako polarizačná premenná uvažovaná súsledná zložka napätia 51

Obr. 39 Bloková schéma funkcie logickej ochrany prípojníc 52

Obr. 40 Charakteristika ochrany pri nesymetrii 53

Obr. 41 Vypínacia charakteristika diferenciálnej ochrany prípojníc 56

Obr. 42 Princíp priečnej diferenciálnej ochrany 56

Obr. 43 Pripojenie nízkoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc 57

Obr. 44 Princíp vysokoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc 57

Obr. 45 Princíp vysokoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc 58

Obr. 46 Bloková schéma pozdĺžnej diferenciálnej ochrany 59

Obr. 47 Vypínacia charakteristika pozdĺžnej diferenciálnej ochrany 59

Obr. 48 Vypínacia charakteristika difernciálnej ochrany s uvažovaním výhod prúdových senzorov 62

Obr. 49 Grafické užívateľské rozhranie Central Protection Relay Model 64

Obr. 50 Grafické užívateľské rozhranie Sampled Value Analyser 65

Obr. 51 Zdrojový kód aplikácie pre prenos dát a ich zobrazenie v LabView 66

Obr. 52 Grafické užívateľské rozhranie Sampled Value Generator 67

Obr. 53 Zdrojový kód použitia funkcií knižnice SVRLIB v LabView 68

Obr. 54 Definovanie uloženia súboru Streams.xml 68

Obr. 55 Definovanie uloženia súboru Streams.xml v grafickom užívateľskom prostredí 69

Obr. 56 Funkcia knižnice SVRLIB pre posielanie GOOSE správ 69

Obr. 57 Zdrojový kód predikčného algoritmu v LabView 70

Obr. 58 Zdrojový kód algoritmu pre výpočet RMS v LabView 71

Obr. 59 Zdrojový kód pre výpočet Fourierovej transformácie 73

Obr. 60 Nastavenie meracej funkcie v grafickom užívateľskom prostredí 73

Obr. 61 Zobrazenie meraných hodnôt v grafickom užívateľskom prostredí 73

Obr. 62 Zdrojový kód mžikovej nadprúdovej ochrany *74*

Obr. 63 Nastavenie mžikovej nadprúdovej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí *74*

Obr. 64 Zdrojový kód časovo nezávislej nadprúdovej ochrany *75*

Obr. 65 Zdrojový kód časovača *76*

Obr. 66 Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí *76*

Obr. 67 Zdrojový kód časovo závislej nadprúdovej ochrany *77*

Obr. 68 Nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí ... *77*

Obr. 69 Zdrojový kód smerového relé *78*

Obr. 70 Nastavenie smerového relé pre nadprúdovú ochranu v grafickom užívateľskom prostredí *78*

Obr. 71 Zdrojový kód logickej ochrany prípojníc *79*

Obr. 72 Nastavenie logickej ochrany prípojníc v grafickom užívateľskom prostredí *79*

Obr. 73 Zdrojový kód ochrany pri nesymetrii *80*

Obr. 74 Nastavenie ochrany pri nesymetrii v grafickom užívateľskom prostredí *80*

Obr. 75 Zdrojový kód diferenciálnej ochrany *81*

Obr. 76 Nastavenie diferenciálnej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí *82*

Obr. 77 Bloková schéma zapojenia pre testovanie referenčných ochrán firmy ABB *83*

Obr. 78 Bloková schéma zapojenia pre testovanie Central Protection Relay Model *84*

Obr. 79 Bloková schéma pre testovanie Central Protection Relay Model s MU *85*

Obr. 80 Bloková schéma pre testovanie diferenciálnej ochrany Central Protection Relay Model s MU *85*

Obr. 81 MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT, prúdový senzor ABB KECA 250B1 ..... *86*

Obr. 82 Bloková schéma testovania Central Protection Relay Model s vyvinutými softwarovými nástrojmi *86*

Obr. 83 MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT *87*

Obr. 84 Prúdový senzor ABB KECA 250B1 ..... *88*

Obr. 85 Testovacie zariadenie OMICRON 256plus *89*

Obr. 86 GPS OMICRON CMGPS588 ..... *89*

Obr. 87 PoE Injector TL-POE150S *90*

Obr. 88 Ethernet switch HIRSCHMANN RSP20 ..... *90*

Obr. 89 Nastavenie mžikovej nadprúdovej ochrany pre test v grafickom užívateľskom prostredí *91*

Obr. 90 Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre test v grafickom užívateľskom prostredí *94*

Obr. 91 Nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany pre test v grafickom užívateľskom prostredí *96*

Obr. 92 Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany a smerového relé pre test v grafickom užívateľskom prostredí *99*

Obr. 93 Jednopólová schéma testovanej rozvodne *101*

Obr. 94 Vypínacie charakteristiky ochrany pri nesymetrii *105*

Obr. 95 Vypínacia charakteristika diferenciálnej ochrany *108*

Obr. 96 Bloková schéma pre testovanie neistoty navrhnutých ochranných algoritmov *110*

Obr. 97 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – mžiková nadprúdová ochrana *112*

Obr. 98 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo nezávislá nadprúdová ochrana (test číslo 1) *113*

Obr. 99 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo nezávislá nadprúdová ochrana (test číslo 2) *113*

Obr. 100 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 2 A) *115*

Obr. 101 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 3 A) *115*

Obr. 102 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 4 A) *116*

Obr. 103 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 5 A) *116*

Obr. 104 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 6 A) *117*

Obr. 105 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 7 A) *117*

Obr. 106 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 8 A) *118*

Obr. 107 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 9 A) *118*

Obr. 108 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 10 A) *119*

Obr. 109 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 1) . *120*

Obr. 110 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 2) . *121*

Obr. 111 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 3) . *121*

Obr. 112 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 4) . *122*

Obr. 113 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 5) . *122*

Obr. 114 Priemerné smerodajné odchýlky vypínacích časov navrhnutých ochranných algoritmov *123*

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Typy inverzných kriviek 41
Tab. 2 Rovnice pre výpočet fázového uhla pre polarizáciu podľa združených napätí 47
Tab. 3 Rovnice pre výpočet fázového uhla pre polarizáciu podľa fázových napätí 49
Tab. 4 Rovnice pre výpočet fázového uhla pre polarizáciu podľa súslednej zložky napätí 51
Tab. 5 Príklad exportovaného súboru zo Sampled Value Analyser vo formáte CSV 66
Tab. 6 Tabuľka referenčných ochrán od firmy ABB 83
Tab. 7 Parametre prúdového senzora ABB KECA 250B1 88
Tab. 8 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav 91
Tab. 9 Nastavenie parametrov mžikovej nadprúdovej ochrany 91
Tab. 10 Výsledky z testovania mžikovej nadprúdovej ochrany 92
Tab. 11 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu mžikovej nadprúdovej ochrany 92
Tab. 12 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav 93
Tab. 13 Nastavenie parametrov časovo nezávislej nadprúdovej ochrany 93
Tab. 14 Výsledky z testovania časovo nezávislej nadprúdovej ochrany 94
Tab. 15 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu časovo nezávislej nadprúdovej ochrany 95
Tab. 16 Nastavenie parametrov časovo závislej nadprúdovej ochrany 96
Tab. 17 Výsledky z testovania časovo závislej nadprúdovej ochrany 97
Tab. 18 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu časovo závislej nadprúdovej ochrany 97
Tab. 19 Parametre pre bezporuchový stav 98
Tab. 20 Nastavenie parametrov časovo závislej nadprúdovej ochrany a smerového relé 99
Tab. 21 Výsledky z testovania časovo nezávislej nadprúdovej ochrany a smerového relé 100
Tab. 22 Nastavenie parametrov časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre logickú ochranu prípojníc 101
Tab. 23 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav pre skrat vo vývodovej odbočke 102
Tab. 24 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav pre skrat na prípojniciach 102
Tab. 25 Výsledky z testovania logickej ochrany prípojníc 103
Tab. 26 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu logickej ochrany prípojníc 103
Tab. 27 Nastavenie parametrov ochrany pri nesymetrii 103
Tab. 28 Parametre generovaného poruchového signálu 104
Tab. 29 Výsledky z testovania ochrany pri nesymetrii pre test číslo 1 (K = 12, StartValue = 0,05) 104

Tab. 30 Výsledky z testovania ochrany pri nesymetrii pre test číslo 2 (K = 8, StartValue = 0,12) *104*

Tab. 31 Parametre menovitého prúdu diferenciálnych ochrán *106*

Tab. 32 Hodnoty generovaných prúdov pre testy algoritmu diferenciálnej ochrany *106*

Tab. 33 Nastavenie parametrov diferenciálnej ochrany *106*

Tab. 34 Výsledky z testovania diferenciálnej ochrany *107*

Tab. 35 Odchýlky súradníc vybavovacích bodov diferenciálnej ochrany *107*

Tab. 36 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – mžiková nadprúdová ochrana *111*

Tab. 37 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo nezávislá nadprúdová ochrana *112*

Tab. 38 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana *114*

Tab. 39 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii *120*

Tab. 40 Priemerné smerodajné odchýlky vypínacích časov navrhnutých ochranných algoritmov *123*

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

IEC – International Electrotechnical Commission,

IED – Intelligent Electronic Device,

RTDS – Real Time Digital Simulator,

SV – Sampled Values,

MU – Merging Unit,

SIPSUR – Sistema Integrado de Protección para Subestaciones Rurales,

GE – General Electric,

IEEE – Institue of Electrical and Electronic Engineers,

PES – Power Engineering Society,

USA – United States of America,

EPRI – Electric Power Research Institute,

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition,

WESPAC – Westinghouse Electric Corporation Project,

IPACS – Integrated Protection and Control System,

DESN – Dual Element Spot Network,

CPU – Central Processing Unit,

ABB – Asea Brown Boveri,

AC – Alternating Current,

HVDC – High Voltage Direct Current,

I/O – Input/Output,

DNP – Distributed Network Protocol,

BIM – Breaker Interface Module,

CIM – Current Interface Module,

VIM – Voltage Interface Module,

VCU – Versatile Communication Unit,

CCU – Central Control Unit,

RMS – Root Mean Square – efektívna hodnota,

DFT – Discrete Fourier Transform – diskrétna Fourierova transformácia,

FFT – Fast Fourier Transform – rýchla Fourierova transformácia,

GOOSE – Generic Object Oriented Substation Event,

IDMT – Inverse Definite Minimum Time,

PC – Personal Computer

CON Relay – konvenčná elektrická ochrana,

u_s – okamžitá hodnota výstupného napätia,

M – vzájomná indukčnosť,

i_p – okamžitá hodnota primárneho prúdu,

t – čas,

U_{out} – efektívna hodnota výstupného napätia,

R_1 – rezistancia 1,

R_2 – rezistancia 2,

U_p – efektívna hodnota vstupného napätia,

I_p – hodnota nastavenia nadprúdového článku - nastavený trvale dovolený prúd,

I – efektívna hodnota prúdu,

$I''_{k\,min}$ – minimálna hodnota skratového prúdu,

I_{Zmax} – maximálna okamžitá hodnota prúdu záťaže,

P_z – oblasť pôsobenia ochrany,

P_d – oblasť blokovania ochrany,

t_{vyp} – vypínací čas ochrany,

β – konštanta pre charakteristiku ochrany,

I_n – maximálny menovitý prúd ochrany,

α – konštanta pre charakteristiku ochrany ($\alpha > 0$),

TMS – časový násobiteľ,

f – frekvencia prúdu,

ω_0 – uhlová frekvencia,

I_{AMP} – amplitúda prúdu,

I_{PRESET} – nastavená hodnota prúdu,

P_{NULL} – pomer nulovania,

T_{TRIP} – vypínací čas,

T_{NULL} – čas nulovania po poklese prúdu,

$T_{DEACTIVATION}$ – čas deaktivácie vypínacieho signálu,

S_{rA}, S_{rB}, S_{rC} – rozbehový signál vo fázach A, B, C,

T_{iA}, T_{iB}, T_{iC} – integračná premenná vo fázach A, B, C,

T_{zA}, T_{zB}, T_{zC} – čas zotavenia vo fázach A, B, C,

φ_{RCA} – charakteristický uhol ochrany,

i_A, i_B, i_C – okamžité fázové hodnoty prúdu vo fázach A, B, C,

Δt – vzorkovací interval

i_k, i_{k+1} – dve po sebe idúce vzorky prúdu

I_A, I_B, I_C – efektívna hodnota prúdu vo fázach A, B, C,

$\overline{I}_A$, $\overline{I}_B$, $\overline{I}_C$ – fázory prúdov vo fázach A, B, C,

$\overline{U}_A$, $\overline{U}_B$, $\overline{U}_C$ – fázory napätí vo fázach A, B, C,

$\overline{U}_{AB}$, $\overline{U}_{BC}$, $\overline{U}_{CA}$ – fázory združených napätí,

$\overline{U}^{(2)}$ – fázor spätnej zložky napätia,

$\overline{I}^{(2)}$ – fázor spätnej zložky prúdu,

$\overline{U}^{(1)}$ – fázor súslednej zložky napätia,

T_1 – čas pôsobenia v prívodnej odbočke v prípade ak je porucha v jednej z vývodových odbočiek,

K – pomerné akumulované teplo v rotore za čas T_{nesym},

$i^{(2)}$ – spätná zložka prúdu v pomerných jednotkách,

T_{nesym} – trvanie nesymetrie,

K_{max} – maximálne dovolené pomerné akumulované teplo v rotore,

I_{nG} – menovitý prúd chráneného generátora,

StartValue – hodnota nesymetrie, ktorá je povolená v normálnych prevádzkových podmienkach,

$\left|\overline{I}^{(2)}\right|$ – veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu,

$\overline{a}$ – matematická premenná určená – $\overline{a} = 1\angle 120°$, $\overline{a}^2 = 1\angle 240°$,

I_d – diferenciálny prúd,

I_b – stabilizačný prúd

$\overline{I}_j$ – fázor prúdu v *j*-tom vstup alebo výstupe,

n – celkový počet odbočiek,

k_{st} – stabilizačný faktor určujúci sklon vypínacej charakteristiky,

I_{dr} – rozbehový prúd diferenciálnej ochrany,

U_b – napätie na rozdielovom článku,

R_b – pridaná obmedzovacia rezistencia,

$I_{f,max\text{-}ext}$ – maximálny prúd vonkajšej poruchy,

$I_{f,min\text{-}int}$ – minimálny prúd vnútornej poruchy,

U_{lim} – limitné napätie prístrojových transformátorov prúdu,

I_{mag} – magnetizačný prúd prístrojových transformátorov prúdu,

I_{dr} – rozbehový prúd diferenciálnej ochrany,

p_j – prevod j-tého prístrojového transformátoru prúdu PTP

P/I_n – základné nastavenie stabilizovaného stupňa diferenciálnej ochrany,

I_{2tp}/I_n – bod druhého zlomu charakteristiky,

I_{d1f} – veľkosť zložky prvej harmonickej prúdu,

I_{2df} – veľkosť zložky druhej harmonickej prúdu,

I_{5df} – veľkosť zložky piatej harmonickej prúdu,

I_{Xm} – fázová hodnota s kompenzovanou nulovou zložkou vo fáze X (X = A, B, C)

I_{dA}, I_{dB}, I_{dC} – hodnota diferenciálneho prúdu zložky prvej harmonickej

I_{bA}, I_{bB}, I_{bC} – hodnota stabilizačného prúdu zložky prvej harmonickej

I_{dA2}, I_{dB2}, I_{dC2} – hodnota diferenciálneho prúdu zložky druhej harmonickej

I_{dA5}, I_{dB5}, I_{dC5} – hodnota diferenciálneho prúdu zložky piatej harmonickej

svID – hodnota určujúca poradie SV,

SmpCnt – poradie vzorku SV

refrTM – obsahuje čas obnovenia vyrovnávacej pamäte SV

SmpSynch – informácia o synchronizovaní SV

SmpRate – vzorkovacia frekvencia

U_m – maximálne napätie pre zariadenie

I_{pr} – menovitý primárny prúd

I_{cth} – menovitý trvalý tepelný prúd

K_{ra} – menovitý transformačný pomer

I_{NORMAL} – hodnota prúdu v bezporuchovom stave

I_{PORUCH} – hodnota prúdu v poruchovom stave

$t_{Operating}$ – vybavovací čas ochrany

φ_A, φ_B, φ_C – fázory prúdu vo fázach A, B, C,

t_{ABB} – vybavovací čas ochrany ABB,

$t_{LabView}$ – vybavovací čas ochrany Central Protection Relay Model,

t_{theor} – teoretický vybavovací čas ochrany,

I_1 – prúd na vstupe

I_2 – prúd na výstupe

I_{1GEN} – prúd na vstupe generovaný testovacím zariadením OMICRON 256plus

I_{2GEN} – prúd na výstupe generovaný testovacím zariadením OMICRON 256plus

I_{1MER} – prúd na vstupe meraný prúdovým senzorom ABB KECA 250B1

I_{2MER} – prúd na výstupe meraný prúdovým senzorom ABB KECA 250B1

I_{bm}/I_n – diferenciálny prúd vypočítaný z meraných hodnôt

I_{dm}/I_n – stabilizačný prúd vypočítaný z meraných hodnôt

I_d/I_n – diferenciálny prúd vypočítaný z teoretických hodnôt

I_b/I_n – stabilizačný prúd vypočítaný z teoretických hodnôt

f_{sample} – vzorkovacia frekvencia

$f(t)$ – hustota pravdepodobnosti Gaussoveho rozdelenie pravdepodobnosti

μ – smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia

σ – stredná hodnota náhodnej veličiny t Gaussovho rozdelenia

PRP – Parallel Redundancy Protocol

HSR – High-availability Seamless Redundancy

1 ÚVOD

Elektrické ochrany patria k najdôležitejším prvkom elektrizačnej sústavy, zaisťujú bezpečnú prevádzku jej jednotlivých častí – akými sú napríklad transformátory, generátory, vedenia, spotrebiče. Hlavnou úlohou elektrických ochrán je sledovanie stavovej veličiny chráneného objektu. V prípade poruchového stavu musí ochrana pôsobiť na akčné členy tak, aby nedošlo k poškodeniu chráneného objektu alebo k ohrozeniu obsluhy elektrickým prúdom. Dôležitou podmienkou ich správnej funkcie je zvolenie vhodných druhov ochranných funkcií, ich nastavenie a koordinácia. Nevhodný výber a nastavenie parametrov ochranných funkcií môže viesť k veľkým nehodám a taktiež finančným stratám.

Elektrické ochrany prešli vývojom od elektromechanických ochrán cez elektronické až k digitálnym, ktoré sú v súčasnej dobe najpoužívanejším typom elektrických ochrán. K výhodám digitálnych ochrán patrí veľká univerzálnosť, možnosť nastavovania parametrov, programovanie cez počítač, združenie viacerých typov ochrán v jednom zariadení. Súčasný trend vedie k rozvoju v oblasti komunikácie a výmeny dát medzi jednotlivými ochranami a taktiež medzi ochranou a nadradeným riadiacim systémom. Pre komunikáciu sú využívané rôzne komunikačné protokoly – snahou je, zjednotiť ich do jedného používaného protokolu. V súčasnosti najpoužívanejším komunikačným protokolom je IEC 61850.

Protokol IEC 61850 pomáha k digitalizácii rozvodní v rámci komunikácie medzi zariadeniami, ktorá je potrebná pre ochranné, riadiace, monitorovacie a meracie funkcie. Najnovšou časťou komunikačného protokolu IEC 61850 je časť IEC 61850-9-2 zameraná na prenos vzorkovaných hodnôt - SV. Norma platí pre elektronické transformátory prúdu a napätia s digitálnym výstupom, zlučovacie jednotky – MUs – a inteligentné elektronické zariadenia ako sú zariadenia ochrán, riadiace jednotky poľa a elektromery.

Dizertačná práca sa zaoberá využitím SV podľa protokolu IEC 61850-9-2 pre možnosti chránenia časti elektrizačnej sústavy. Výsledkom práce je model centrálnej ochrany, ktorý slúži ako systém pre chránenie časti elektrizačnej sústavy využívajúci výstup z elektronického senzorického systému merania prúdu a napätia.

V dizertačnej práci je rozpracovaný doterajší vývoj v oblasti používania štandardu IEC 61850-9-2, následne je uvedený popis používaných ochranných funkcií a ich algoritmov. V závere sa práca zaoberá vytvorením modelu centrálnej ochrany v LabView, ktorý spracováva IEC 61850-9-2 SV z Ethernetu v reálnom čase. Pre overenie korektnej funkcie navrhnutých algoritmov bola zvolená metodika testovania, na základe ktorej bola vyhodnotená spoľahlivosť navrhnutých algoritmov.

2 DOTERAJŠÍ VÝVOJ

Uvedená kapitola poukazuje na doterajší vývoj v elektrických ochranách a nové trendy v oblasti merania prúdu a napätia. Senzorické meranie prúdu a napätia využívajúce nekonvenčné princípy merania viedlo k zavedeniu nového štandardu IEC 61850-9-2 a definovaniu pojmu SV. V závere kapitoly je uvedené súčasné riešenie na trhu využívajúce komunikačný protokol IEC 61850-9-2 v spolupráci s digitálnymi ochranami a senzormi prúdu a napätia.

2.1 Vývoj elektrických ochrán

Elektrické ochrany patria medzi najdôležitejšie inštalované zariadenia. Hlavná funkcia elektrických ochrán je chrániť zariadenia pred poškodením a ľudí pred úrazom elektrickým prúdom. Pri správnej funkcii znižujú alebo eliminujú škody spôsobené poruchami v elektrizačnej sústave. Funkcionalita elektrických ochrán nesmie byť nikdy potlačená alebo zakázaná, avšak môže byť blokovaná. K blokovaniu funkcie elektrickej ochrany dochádza v prípade koordinácie viacerých stupňov nastavenia elektrických ochrán.

Elektrické ochrany je možné rozdeliť do troch skupín:

- Elektromechanické ochrany
- Elektronické ochrany
- Digitálne ochrany

2.1.1 Elektromechanické ochrany

Jeden z najstarších typov elektrických ochrán sú elektromechanické ochrany tvorené elektromagnetickými relé, ktoré medzi sebou vzájomne spolupracujú. Tento typ elektrických ochrán väčšinou sleduje iba jednu veličinu. Ich základnými stavebnými členmi sú meracie relé, časové relé, pomocné relé a napájací člen.

Medzi výhody elektromechanických ochrán patrí vysoká spoľahlivosť a stabilita. Elektromechanické ochrany majú fixne danú charakteristiku a v prípade potreby zmeny charakteristiky ochrany je nutné vymeniť celú ochranu. Medzi ďalšie nevýhody patrí nízka presnosť elektromechanických ochrán.

2.1.2 Elektronické ochrany

Elektronické ochrany využívajú tranzistorovú techniku. Jedná sa o analógové relé bez pohyblivých častí. Z tohto dôvodu sú ochrany často označované ako statické ochrany. Merané veličiny sa premieňajú na elektronické signály a porovnávajú s preddefinovanými hodnotami. K výhodám elektronických ochrán patria krátke reakčné a vybavovacie časy, vyššia presnosť a menšie požiadavky na údržbu.

2.1.3 Digitálne ochrany

Použitie výpočtovej techniky v oblasti elektrických ochrán umožňuje lepšie možnosti spracovania vstupných informácií a zdokonalenie funkcií v oblasti presnosti a selektivity. Digitálne ochrany sú schopné vykonávať okrem ochranných funkcií aj funkcie monitorovania, ovládania a riadenia prevádzky elektrizačnej sústavy a jej prvkov v reálnom čase.

Digitálne ochrany pozostávajú z logických obvodov, ktoré vyhodnocujú merané hodnoty na základe naprogramovaných algoritmov ochranných funkcií. Merané hodnoty sú na vstupe do ochrany prevádzané z analógových hodnôt na hodnoty digitálne.

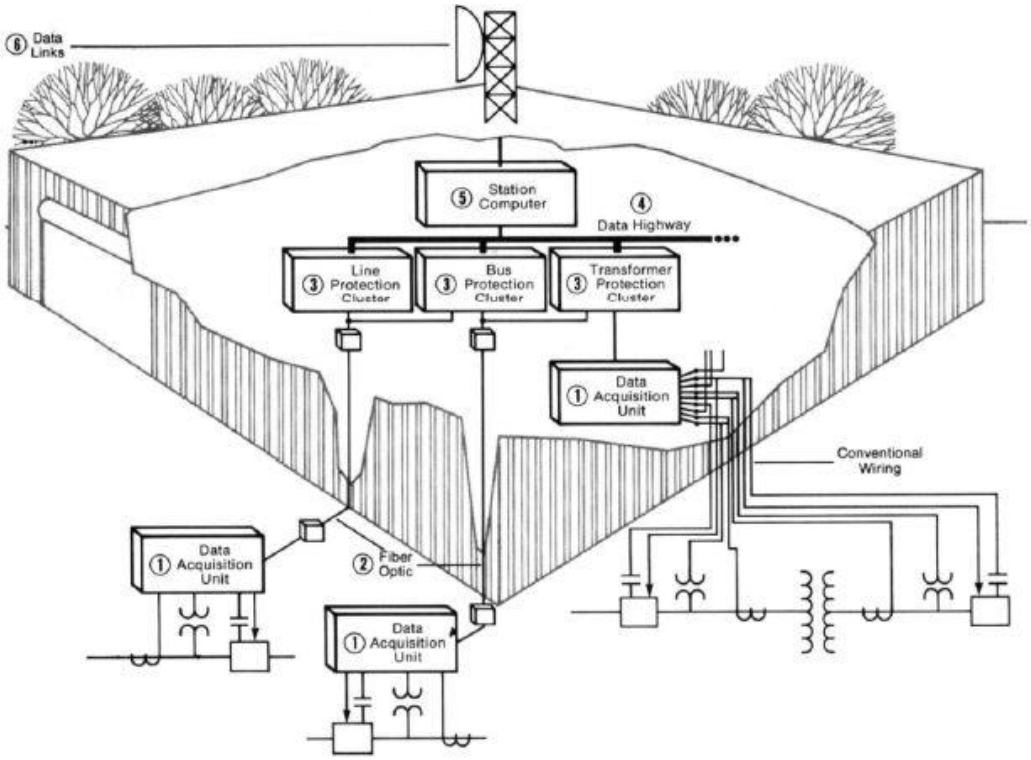
2.2 Centrálna ochrana

Dokument IEEE PES [1] pracovnej skupiny K15 definuje centrálnu ochranu ako systém zložený z počítača s vysokým výpočtovým výkonom schopného zabezpečiť ochranné, kontrolné, monitorovacie a komunikačné funkcie v rozvodni.

Koncept centrálnej ochrany sa datuje k začiatkom využívania počítačov. Prvý návrh bol publikovaný v roku 1969 a prvá inštalácia pre overenie konceptu prebehla v roku 1971 [1]. Prvé experimenty boli zamerané na využitie počítačovej techniky pre ochranné funkcie a boli limitované vtedy dostupnými technológiami. V nasledujúcich kapitolách budú popísané projekty centrálnej ochrany z 80. a 90. rokov 20. storočia.

2.2.1 Westinghouse Electric Corporation – USA

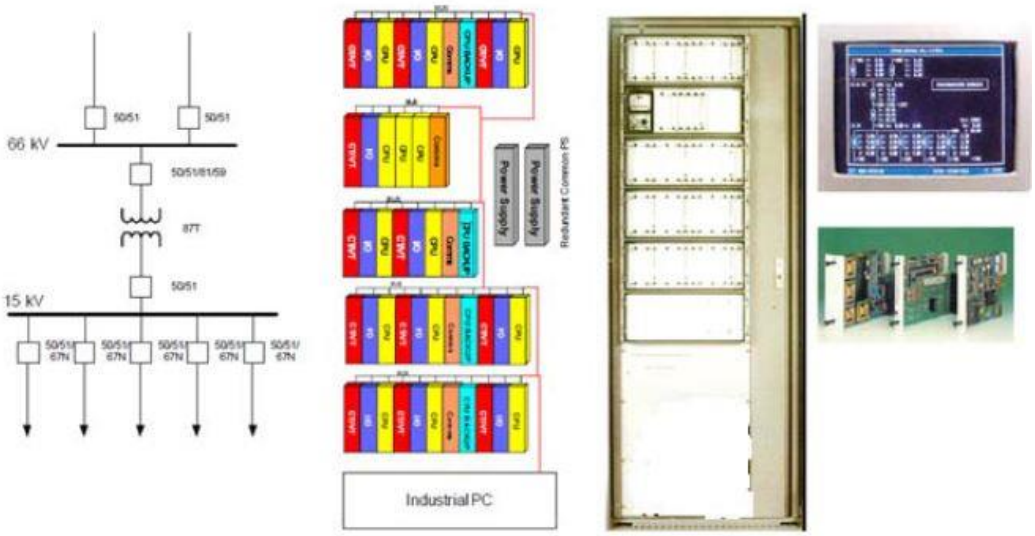
Spoločnosť Westinghouse Electric pripravila systémové požiadavky pre centrálnu ochrany v rámci projekt EPRI Research Project RP-1359-1 v apríli roku 1980 – popisuje [1]. Táto špecifikácia je pokladaná za jeden z prvých pokusov poskytnúť ochranné a kontrolné funkcie v integrovanom systéme. Taktiež sa počítalo s tarifným meraním a rozhraním pre SCADA systém. Na základe tejto špecifikácie vznikol systém WESPAC uvedený na Obr. 1 [1]. Systém WESPAC bol nasadený v niekoľkých rozvodniach na začiatku 80. rokoch 20. storočia.



Obr. 1 Bloková schéma systému WESPAC

2.2.2 SIPSUR – Španielsko

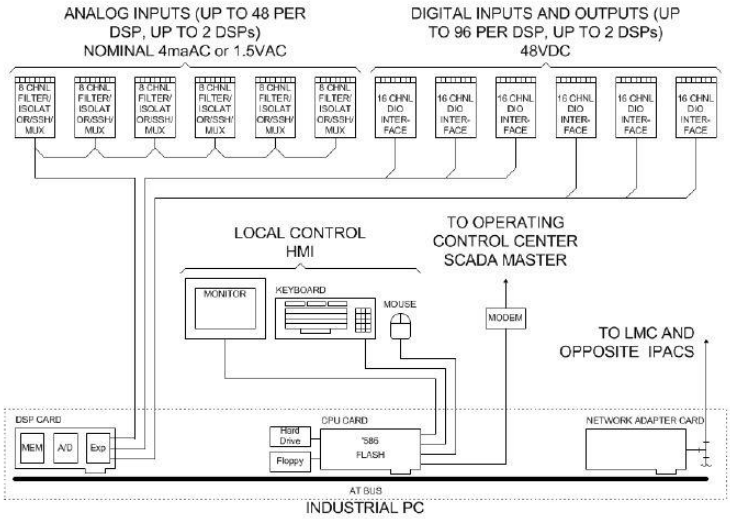
Systém SIPSUR bol vyvinutý spoločnosťou GE a North West Utility v Španielsku – Union Electrica Fenosa v roku 1990. SIPSUR bol projekt v rámci, ktorého bol do jedného počítača integrovaný celý ochranný systém pre distribučnú rozvodňu vysokého napätia [1]. Tento systém bol zložený z dvoch prívodných odbočiek, jedného transformátoru a piatich vývodových odbočiek. Unikátnosťou tohto konceptu bolo záložné CPU uvedené na Obr. 2 [1].



Obr. 2 Koncept záložného CPU v projekte SIPSUR

2.2.3 Ontario Hydro IPACS System – Kanada

Spoločnosť Ontario Hydro vyvinula systém IPACS (zobrazený na Obr. 3 [1]), ktorý bol prvýkrát použitý v roku 1992. IPACS je počítačový systém inštalovaný v jednom boxe vykonávajúci všetky ochranné, kontrolné, monitorovacie a zaznamenávacie funkcie pre stanicu Dual Element Spot Newtork (DESN). DESN stanica je transformátorová stanica, ktorá prevádza napätie z prenosovej úrovne na distribučnú úroveň. Všetky elementy transformovne sú duplikované tak, aby pri výpadku jedného zariadenia nedošlo k prerušeniu dodávky. Spoločnosť Ontario Hydro nainštalovala 56 systémov IPACS do roku 1998, kedy bol tento systém zrušený [1].

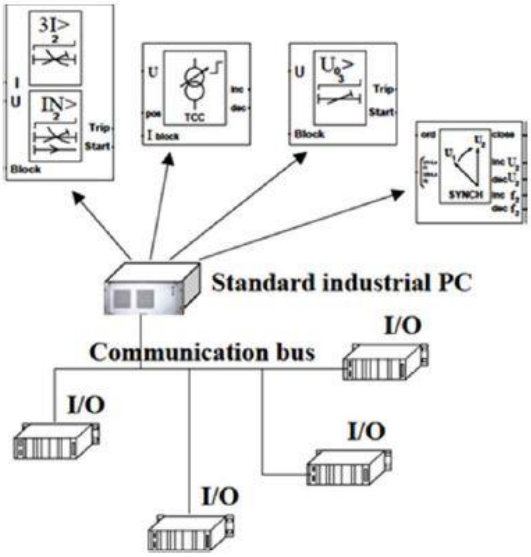


Obr. 3 Bloková schéma systému Ontario Hydro IPACS

2.2.4 Vattenfalls Project – Švédsko

Spoločnosť Vattenfall vyvinula systém centrálnej ochrany pre ostrov Gotland v roku 2000 v spolupráci so spoločnosťou ABB (zobrazený na Obr. 4 [1]). Všetky ochranné a kontrolné algoritmy boli vykonávané na priemyselnom počítači. Systém bol vyvinutý na základe technológií používaných pre HVDC rozvodne s pridaním ochranných algoritmov pre AC.

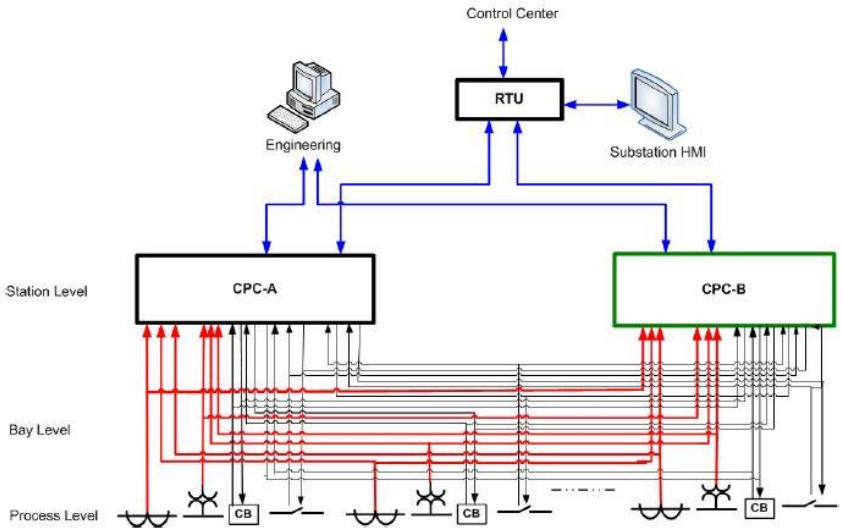
Každý ochranný systém využíva priemyselný počítač a I/O zariadenie pripojené k primárnemu procesoru. Operačný systém sa skladá z real-time jadra v kombinácii s operačným systémom Windows. Systém je navrhnutý tak aby bolo možné implementovať akýkoľvek ochranný algoritmus od ktoréhokoľvek výrobcu popisuje [1].



Obr. 4 Bloková schéma pre systém Vattenfalls – Gotland – Švédsko

2.2.5 Typická architektúra centrálnej ochrany

Tradičná architektúra centrálnej ochrany s vodičmi, ktorá bola využívaná v minulosti je uvedená na Obr. 5 [1]. Centrálna ochrana je pripojená priamo k prístrojovým transformátorom prostredníctvom medených vodičov. Podľa informácii v [1] je pripojenie k nadradenému systému prostredníctvom Point-to-Point Ethernetu alebo sériovým pripojením.



Obr. 5 Tradičná architektúra centrálnej ochrany

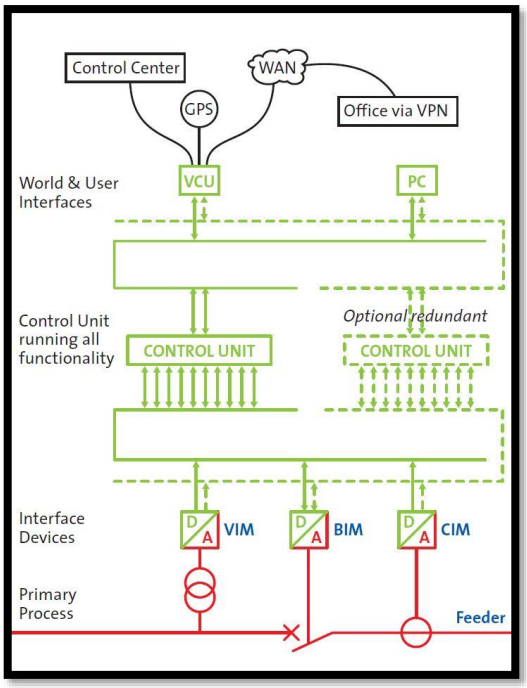
2.3 Locamation SASensor – centrálna ochrana

Holandská firma Locamation predstavila realizáciu centrálnej ochrany prostredníctvom ich vlastného vyvinutého hardware pod názvom SASensor. Riešenie firmy Locamation je použité v rozvodniach inštalovaných pre distribučnú firmu Alliander uvádza [2].

Funkcie systému od firmy Locamation písané v [2]:

- Ochranné funkcie:
  - nadprúdová ochrana,
  - IEC 61850 MU – slúži na prepojenie s inými ochranami.
- Riadiace funkcie:
  - miestne a vzdialené ovládanie,
  - webové grafické užívateľské prostredie,
  - automatické spínacie sledy,
  - meranie,
  - záznam udalostí a porúch,
  - záznam kvality elektrickej siete,
  - blokovanie,
  - podpora protokolov: IEC 61850, IEC60870-5-101/104, DNP3, Modbus.
- Inžiniering:
  - konfiguračný jazyk IEC 61850,
  - užívateľsky priaznivé rozhranie pre konfiguráciu.
- Manažment:
  - spoľahlivosť, dostupnosť a záloha,
  - samo diagnostika,
  - automatické zálohovanie.

Zariadenia firmy Locamation nutné pre použitie centrálnej ochrany sú popísané v nasledujúcich kapitolách. Ich zapojenie je uvedené na Obr. 6 [3] vo forme blokovej schémy.



Obr. 6 Bloková schéma centrálnej ochrany firmy Locamation

2.3.1 BIM641 – Breaker Interface Module

Modul BIM641 slúži ako rozhranie pre funkciu a monitorovanie zariadení v rozvádzači. Obsahuje 10 digitálnych vstupov a 8 reléových výstupov. Modul je využívaný pre manipuláciu so zariadeniami v rozvádzači – vypínač, skratovač – popisuje [4] Modul BIM641 je uvedený na Obr. 7 [4].

Obr. 7 Modul BIM641

2.3.2 CIM631 – Current Interface Module

Modul CIM631 je využívaný na meranie a digitalizáciu fázových prúdov zo sekundárnych vinutí meracích transformátorov prúdu. Digitalizovaný signál obsahuje informáciu o prúdoch v celom ich dynamickom rozsahu. Merací rozsah je od 1 mA do 300 A s garantovanou presnosťou od 10 mA do 270 A definuje [5] Na komunikáciu s centrálnou jednotkou je využívaná optika. Modul CIM631 je uvedený na Obr. 8 [5].

Obr. 8 Modul CIM631

2.3.3 VIM622 – Voltage Interface Module

Modul VIM622 je využívaný na meranie a digitalizáciu fázových napätí zo sekundárnych vinutí meracích transformátorov napätia. Digitalizovaný signál obsahuje informáciu o napätiach v celom ich dynamickom rozsahu. Merací rozsah je od 0 V do 187 V podľa [6]. Modul VIM622 je uvedený na Obr. 9 [6].

Obr. 9 Modul VIM622

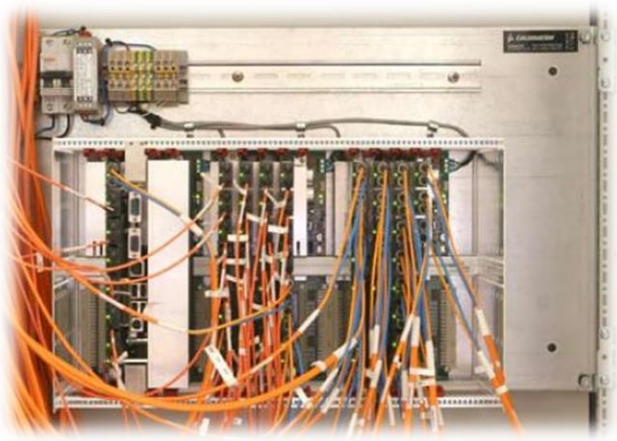
2.3.4 VCU106 – Versatile Communication Unit

Modul VCU106 umožňuje pripojiť centrálnu jednotku CCU600 s nadradeným systémom pre diaľkové ovládanie. Voliteľne je možné modul VCU106 pripojiť k externej GPS anténe pre časovú synchronizáciu – popisuje [3]. Modul VCU106 je zobrazený na Obr. 10 [3].

Obr. 10 Modul VCU106

2.3.5 CCU600 – Central Control Unit

Centrálna riadiaca jednotka CCU600 združuje všetky moduly systému SASensor – CIM631, VIM622, BIM641 a VCU106. Základom jednotky je real-time operačný systém ARTOS s aplikáciami pre SASensor [7]. Jednotka CCU600 je uvedená na Obr. 11 [7].



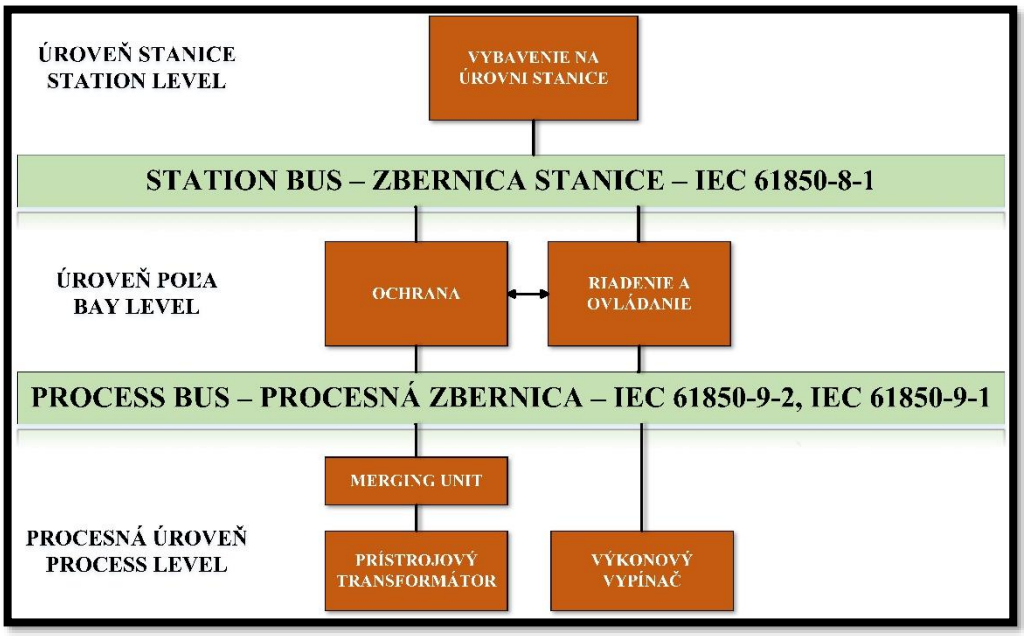
Obr. 11 Centrálna riadiaca jednotka CCU600

2.4 IEC 61850-9-2

S rozvojom senzorov prúdu a napätia je nutné vyriešiť zdieľanie meraných hodnôt na väčšie vzdialenosti ako je napr. zdieľanie meraných hodnôt medzi jednotlivými poľami v rozvodni, pretože výstup zo senzorov má nízku hodnotu v desiatkach milivoltov. Túto problematiku vyriešil štandard IEC 61850-9-2, ktorý popísal pojem SV. Jedná sa o vzorkované hodnoty, kde pre ochranné funkcie je definovaných 80 vzoriek na periódu a pre hodnotenie kvality elektrickej energie 256 vzoriek na periódu. Jednotlivé vzorky musia byť časovo synchronizované aby zariadenie, ktoré ich prijíma mohlo presne definovať každú vzorku a ďalej s ňou pracovať.

Všetky SV sú zdieľané medzi zariadeniami prostredníctvom procesnej zbernice – Process bus, definovaný taktiež štandardom IEC 61850-9-2. Norma definuje ako majú byť pripojené jednotlivé zariadenia do zbernice, ktorá je taktiež prepojená s nadradeným systémom predstavujúcim zbernicu stanice – Station bus.

Základné tri úrovne funkčnej hierarchie rozvodne sú zobrazené na Obr. 12. Procesnú úroveň predstavujú meniče napätia a prúdu, vypínače, prípadne zlučovacie jednotky – MUs. Úroveň poľa predstavujú ochrany a riadiace zariadenia jednotlivých polí. Funkcie vyžadujúce dáta z viac ako jedného poľa sú implementované do úrovne stanice – Station level.

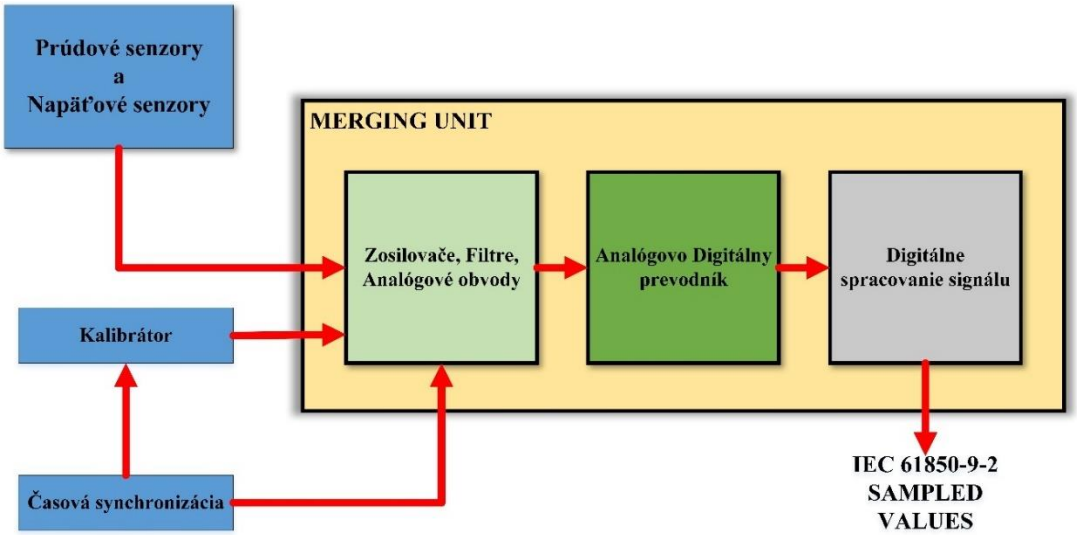


Obr. 12 Funkčná hierarchia podľa IEC 61850

Aplikácie s využitím štandardu IEC 61850-9-2 sú založené na distribúcii vzorkovaných hodnôt prúdu a napätia zo zlučovacích jednotiek – MUs – do digitálnych ochrán (IED), ktoré ich ďalej využívajú pre meracie a ochranné funkcie.

2.5 Merging Unit

MU je zariadenie, ktoré slúži na konvertovanie analógového signálu z meničov napätia a prúdu na SV. Tieto hodnoty sú následne časovo synchronizované a posielané na process bus, kde sú ďalej dostupné pre ďalšie zariadenia, ktoré s nimi pracujú ako napr. elektrické ochrany. Na Obr. 13 je znázornený blokový diagram MU.



Obr. 13 Blokový diagram MU

2.6 Nekonvenčné prístrojové transformátory

Prúdové a napäťové meranie patrí medzi najdôležitejšie merania v rámci rozvodne. Vývoj v tejto oblasti ukázal alternatívne možnosti merania prúdu a napätia, ktoré môžu nahradiť konvenčné prístrojové transformátory prúdu a napätia.

Senzory pre hladinu vysokého napätia využívajú nekonvenčné princípy merania ako Rogowskeho cievka alebo napäťový delič. Konštrukcia senzorov je bez feromagnetického jadra, vďaka čomu nie je správanie senzora ovplyvnené nelinearitou a šírkou hysteréznej slučky. Pri konštrukcii senzora musia výrobcovia dbať na presnosť merania.

Medzi hlavné benefity senzorov patrí redukcia veľkosti, zvýšenie bezpečnosti, väčšia štandardizácia a širší rozsah merania.

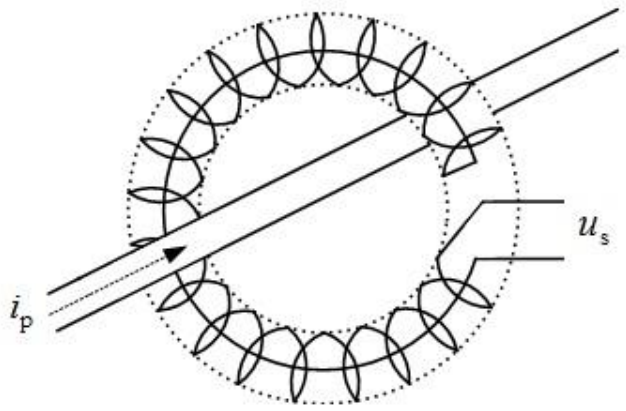
2.6.1 Prúdové senzory

Meranie prúdu v prúdových senzoroch je na princípe Rogowskeho cievky. Jedná sa o toroidnú cievku bez jadra z feromagnetického materiálu. Umiestnenie senzora je okolo primárneho vodiča rovnakým spôsobom ako sekundárne vinutie v prúdovom transformátore. Namiesto konvenčných prístrojových transformátorov prúdu je výstupným signálom z prúdových senzorov napätie. Princíp Rogowskeho cievky je uvedený na Obr. 14.

Výstupné napätie je definované vzťahom

$$u_s(t) = M \cdot \frac{\mathrm{d}i_p(t)}{\mathrm{d}t}, \tag{1}$$

kde u_s je okamžitá hodnota výstupného napätia, M je vzájomná indukčnosť, i_p je okamžitá hodnota primárneho prúdu a t je čas.



Obr. 14 Princíp Rogowskeho cievky

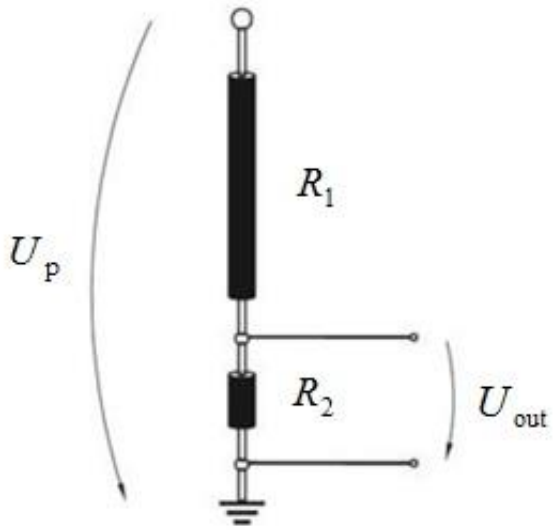
2.6.2 Napäťové senzory

Napäťové senzory využívajú pre meranie napätia princíp napäťového deliča. Jedná sa o odporový delič, ktorý je zobrazený na Obr. 15. Výstupné napätie je priamoúmerné veľkosti vstupného napätia.

Výstupné napätie je definované vzťahom

$$U_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{p}}, \tag{2}$$

kde U_{out} je efektívna hodnota výstupného napätia, R_1 je rezistancia 1, R_2 je rezistancia 2 a U_{p} je efektívna hodnota vstupného napätia.



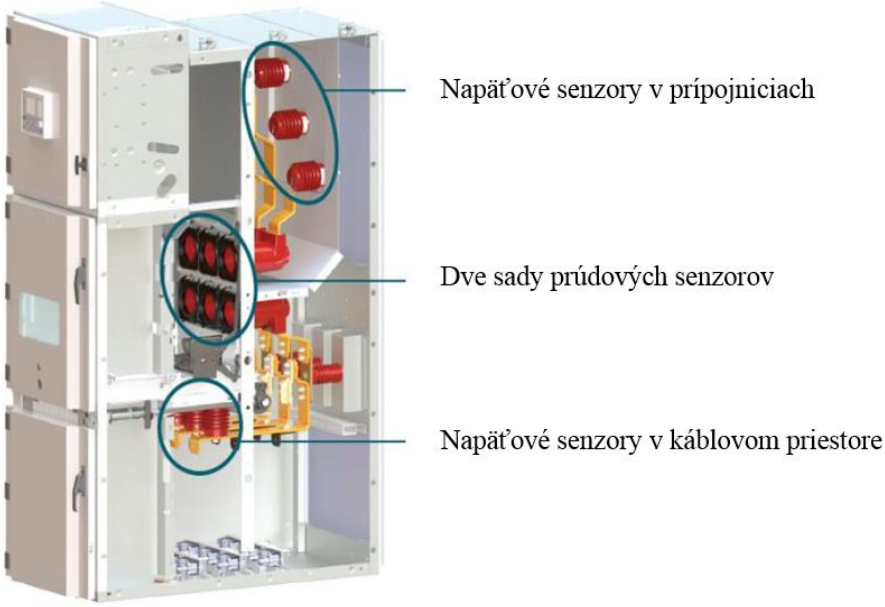
Obr. 15 Odporový delič

2.7 Aplikácie Process bus podľa IEC 61850-9-2

V doterajšom vývoji boli na konferenciách publikované články zaoberajúce sa aplikáciou procesnej zbernice podľa IEC 61850-9-2. Články sa zaoberajú nielen vytvorením procesnej zbernice v rozvodni ale taktiež vyhodnotením správania sa pri rôznych prevádzkových stavoch a taktiež porovnaním s klasickou komunikáciou pomocou vodičov.

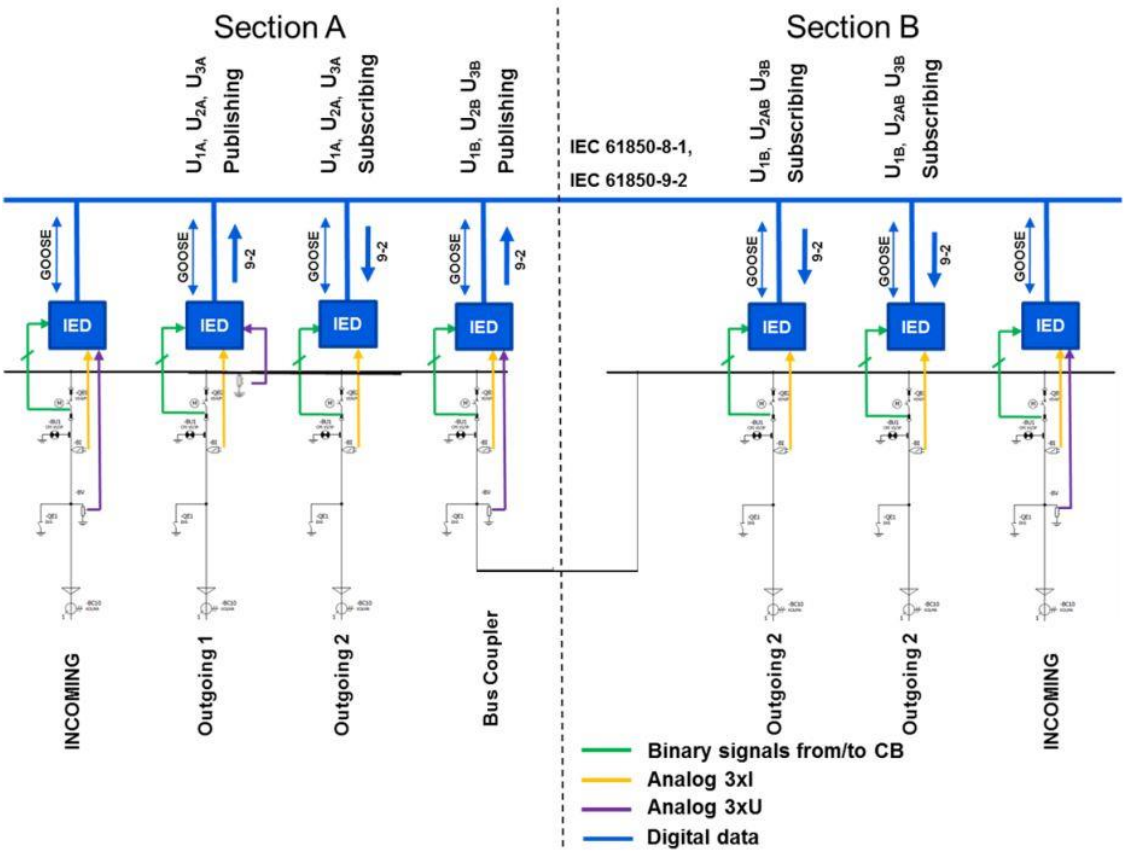
2.7.1 UniGear Digital - Architektúra rozvodní vysokého napätia

Architektúra rozvodní vysokého napätia prechádza v posledných rokoch rozvojom a zavádza sa digitalizácia. Po zavedení štandardu IEC 61850 sa začali využívať GOOSE správy, ktoré znížili počet vodičov potrebných na prepojenie medzi ochranami. V súčasnosti dochádza k prvým aplikáciám štandardu IEC 61850-9-2 v rozvádzačoch vysokého napätia, ktoré pre meranie napätia a prúdu využívajú senzory. Jedná sa o riešenie firmy ABB s názvom UniGear Digital. Rozvádzač UniGear ZS1 Digital je zobrazený na Obr. 16 [8].



Obr. 16 UniGear ZS1 Digital

Každý panel obsahuje senzory prúdu a senzory napätia na vývodových odbočkách, ktoré sú použité podľa konkrétnej aplikácie. Meranie napätia na prípojniciach je možné inštalovať v jednom panele a táto hodnota je prostredníctvom štandardu IEC 61850-9-2 distribuovaná ďalším ochranám [9]. Jednopólová schéma rozvodne využívajúcej riešenie UniGear Digital je uvedená na Obr. 17 [10].



Obr. 17 Jednopólová schéma rozvodne využívajúca riešenie UniGear Digital

Všetky senzory použité v rozvádzačoch majú analógový výstupný signál. Aby bolo možné merané hodnoty zdieľať prostredníctvom Process bus je potrebné analógový signál transformovať na digitálny – SV podľa IEC 61850-9-2. Na prevod slúži IED umiestnené v každom panele. Prostredníctvom IED sú SV vysielané na process bus a ostatné IED sú schopné tieto hodnoty prijímať a ďalej spracovávať pre ochranné funkcie.

Uvedený koncept prináša nové inovatívne riešenie s množstvom výhod, ktoré popisujú [9], [10]:

- vysoký dynamický rozsah senzorov v porovnaní s konvenčnými prístrojovými transformátormi umožňuje menšie množstvo druhov senzorov v porovnaní so súčasnými prístrojovými transformátormi,
- lineárna charakteristika senzorov,
- chýbajúce feromagnetické jadro u senzorov umožňuje predchádzať ferorezonancii,
- spotreba energie senzora je zanedbateľná a omnoho nižšia ako spotreba konvenčných prístrojových transformátorov.

Pri uvedenom riešení musí byť každý panel vybavený IED. Aplikáciu prúdových a napäťových senzorov popisuje [10] spolu s vývojom riešenia UniGear Digital.

Dizertačná práca sa zaoberá riešením centrálnej ochrany, kde bude pre celú rozvodňu potrebná len jedna ochrana, ktorá komunikuje s MU umiestnenými v jednotlivých poliach prostredníctvom process bus. Použitie centrálnej ochrany je podmienené vývojom senzorov s digitálnym výstupom a taktiež zlučovacích jednotiek (MUs), ktoré budú inštalované v každom panele ale ich cena bude niekoľkonásobne nižšia ako cena v súčasnosti používaných IED.

2.7.1.1 Popis IED ABB REF615

Pre koncept UniGear Digital je využívané IED ABB REF615, prostredníctvom ktorého je možné rozvádzač ovládať a taktiež obsahuje ochranné funkcie. IED plne podporuje štandard IEC 61850, čo zahrňuje podporu GOOSE správ a taktiež IEC 61850-9-2 SV popisuje [8].

Process bus IEC 61850-9-2 u IED ABB REF615 umožňuje vysielanie napätí a prúdov v digitálnej podobe na Ethernet a zároveň umožňuje prijímať hodnoty napätia vo forme IEC 61850-9-2 SV. Pre časovú synchronizáciu je využívaný protokol IEEE 1588 V2. IED ABB REF615 je zobrazené na Obr. 18 [8].

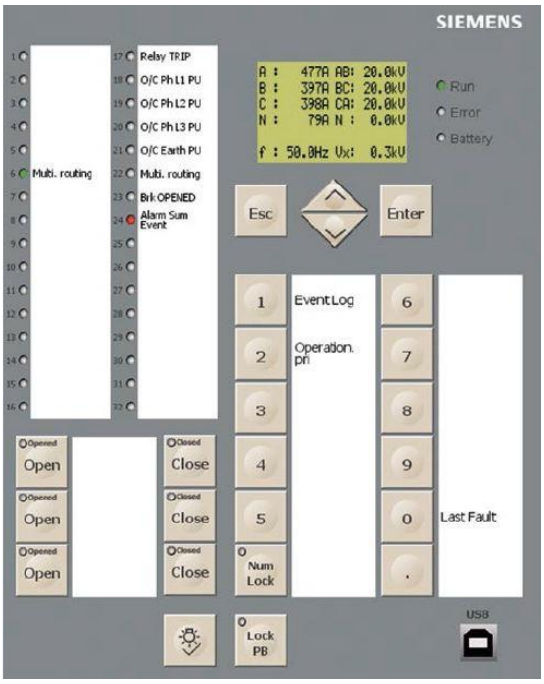
Obr. 18 IED ABB REF615

2.7.2 Siemens SIPROTEC 6MU805

Spoločnosť Siemens predstavila MU s názvom SIPROTEC 6MU805, ktorá je zobrazená na Obr. 19 [11]. MU umožňuje pripojenie štyroch meracích transformátorov prúdu a štyroch meracích transformátor napätia – podporované sú konvenčné ale aj nekonvenčné meracie transformátory. Zariadenie transformuje analógový signál na digitálny štandardizovaný výstup podľa IEC 61850-9-2. Časová synchronizácia je zabezpečená prostredníctvom jedného zo štandardov PPS, IRIG-B alebo GPS. MU podporuje GOOSE správy na základe, ktorých je umožnená výmena informácií a ovládanie funkcií primárnych zariadení prostredníctvom 12 binárnych vstupov a 8 binárnych výstupov. Zariadenie komunikuje prostredníctvom optiky [11] [13].

Obr. 19 Siemens SIPROTEC 6MU80

Ovládanie MU je možné prostredníctvom webového užívateľského rozhrania alebo prostredníctvom panelu, ktorý je pripojiteľný k MU. Ovládací panel je zobrazený na Obr. 20 [11].



Obr. 20 Ovládací panel Siemens SIPROTEC 6MU80

Pripojenie MU SIPROTEC 6MU80 k ochranám spoločnosti Siemens rady SIPROTEC 5 je riešenie prostredníctvom rozširujúceho modulu Siemens PB201, ktorý umožňuje pripojenie troch MU k jednej ochrane, čo predstavuje 24 vstupov [12].

2.7.3 Implementácia IEC 61850-9-2 – Energinet, Dánsko

V rámci rozvoja digitalizácie a implementácie štandardu IEC 61850-9-2 prebiehajú pilotné projekty, v ktorých prevádzkovatelia rozvodní používajú na meranie prúdu a napätia senzory.

Jedným z týchto projektov je zavedenie vyššieho štandardu digitalizácie v rámci rozvodne 400kV spoločnosti Energinet v Dánsku [14]. V projekte bolo použitých 72 optických prúdových senzorov (Obr. 21 A [14]), 24 MU a 24 diferenciálnych ochrán pripojených na procesnú zbernicu podľa štandardu IEC 61850-9-2. Použitím prúdových senzorov došlo k redukcii veľkosti a hmotnosti oproti štandardným prúdovým transformátorom [14].

Všetky ochrany a MU sú nainštalované v 19“ racku. Ochrany boli zvolené od firmy Alstom – diferenciálna ochrana Alstom MiCOM P546 a GPS synchronizačná jednotka Alstom MiCOM P594. Prepojenie GPS jednotky MiCOM P594 s ochranou MiCOM P546 a MU je realizované priamo v 19“ racku (uvedený na Obr. 21 B [14]).

A

B

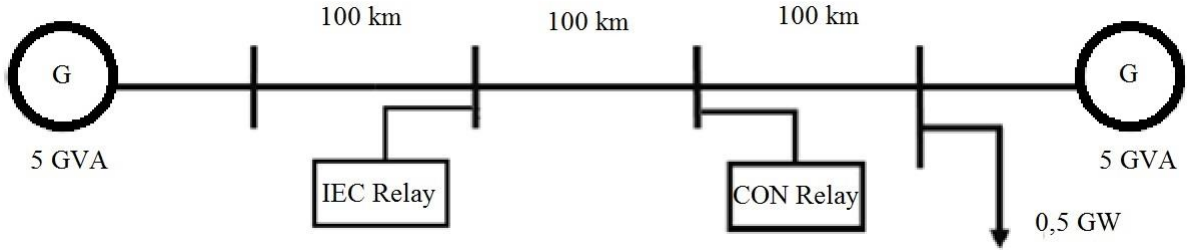
Obr. 21 A – Prúdový senzor v rozvodni 400kV firmy Energinet, Dánsko; B – 19“ rack s ochranami Alstom a MU

Pre testovanie navrhnutej ochrannej schémy a jednotlivých zariadení bolo zvolené testovacie zariadenie firmy OMICRON, ktorým bol injektovaný prúd do primárnej strany prúdových transformátorov.

Benefitom zavedenia digitalizácie je zvýšenie spoľahlivosti, redukcia nákladov na údržbu a zdokonalenie komunikačných možností.

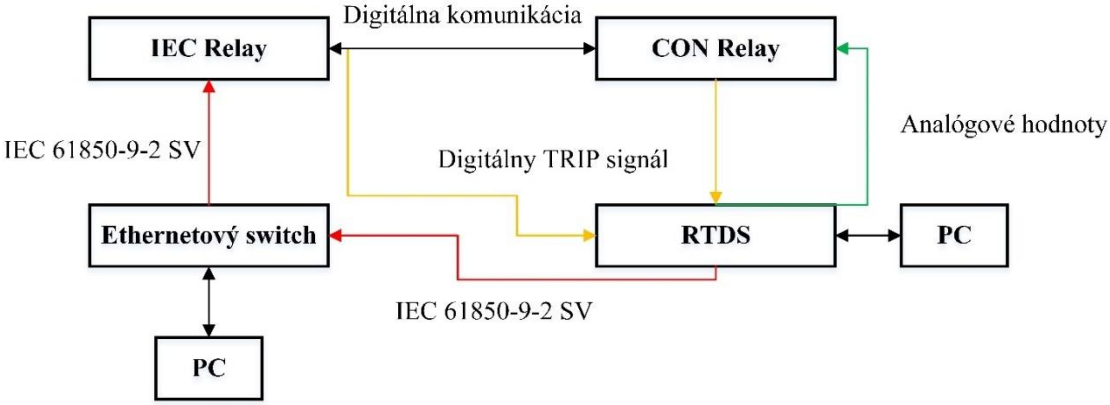
2.7.4 Testovanie process bus a IEC 61850-9-2

V súčasnosti je trendom návrh procesnej zbernice a porovnávanie funkcie ochrany, ktorá spracováva SV, s ochranou pracujúcou na konvenčnom princípe. V článku [15] sa autori zaoberajú návrhom procesnej zbernice pre prenosové vedenie, ktorého model je uvedený na Obr. 22 [15]. Vedenie bolo simulované pomocou RTDS – simulátor elektrickej siete, ktorý generoval dáta priamo vo forme SV. Pri teste boli porovnávané reakčné časy medzi ochranou pracujúcou so SV – IEC Relay a konvenčnou elektrickou ochranou – CON Relay.



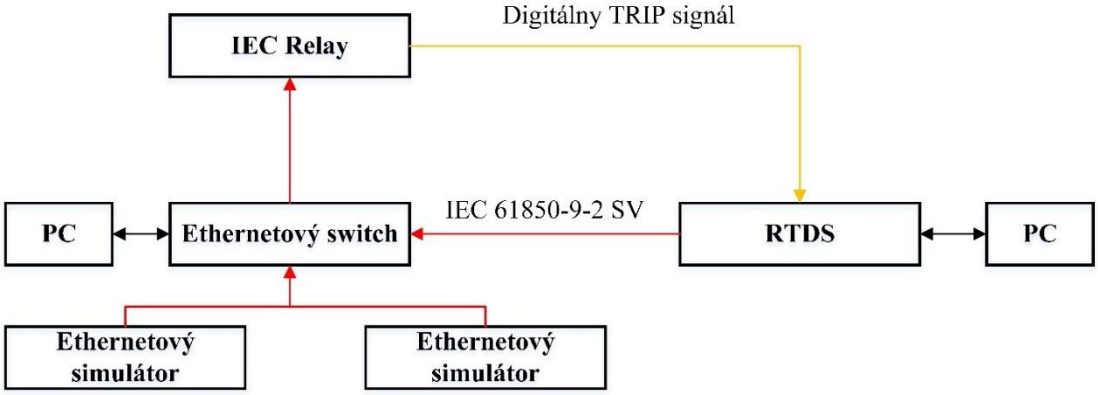
Obr. 22 Model prenosového vedenia

Konfigurácia zapojenia pri teste bola do hviezdy - podľa Obr. 23 [15]. Vyhodnocovanou poruchou bolo zemné spojenie vo fáze A. Vyhodnotením vypínacích časov oboch typov ochrán bolo zistené, že ich vypínacie časy sú veľmi podobné.

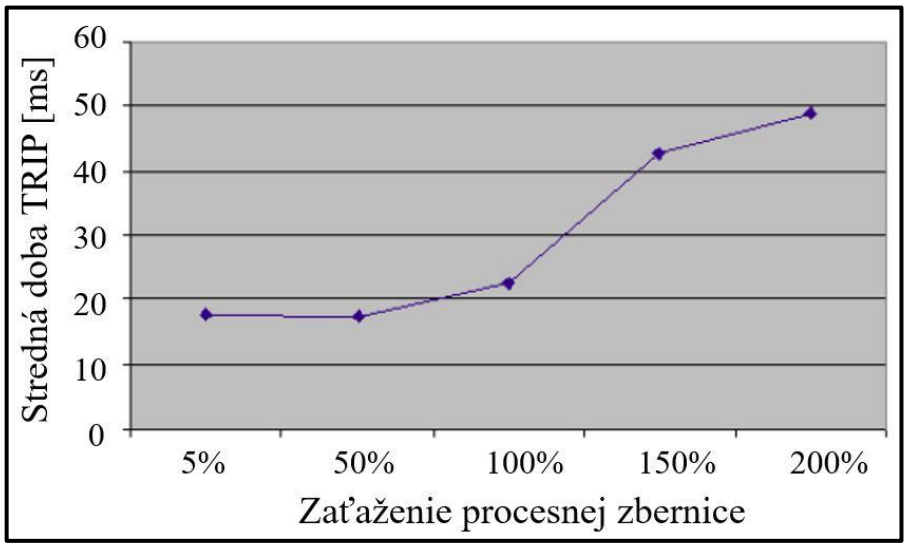


Obr. 23 Konfigurácia zapojenia pri teste porovnania vypínacích časov

Ďalším vykonaným testom bol záťažový test procesnej zbernice, kde konfigurácia pri teste bola podľa Obr. 24 [15]. Bolo zistené, že pri preťažení procesnej zbernice dochádza k oneskoreniu vypínacích časov podľa Obr. 25 [15].



Obr. 24 Konfigurácia pri teste preťaženia procesnej zbernice



Obr. 25 Závislosť vypínacieho času na zaťažení procesnej zbernice

Jedným z hlavných problémov pri implementácii procesnej zbernice podľa IEC 61850-9-2 je definovanie prevádzkových stavov pri strate prijímaných dát, prípadne ich oneskorení. Článok [16] sa zaoberá vyhodnotením straty/oneskorenia SV na procesnej zbernici a vplyv straty/oneskorenia dát na funkciu ochrany. Ako ochranná funkcia bola zvolená diferenciálna ochrana prípojníc.

Testovaním bolo zistené, že oneskorenie a strata SV má za následok nesprávne vyhodnotenie poruchy použitou ochrannou funkciou. Pre odstránenie týchto dôsledkov bol implementovaný algoritmus pre určenie stratených/oneskorených SV podľa [17]. Algoritmus je založený na Lagrangovom polynóme.

V prípade použitia korekčného algoritmu pre určovanie stratených/oneskorených SV dochádza k zachovaniu ochrannej funkcie a správnemu vyhodnoteniu poruchy. Prevedené testy ukázali, že použitím korekčného algoritmu je možné znateľne vylepšiť spoľahlivosť a bezpečnosť ochranných funkcií založených na využití SV podľa IEC 61850-9-2.

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Ciele dizertačnej práce sú nasledujúce:

- Definovanie algoritmov ochranných funkcií
  - nadprúdová ochrana,
    - mžiková nadprúdová ochrana,
    - časovo nezávislá nadprúdová ochrana,
    - časovo závislá nadprúdová ochrana,
  - smerové relé pre nadprúdovú ochranu,
  - logická ochrana prípojníc,
  - ochrana pri nesymetrii,
  - diferenciálna ochrana.
- Vytvorenie algoritmu tzv. centrálnej ochrany vo vývojovom prostredí LabView, ktorá po pripojení na dátovú zbernicu dokáže vyhodnocovať poruchy v rámci vymedzenej oblasti siete vysokého napätia.
- Vypracovanie metodiky pre overenie korektnej funkcie ochrany v kombinácii so senzorickým meraním prúdu a napätia pomocou digitálneho výstupu podľa IEC 61850-9-2.
- Optimalizácia navrhnutého algoritmu centrálnej ochrany.
- Otestovanie navrhnutých algoritmov, vyhodnotenie testov.
- Zhodnotenie prínosu centrálnej ochrany.

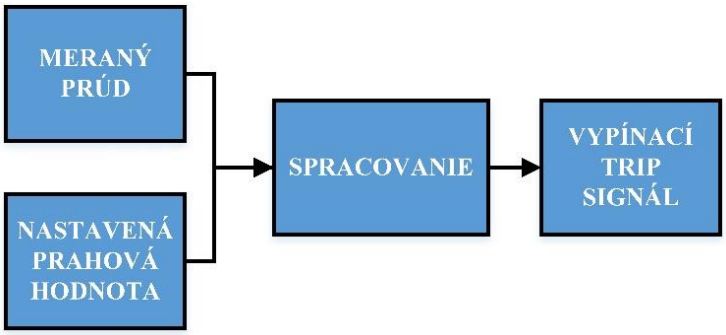
4 POPIS OCHRANNÝCH FUNKCIÍ

V tejto kapitole sú popísané ochranné funkcie, ktorých algoritmy boli naprogramované do LabView v rámci spracovávania dizertačnej práce. Pre model centrálnej ochrany boli zvolené nasledovné ochranné funkcie

1. Nadprúdová ochrana
   a. Mžiková nadprúdová ochrana
   b. Časovo nezávislá nadprúdová ochrana
   c. Časovo závislá nadprúdová ochrana
2. Smerové relé pre nadprúdovú ochranu
3. Logická ochrana prípojníc
4. Ochrana pri nesymetrii
5. Diferenciálna ochrana

4.1 Nadprúdová ochrana

Štandard IEC 60255-151 [18] popisuje požiadavky pre nad/podprúdové ochrany. Definuje minimálne požiadavky na tento druh elektrických ochrán, taktiež popisuje ochranné funkcie, meraciu charakteristiku a charakteristiku časového oneskorenia. Na základe tohto štandardu boli navrhnuté algoritmy nadprúdovej ochrany. Základný blokový diagram nadprúdovej ochrany je uvedený na Obr. 26.



Obr. 26 Základný blokový diagram nadprúdovej ochrany

Nadprúdová ochrana vybaví v nastavenom čase, ak je za určených podmienok ktorýkoľvek z nameraných prúdov I väčší ako nastavená hodnota I_p. Ochrana pôsobí pri skratoch alebo preťaženiach a jej rovnica vyjadruje závislosť doby pôsobenia t na prúde I

$$\mathrm{F}(I, I_p, t) = 0, \tag{3}$$

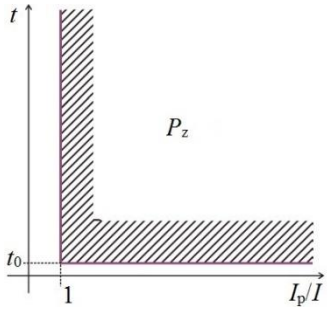
kde I_p je hodnota nastavenia nadprúdového článku - nastavený trvale dovolený prúd (pre $t = \infty$).

4.1.1 Rozdelenie nadprúdových ochrán

Nadprúdové ochrany sú klasifikované podľa vypínacieho času do troch kategórií tak, aby reagovali rôzne na odlišné typy nadprúdov.

4.1.1.1 Mžiková nadprúdová ochrana

Vypínací signál je vyslaný do vypínača hneď ako nastane nadprúd - bez žiadneho časového oneskorenia. Mžikové nadprúdové ochrany sa používajú blízko pri zdroji, kde riziko výskytu poruchy je veľmi vysoké a už aj malé časové oneskorenie vypínacieho signálu môže spôsobiť veľké škody na chránenom zariadení. Krivka charakteristiky mžikovej nadprúdovej ochrany je uvedená na Obr. 27 [18] [19] [20] [21].



$t \rightarrow 0$ pre $I > I_p$
$t = \infty$ pre $I \leq I_p$

Obr. 27 Krivka charakteristiky mžikovej nadprúdovej ochrany

Základná podmienka pre nastavenie skratovej ochrany

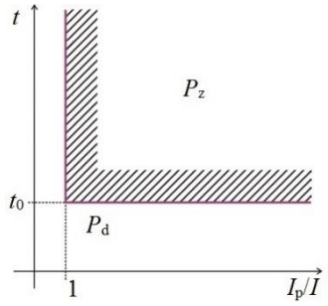
$$I''_{k\,min} > I_p > I_{Z\,max}\,, \tag{4}$$

kde I_p je hodnota nastavenia nadprúdového článku, $I''_{k\,min}$ je minimálna hodnota skratového prúdu, I_{Zmax} je maximálna okamžitá hodnota prúdu záťaže.

Väčšina výrobcov odporúča nastavenie $I_p \geq 1{,}5 \div 1{,}6.I_{Z\,max}$. Zároveň hodnota minimálneho skratového prúdu by mala dosiahnuť $I''_{k\,min} \geq 2.I_p$ [19].

4.1.1.2 Časovo nezávislá nadprúdová ochrana

Vypínací signál je vyslaný do vypínača po uplynutí vopred nastaveného času. Tento druh nadprúdovej ochrany sa zvyčajne používa ako záložná ochrana. Ak hlavná ochrana nezareaguje a nevyšle vypínací signál, potom je využitá záložná ochrana. Nastavenie vypínacieho času časovo závislej ochrany vo funkcii záložnej ochrany musí byť väčší ako vypínací čas hlavnej ochrany plus vypínací čas vypínača. Krivka charakteristiky časovo nezávislej nadprúdovej ochrany je na Obr. 28 [18] [19] [20] [21]. Používa sa na ochranu pred skratovými prúdmi a väčšinou je nutné ju kombinovať s časovo závislou charakteristikou.

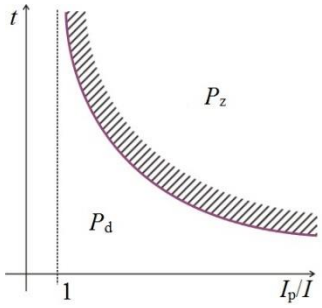


$t = t_{vyp}$ pre $I > I_p$
$t = \infty$ pre $I \leq I_p$

Obr. 28 Krivka charakteristiky časovo nezávislej nadprúdovej ochrany

4.1.1.3 Časovo závislá nadprúdová ochrana

Vypínací čas časovo závislej nadprúdovej ochrany je nepriamoúmerný poruchovému prúdu. Závislosť vypínacieho času na poruchovom prúde závisí na zvolenom štandarde – ANSI, IEEE, IEC alebo môže byť definovaný používateľom. Vypínací čas počíta ochrana podľa zvoleného štandardu a príslušných parametrov. Konštanty pre jednotlivé charakteristiky podľa štandardu IEC sú uvedené v Tab. 1 [18] [19] Krivka charakteristiky časovo závislej ochrany je na Obr. 29 [18] [19] [20] [21].



$$t = \frac{K}{(I - I_p)^n} \text{ pre } I > I_p$$

$$t = \infty \text{ pre } I \leq I_p$$

Obr. 29 Krivka charakteristiky časovo závislej nadprúdovej ochrany

Štandard IEC 60255-151 [18] definuje rovnicu (5) pre charakteristiku časovo závislej ochrany

$$t_{vyp} = \frac{\beta}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^{\alpha} - 1} \cdot TMS, \tag{5}$$

kde t_{vyp} je vypínací čas ochrany, β je konštanta pre charakteristiku ochrany, I_n je maximálny menovitý prúd ochrany, I je efektívna hodnota vstupného prúdu do ochrany (meraného prúdu), α je konštanta pre charakteristiku ochrany ($\alpha > 0$) a *TMS* je časový násobiteľ.

Tab. 1 Typy inverzných kriviek

Priebeh podľa IEC 60255-151	α	β
Standard Inverse	0.02	0.14
Very Inverse	1	13,5
Extremely Inverse	2	80
Long Inverse	1	120

Nadprúdové ochrany s časovo závislou charakteristikou chránia pre prúdovým preťažením. Základná podmienka pre nastavenie nadprúdovej ochrany pri preťažení

$$I_p > I_{Zmax}, \tag{6}$$

kde I_p je hodnota nastavenia nadprúdového článku, I_{Zmax} je maximálna okamžitá hodnota prúdu záťaže.

Odporúčaná hodnota nastavenia je $I_p \geq 1{,}2 \div 1{,}4 . I_{Zmax}$. Zároveň je nutné zaistiť aby ochrana nevybavila na prechodné zvýšenie zaťaženia nad hodnotu I_p je časové nastavenie ochrany (doba t_{vyp}).

4.1.2 Algoritmus nadprúdovej ochrany

Algoritmus nadprúdovej ochrany patrí k základným algoritmom medzi ochrannými funkciami. Porovnáva merané hodnoty prúdu s vopred nastavenou hodnotou prúdu a vyhodnocuje výskyt nadprúdu. Uvedený algoritmus kladie vysoké požiadavky na rýchlosť vyhodnotenia.

4.1.2.1 Algoritmus mžikovej nesmerovej nadprúdovej ochrany

Algoritmus mžikovej nesmerovej nadprúdovej ochrany musí vyhodnocovať nadprúd podľa krivky na Obr. 27. K svojej funkcii využíva nasledovné parametre:

Vstupy algoritmu

- okamžité hodnoty fázových prúdov i_A, i_B, i_C – SV.

Výstup algoritmu

- vypínací signál.

Parametre algoritmu

- I_{PRESET} – nastavená hodnota prúdu.

Algoritmus pracuje s okamžitými hodnotami prúdu. Je založený na prediktívnom algoritme. Prediktívny algoritmus pracuje s dvomi meranými hodnotami prúdu, ktoré nasledujú po sebe. Pomocou prediktívneho algoritmu je vyhodnotená špičková hodnota signálu. Potom je maximálna hodnota porovnávaná s nastavenou hodnotou. V prípade, že predpokladaná maximálna hodnota prúdu je vyššia, ako je nastavená hodnota, potom ochrana vyšle vypínací signál.

4.1.2.2 Predikčný algoritmus

Predikčný algoritmus pre mžikovú nesmerovú nadprúdovú ochranu musí byť rýchly a je schopný určiť špičkovú hodnotu signálu z minimálne dvoch vzoriek. Algoritmus využíva vzorky z diskrétnej časovej oblasti signálu [21].

Vzorkovací interval Δt pre sínusový signál s frekvenciou 50 Hz a vzorkovacou frekvenciou 80 vzoriek na periódu (4000 Hz):

$$\Delta t = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{80} = \frac{1}{50} \cdot \frac{1}{80} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\,\text{ms} = 250\,\mu\text{s}, \tag{7}$$

kde f je frekvencia prúdu.

Vzorky prúdu i_k, i_{k+1} merané v príslušnom čase t_k, t_{k+1} a Δt je vzorkovací interval.

$$i_k = I_{AMP} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_k), \tag{8}$$

$$i_{k+1} = I_{AMP} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_{k+1}) = I_{AMP} \cdot \sin\left[\omega_0 \cdot (t_k + \Delta t)\right], \tag{9}$$

$$i_{k+1} = I_{AMP} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_k) \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t) + I_{AMP} \cdot \sin(\omega_0 \cdot \Delta t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_k), \tag{10}$$

kde ω_0 je uhlová frekvencia a I je amplitúda prúdu.

Substitúciou (8) do (10) a zjednodušením výsledku

$$i_{\mathrm{k+1}} = i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t) + I_{\mathrm{AMP}} \cdot \sin(\omega_0 \cdot \Delta t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}), \tag{11}$$

$$\frac{i_{\mathrm{k+1}} - i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t)}{\sin(\omega_0 \cdot \Delta t)} = I_{\mathrm{AMP}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}), \tag{12}$$

Sčítaním druhej mocniny vzťahov (8) a (12) a úpravou podľa $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$, je odvodený vzťah pre druhú mocninu špičky prúdu sínusového signálu. Nižšie je uvedené odvodenie v jednotlivých krokoch až k výslednému vzťahu, ktorý je popísaný rovnicou (18).

$$i_{\mathrm{k}}^2 = I_{\mathrm{AMP}}^2 \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}), \tag{13}$$

$$\frac{i_{\mathrm{k+1}}^2 - 2 \cdot i_{\mathrm{k+1}} \cdot i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t) + i_{\mathrm{k}}^2 \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot \Delta t)}{\sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)} = I_{\mathrm{AMP}}^2 \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}), \tag{14}$$

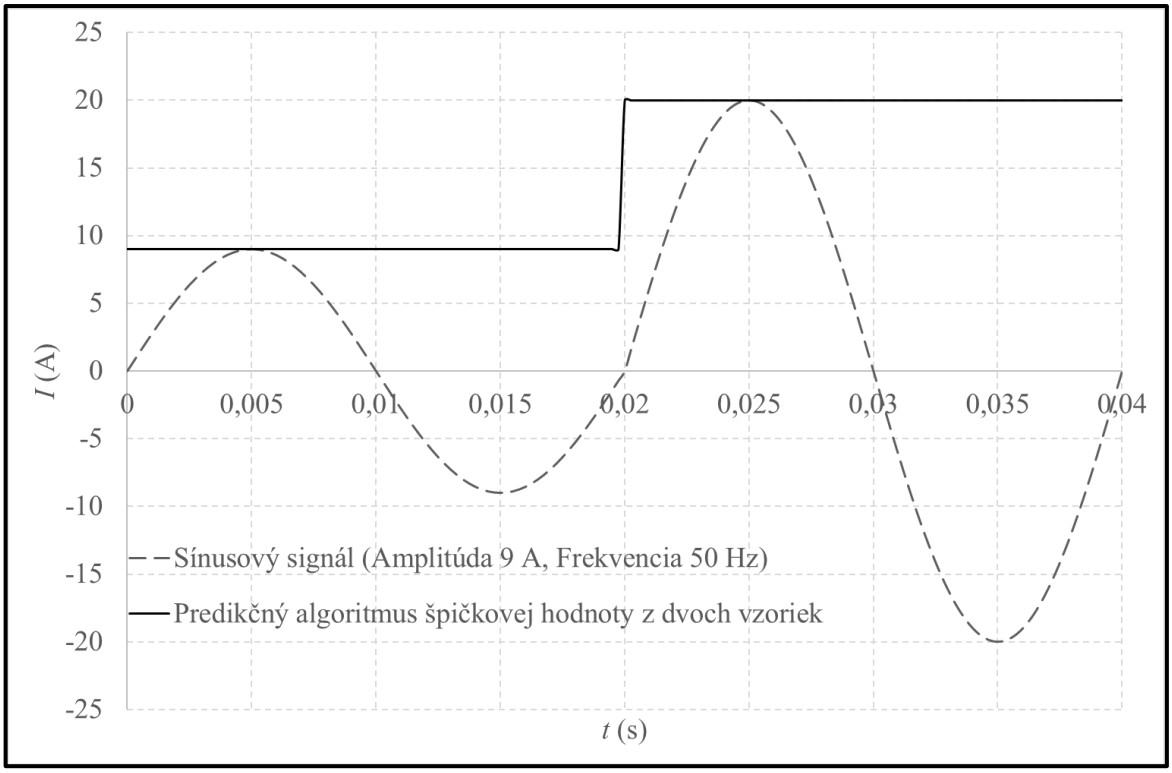
$$\begin{aligned} & i_{\mathrm{k}}^2 + \frac{i_{\mathrm{k+1}}^2 - 2 \cdot i_{\mathrm{k+1}} \cdot i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t) + i_{\mathrm{k}}^2 \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot \Delta t)}{\sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)} = \\ & = I_{\mathrm{AMP}}^2 \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}) + I^2 \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}), \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} & \frac{i_{\mathrm{k+1}}^2 - 2 \cdot i_{\mathrm{k+1}} \cdot i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t) + i_{\mathrm{k}}^2 \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot \Delta t) + i_{\mathrm{k}}^2 \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)}{\sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)} = \\ & = I_{\mathrm{AMP}}^2 \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}) + I^2 \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}), \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} & \frac{i_{\mathrm{k+1}}^2 - 2 \cdot i_{\mathrm{k+1}} \cdot i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t) + i_{\mathrm{k}}^2 \cdot \left[\cos^2(\omega_0 \cdot \Delta t) + \sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)\right]}{\sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)} = \\ & = I_{\mathrm{AMP}}^2 \cdot \left[\sin^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}}) + \cos^2(\omega_0 \cdot t_{\mathrm{k}})\right], \end{aligned} \tag{17}$$

$$I_{AMP} = \sqrt{\frac{i_{\mathrm{k}}^2 + i_{\mathrm{k+1}}^2 - 2 \cdot i_{\mathrm{k+1}} \cdot i_{\mathrm{k}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \Delta t)}{\sin^2(\omega_0 \cdot \Delta t)}}, \tag{18}$$

Predikčný algoritmus bol použitý na stanovenie špičky prúdu sínusového signálu s frekvenciou 50 Hz a amplitúdou 9 A, ktorý bol skokovo zmenený na 20 A po prvej perióde. Výsledky predikčného algoritmu boli spracované v MS Excel a graf funkcie je znázornený na Obr. 30.



Obr. 30 Závislosť prúdu na čase – výsledky predikčného algoritmu v MS Excel

4.1.2.3 Algoritmus časovo nezávislej nesmerovej nadprúdovej ochrany

Algoritmus časovo nezávislej nesmerovej nadprúdovej ochrany musí vyhodnocovať nadprúd podľa krivky na Obr. 28. K svojej funkcii využíva nasledovné parametre:

Vstupy algoritmu

- efektívne hodnoty fázových prúdov I_A, I_B, I_C.

Výstup algoritmu

- vypínací signál

Parametre algoritmu

- I_{PRESET} – nastavená hodnota prúdu,
- P_{NULL} – pomer nulovania,
- T_{TRIP} – vypínací čas,
- T_{NULL} – čas nulovania po poklese prúdu,
- $T_{DEACTIVATION}$ – čas deaktivácie vypínacieho signálu,
- S_{rA}, S_{rB}, S_{rC} – rozbehový signál,
- T_{iA}, T_{iB}, T_{iC} – integračná premenná,
- T_{zA}, T_{zB}, T_{zC} – čas zotavenia.

Algoritmus pracuje s efektívnymi hodnotami, ktoré sú počítané z okamžitých hodnôt prúdu, každú periódu podľa rovnice (19).

$$I_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} i_X^2}{N}}, \tag{19}$$

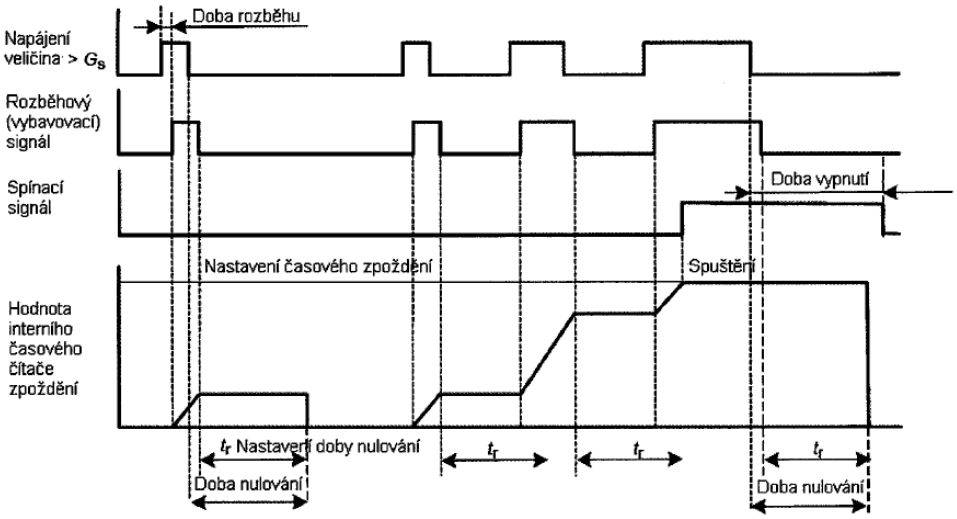
kde I_X je efektívna hodnota prúdu vo fáze X (X = A, B, C), N je množstvo prvkov, z ktorých je vyhodnocovaná efektívna hodnota (perióda – 80 vzoriek) a i_X je okamžitá hodnota prúdu vo fáze X (X = A, B, C).

Pre výpočet efektívnych hodnôt je možné využiť zložky prvej harmonickej vypočítaných pomocou FFT z okamžitých hodnôt fázových prúdov i_A, i_B, i_C.

Ak niektorý z prúdov – I_A, I_B, I_C prekročí I_{PRESET} je aktivovaný rozbehový signál S_{rX} (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu) a začína sa integrovať premenná T_{iX} (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu). Ak jedna z premenných T_{iA}, T_{iB}, T_{iC} prekročí vypínací čas T_{TRIP}, je aktivovaný vypínací signál.

Ak prúd I_X (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu) klesne pod medzu $I_{PRESET} \cdot P_{NULL}$, je deaktivovaný rozbehový signál a začína sa integrovať premenná T_{zX} (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu). Ak doba zotavenia T_{zX} (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu) prekročí čas nulovania T_{NULL}, integračná premenná T_{iX} (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu) sa vynuluje.

Charakteristika pevného časového nulovania podľa normy IEC 60255-151 [18] je uvedená na Obr. 31 [5].



Obr. 31 Charakteristika pevného časového nulovania podľa IEC 60255-151

4.1.2.4 Algoritmus časovo závislej nesmerovej nadprúdovej ochrany

Algoritmus časovo závislej nesmerovej nadprúdovej ochrany je zhodný s algoritmom časovo nezávislej nesmerovej nadprúdovej ochrany s rozdielom v nastavení vypínacieho času. U časovo závislej nadprúdovej ochrany je vypínací čas závislý na veľkosti nadprúdu podľa vzťahu (5) uvedeného v kapitole 4.1.1.3. Pre algoritmus časovo závislej nesmerovej nadprúdovej ochrany je nutné zadať parameter I_n – menovitý prúd pre chránené zariadenie. Krivka časovo závislej nesmerovej nadprúdovej ochrany je na Obr. 29.

4.2 Smerový člen

Smerový člen pre nadprúdové ochrany porovnáva fázor prúdu a polarizačný fázor. Algoritmy smerového člena je možné rozdeliť podľa polarizačných premenných na:

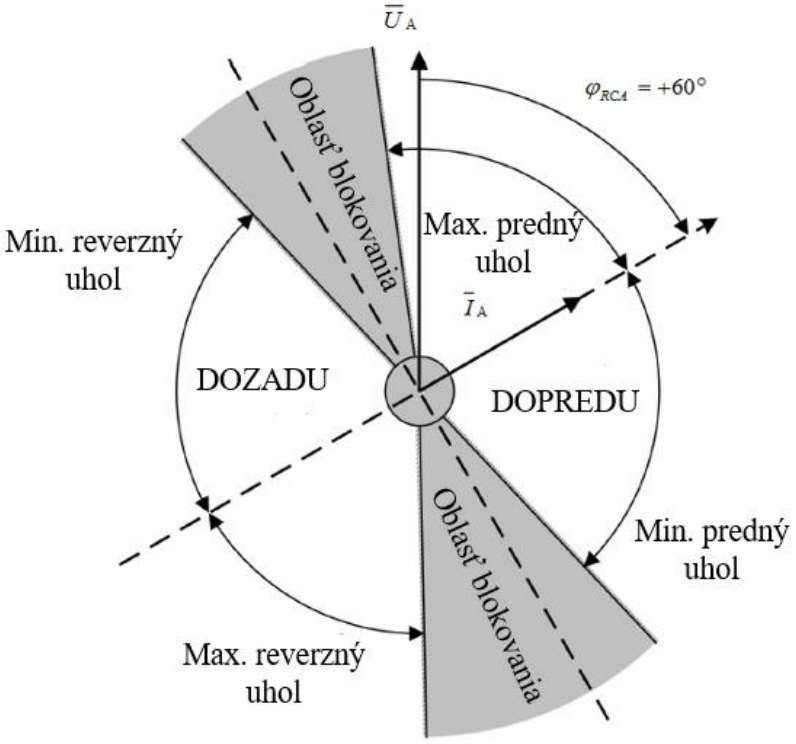
- polarizácia podľa združených napätí,
- polarizácia podľa fázových napätí,
- polarizácia podľa spätnej zložky napätí,
- polarizácia podľa súslednej zložky napätí.

Pri nastavení smerového člena je okrem výberu polarizačnej premennej nutné určiť charakteristický uhol φ_{RCA}. Charakteristický uhol je nastavený kladne ak je fázor prúdu oneskorený za fázorom polarizačného napätia. V prípade ak fázor prúdu predbieha fázor polarizačného napätia je charakteristický uhol nastavený záporne.

4.2.1 Polarizácia podľa združených napätí

Vstupnými hodnotami pre smerový člen využívajúci polarizáciu podľa združených napätí sú výstupy z DFT analýzy meraných hodnôt napätia a prúdu pre určenie fázoru všetkých fázových (združených) napätí a fázorov odberových prúdov pre základnú harmonickú. Na základe získaných fázorov je následne možne vyhodnotiť smer poruchy [22].

Jednotlivé parametre pre nastavenie smerového členu sú uvedené na Obr. 32 [22]



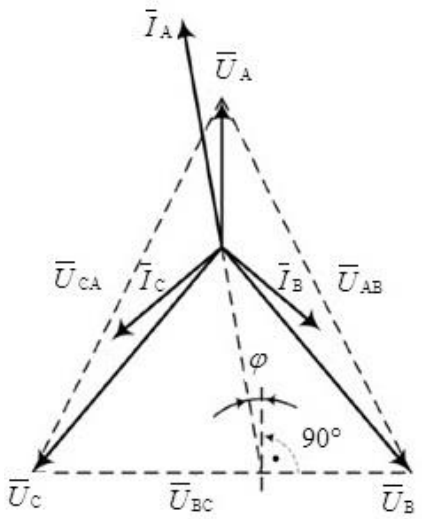
Obr. 32 Konfigurovateľné parametre smerového členu

Smerový člen je naviazaný na algoritmy nadprúdových ochrán, ktoré sú definované v kapitole 4.1.2. V prípade, že algoritmus nadprúdovej ochrany vyhodnotí, že nastal nadprúd v určitej fáze, smerový člen na základe vzťahov uvedených v Tab. 2 [22] vyhodnotí smer poruchy .

Tab. 2 Rovnice pre výpočet fázového uhla pre polarizáciu podľa združených napätí

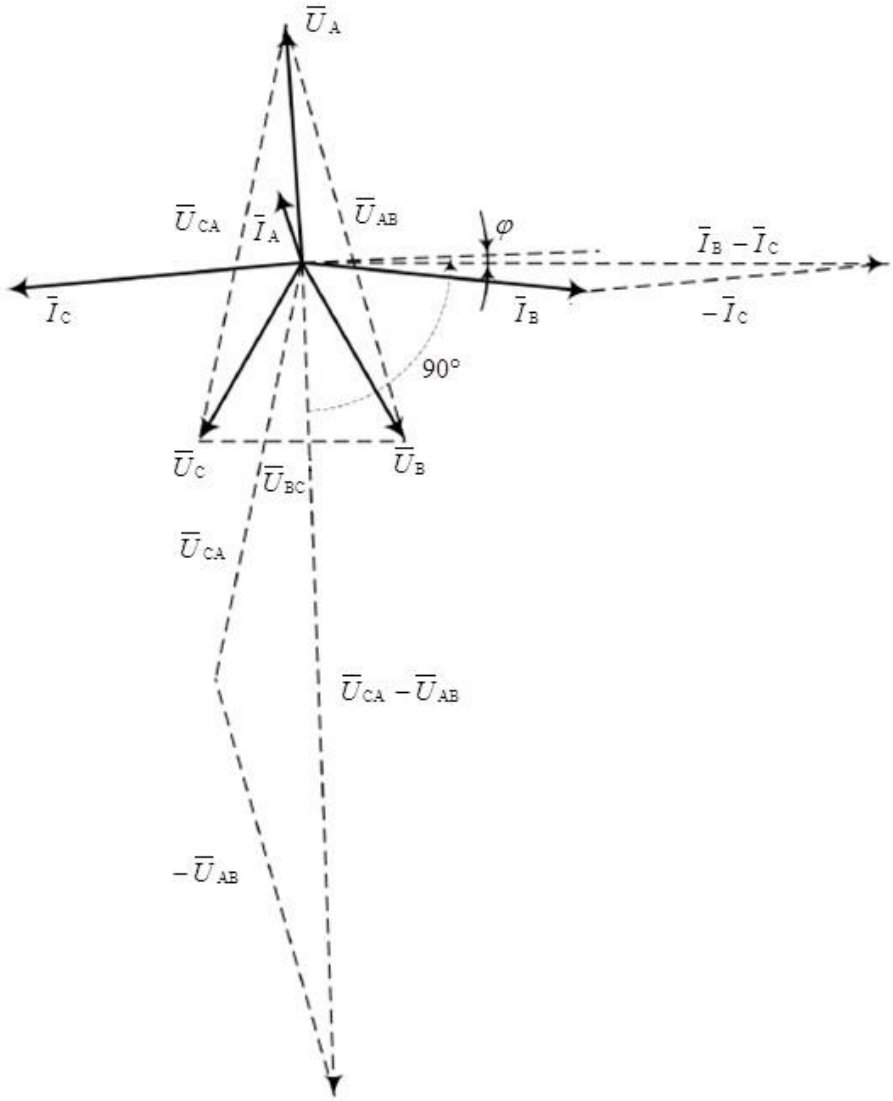
Postihnutá fáza	Poruchový prúd	Polarizačné napätie	Fázový uhol
A	$\overline{I}_A$	$\overline{U}_{BC}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{BC}) - \varphi(\overline{I}_A) - \varphi_{RCA} + 90°$
B	$\overline{I}_B$	$\overline{U}_{CA}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{CA}) - \varphi(\overline{I}_B) - \varphi_{RCA} + 90°$
C	$\overline{I}_C$	$\overline{U}_{AB}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{AB}) - \varphi(\overline{I}_C) - \varphi_{RCA} + 90°$
A-B	$\overline{I}_A - \overline{I}_B$	$\overline{U}_{BC} - \overline{U}_{CA}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{BC} - \overline{U}_{CA}) - \varphi(\overline{I}_A - \overline{I}_B) - \varphi_{RCA} + 90°$
B-C	$\overline{I}_B - \overline{I}_C$	$\overline{U}_{CA} - \overline{U}_{AB}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{CA} - \overline{U}_{AB}) - \varphi(\overline{I}_B - \overline{I}_C) - \varphi_{RCA} + 90°$
C-A	$\overline{I}_C - \overline{I}_A$	$\overline{U}_{AB} - \overline{U}_{BC}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{AB} - \overline{U}_{BC}) - \varphi(\overline{I}_C - \overline{I}_A) - \varphi_{RCA} + 90°$

V prípade ak nastane nadprúd vo fáze A, smerový člen určí fázový uhol podľa prvého riadku Tab. 2. Na Obr. 33 [22] je znázornený fázorový diagram pri jednofázovej zemnej poruche vo fáze A. Charakteristicky uhol φ_{RCA} je ~ 0°. Fázový uhol je medzi napätím $\overline{U}_{BC}$ a prúdom $\overline{I}_A$ [22].



Obr. 33 Fázorový diagram jednofázovej zemnej poruchy

Fázorový diagram dvojfázového skratu je uvedený na Obr. 34 [14]. Porucha nastala medzi fázami B a C, fázový uhol je medzi napätím $\overline{U}_{AB}$ a prúdmi $\overline{I}_B - \overline{I}_C$ označený ako φ.



Obr. 34 Fázorový diagram dvojfázového skratu medzi fázami B a C

Rovnice uvedené v Tab. 2 sú platné pre sieť, v ktorej je smer rotácie ABC. V prípade ak je smer rotácie ACB, potom je nutné pripočítať 180° k výsledným uhlom, ktoré boli určené podľa rovníc uvedených v Tab. 2.

4.2.2 Polarizácia podľa fázových napätí

Vstupnými hodnotami pre smerový člen využívajúci polarizáciu podľa fázových napätí sú výstupy z DFT analýzy meraných hodnôt napätia a prúdu pre určenie fázoru všetkých fázových (združených) napätí a fázorov odberových prúdov pre základnú harmonickú. Na základe získaných fázorov je následne možné vyhodnotiť smer poruchy.

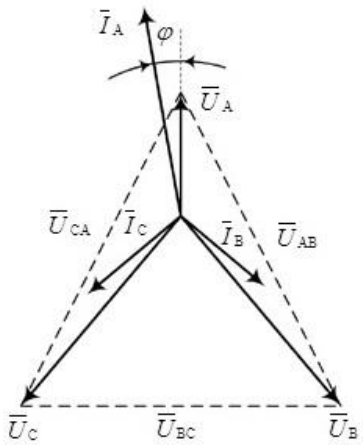
Jednotlivé parametre pre nastavenie smerového členu sú uvedené na Obr. 32 [22].

Smerový člen je naviazaný na algoritmy nadprúdových ochrán, ktoré sú definované v kapitole 4.1.2. V prípade, že algoritmus nadprúdovej ochrany vyhodnotí, že nastal nadprúd v určitej fáze, smerový člen na základe vzťahov uvedených v Tab. 3 [22] vyhodnotí smer poruchy.

Tab. 3 Rovnice pre výpočet fázového uhla pre polarizáciu podľa fázových napätí

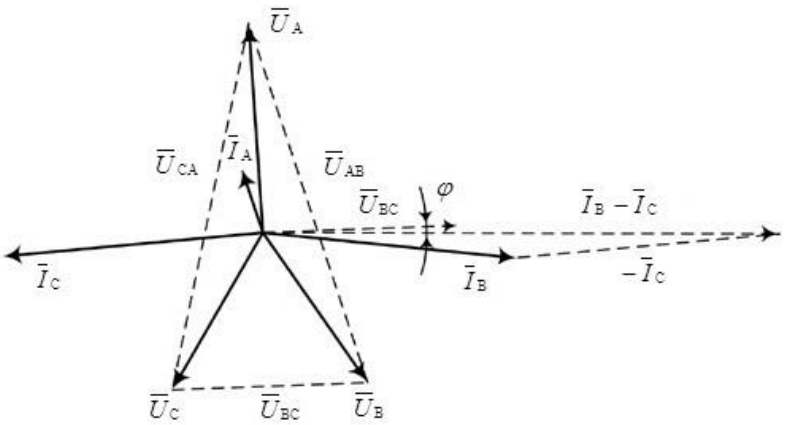
Postihnutá fáza	Poruchový prúd	Polarizačné napätie	Fázový uhol
A	$\overline{I}_A$	$\overline{U}_A$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_A) - \varphi(\overline{I}_A) - \varphi_{RCA}$
B	$\overline{I}_B$	$\overline{U}_B$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_B) - \varphi(\overline{I}_B) - \varphi_{RCA}$
C	$\overline{I}_C$	$\overline{U}_C$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_C) - \varphi(\overline{I}_C) - \varphi_{RCA}$
A-B	$\overline{I}_A - \overline{I}_B$	$\overline{U}_{AB}$	$\varphi_A = \varphi(\overline{U}_{AB}) - \varphi(\overline{I}_A - \overline{I}_B) - \varphi_{RCA}$
B-C	$\overline{I}_B - \overline{I}_C$	$\overline{U}_{BC}$	$\varphi_B = \varphi(\overline{U}_{BC}) - \varphi(\overline{I}_B - \overline{I}_C) - \varphi_{RCA}$
C-A	$\overline{I}_C - \overline{I}_A$	$\overline{U}_{CA}$	$\varphi_C = \varphi(\overline{U}_{CA}) - \varphi(\overline{I}_C - \overline{I}_A) - \varphi_{RCA}$

V prípade ak nastane nadprúd vo fáze A, smerový člen určí fázový uhol podľa prvého riadku Tab. 3. Na Obr. 35 [22] je znázornený fázorový diagram pri jednofázovej zemnej poruche vo fáze A. Charakteristicky uhol φ_{RCA} je ~ 0°. Fázový uhol je medzi napätím $\overline{U}_A$ a prúdom $\overline{I}_A$ [22].



Obr. 35 Fázorový diagram jednofázovej zemnej poruchy

Fázorový diagram dvojfázového skratu je uvedený na Obr. 36 [22]. Porucha nastala medzi fázami B a C, fázový uhol je medzi napätím $\overline{U}_{BC}$ a prúdmi $\overline{I}_B - \overline{I}_C$ označený ako φ [22].



Obr. 36 Fázorový diagram dvojfázového skratu medzi fázami B a C

4.2.3 Polarizácia podľa spätnej zložky napätí

V prípade ak je ako polarizačná premenná použitá spätná zložka napätia je uhol medzi prúdom a napätím určený pre všetky druhy porúch na základe rovnice

$$\varphi = \varphi\left(-\overline{U}^{(2)}\right) - \varphi\left(-\overline{I}^{(2)}\right) - \varphi_{\mathrm{RCA}}\,, \tag{20}$$

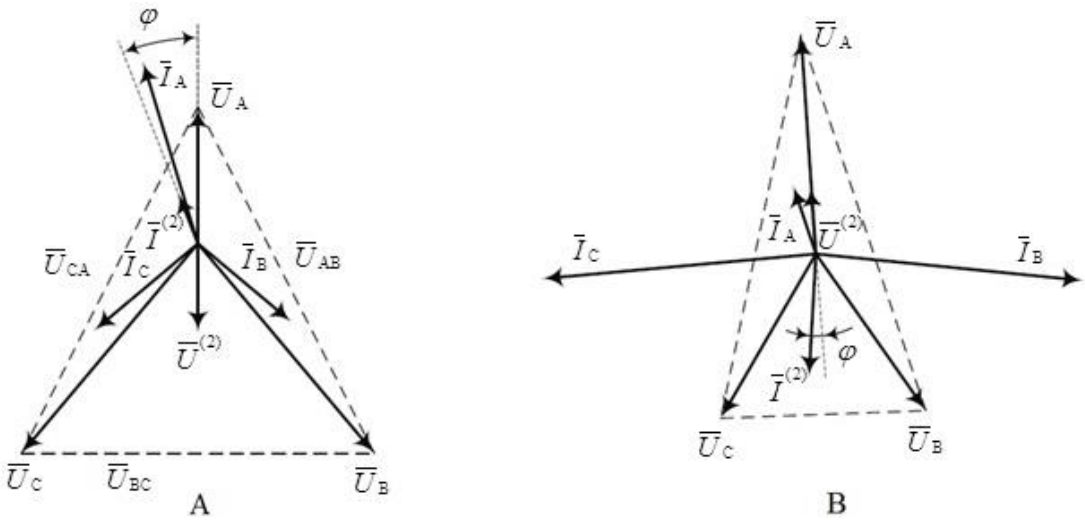
Spätnú zložku prúdu a napätia je možné určiť podľa rovníc (21) [23] a (22) [23] z fázorov prúdov a napätí získaných z DFT analýzy meraných prúdov a napätí.

$$\overline{U}^{(2)} = \frac{1}{3}\cdot\left(\overline{U}_{\mathrm{A}} + \overline{a}^{2}\cdot\overline{U}_{\mathrm{B}} + \overline{a}\cdot\overline{U}_{\mathrm{C}}\right), \tag{21}$$

$$\overline{I}^{(2)} = \frac{1}{3}\cdot\left(\overline{I}_{\mathrm{A}} + \overline{a}^{2}\cdot\overline{I}_{\mathrm{B}} + \overline{a}\cdot\overline{I}_{\mathrm{C}}\right), \tag{22}$$

kde $\overline{U}^{(2)}$ je spätná zložka napätia a $\overline{I}^{(2)}$ je spätná zložka prúdu.

Na Obr. 37 A [22] sú zobrazené fázorové diagramy pre jednofázovú zemnú poruchu vo fáze A-N a na Obr. 37 B [22] - dvojfázový skrat medzi fázami B a C v prípade ak je ako polarizačná premenná uvažovaná spätná zložka napätia [22].



Obr. 37 Fázorové diagramy pre jednofázovú zemnú poruchu vo fáze A-N (A) a dvojfázový skrat medzi fázami B a C (B), v prípade ak je ako polarizačná premenná uvažovaná spätná zložka napätia

4.2.4 Polarizácia podľa súslednej zložky napätí

Vstupnými hodnotami pre smerový člen využívajúci polarizáciu podľa súslednej zložky napätia sú výstupy z DFT analýzy meraných hodnôt napätia a prúdu pre určenie fázoru všetkých fázových (združených) napätí a fázorov odberových prúdov pre základnú harmonickú. Na základe získaných fázorov je následne možné určiť súslednú zložku napätia podľa rovnice (23) [23] a vyhodnotiť smer poruchy.

$$\overline{U}^{(1)} = \frac{1}{3}\cdot\left(\overline{U}_{\mathrm{A}} + \overline{a}\cdot\overline{U}_{\mathrm{B}} + \overline{a}^{2}\cdot\overline{U}_{\mathrm{C}}\right), \tag{23}$$

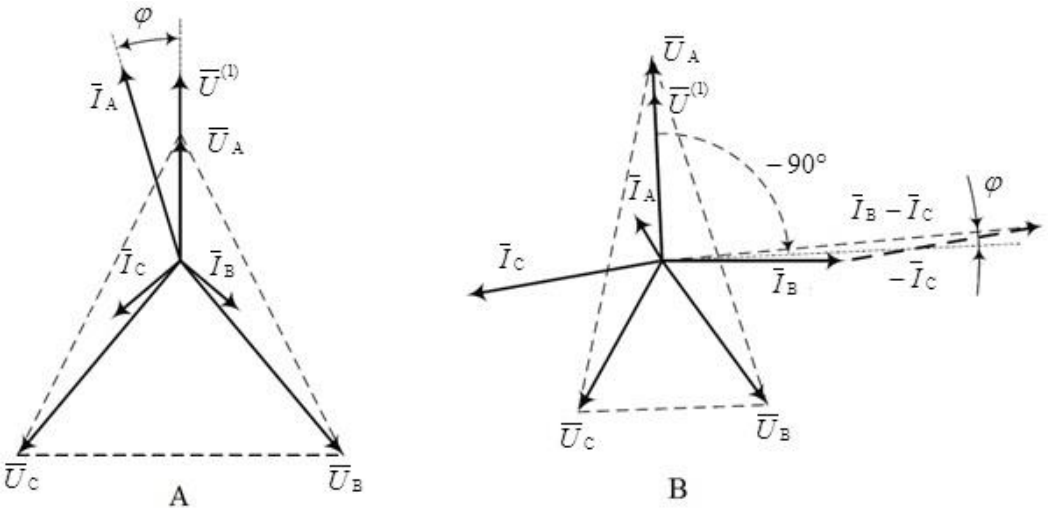
kde $\overline{U}^{(1)}$ je súsledná zložka napätia.

Jednotlivé parametre pre nastavenie smerového člena sú uvedené na Obr. 32. Smerový člen je naviazaný na algoritmy nadprúdových ochrán, ktoré sú definované v kapitole 4.1.2. V prípade, že algoritmus nadprúdovej ochrany vyhodnotí, že nastal nadprúd v určitej fáze, smerový člen na základe vzťahov uvedených v Tab. 4 [14] vyhodnotí smer poruchy.

Tab. 4 Rovnice pre výpočet fázového uhla pre polarizáciu podľa súslednej zložky napätí

Postihnutá fáza	Poruchový prúd	Polarizačné napätie	Fázový uhol
A	$\bar{I}_A$	$\bar{U}^{(1)}$	$\varphi_A = \varphi(\bar{U}^{(1)}) - \varphi(\bar{I}_A) - \varphi_{RCA}$
B	$\bar{I}_B$	$\bar{U}^{(1)}$	$\varphi_A = \varphi(\bar{U}^{(1)}) - \varphi(\bar{I}_B) - \varphi_{RCA} - 120°$
C	$\bar{I}_C$	$\bar{U}^{(1)}$	$\varphi_A = \varphi(\bar{U}^{(1)}) - \varphi(\bar{I}_C) - \varphi_{RCA} + 120°$
A-B	$\bar{I}_A - \bar{I}_B$	$\bar{U}^{(1)}$	$\varphi_A = \varphi(\bar{U}^{(1)}) - \varphi(\bar{I}_A - \bar{I}_B) - \varphi_{RCA} + 30°$
B-C	$\bar{I}_B - \bar{I}_C$	$\bar{U}^{(1)}$	$\varphi_A = \varphi(\bar{U}^{(1)}) - \varphi(\bar{I}_B - \bar{I}_C) - \varphi_{RCA} - 90°$
C-A	$\bar{I}_C - \bar{I}_A$	$\bar{U}^{(1)}$	$\varphi_A = \varphi(\bar{U}^{(1)}) - \varphi(\bar{I}_C - \bar{I}_A) - \varphi_{RCA} + 150°$

Na Obr. 38 A [22] sú zobrazené fázorové diagramy pre jednofázovú zemnú poruchu vo fáze A-N a na Obr. 38 B [22] - dvojfázový skrat medzi fázami B a C v prípade ak je ako polarizačná premenná uvažovaná súsledná zložka napätia.,



Obr. 38 Fázorové diagramy pre jednofázovú zemnú poruchu vo fáze A-N (A) a dvojfázový skrat medzi fázami B a C (B), v prípade ak je ako polarizačná premenná uvažovaná súsledná zložka napätia

4.2.5 Záznam napätí pre smerový člen

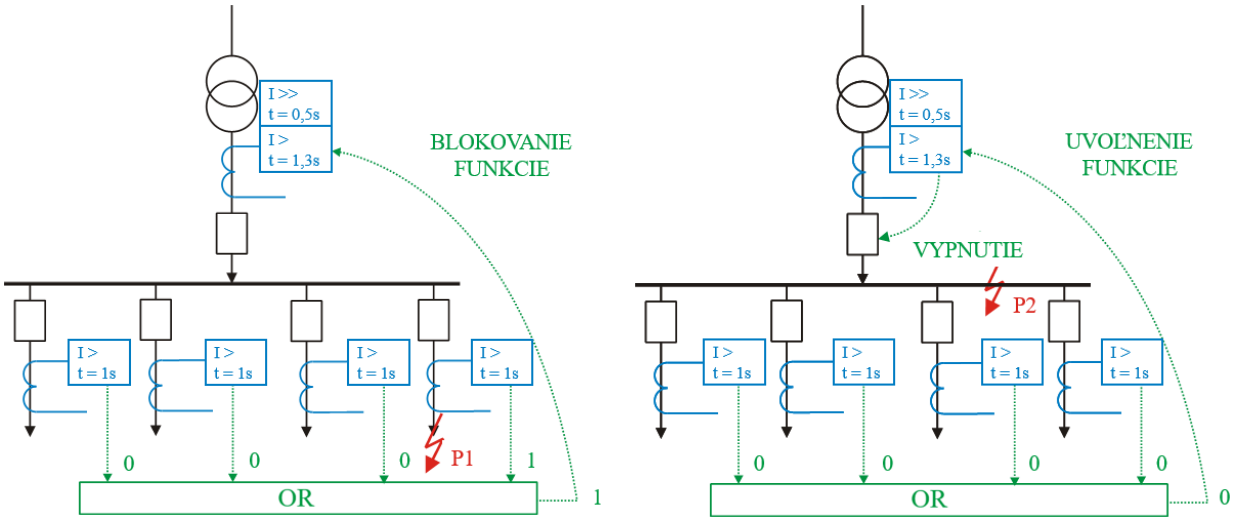
V prípade ak nastane blízky skrat alebo zemné spojenie dochádza k poklesu napätí a nemožnosti vyhodnotiť smer prúdu. Pre potreby smerového člena sa v týchto prípadoch využíva fiktívne napätie, ktoré je zaznamenané pred poruchou. Využíva sa záznam súslednej zložky napätia pred poruchou tak aby napätie nebolo ovplyvnené poruchou [22].

Záznam napätí nie je možné využiť pre polarizáciu podľa spätnej zložky napätí nakoľko nie je možné nahradiť súslednú zložku napätia za spätnú zložku napätia bez informácie o nesymetrii siete [22].

4.3 Logická ochrana prípojníc

Prípojnice prenášajú vysoké výkony a skraty na prípojniciach patria medzi najzávažnejšie poruchy v elektrizačnej sústave. Každá porucha na prípojniciach vedie k prerušeniu dodávky elektrickej energie k spotrebiteľom. Ochrana prípojníc patrí medzi najdôležitejšie ochrany v rozvodni a musí byť preto ochranou rýchlou, spoľahlivou a selektívnou. Voľba ochrany závisí na usporiadaní, schéme a konštrukčnom riešení prípojníc [24].

Jednou z možností chránenia prípojníc je logická ochrana prípojníc, ktorá pracuje na princípe vzájomnej komunikácie nadprúdových ochrán v rozvodni. Jedná sa o blokovanie nadprúdovej ochrany v prívodnom poli rozvodne. Logická ochrana prípojníc sa používa väčšinou v distribučných rozvodniach. Princíp blokovania nadprúdovej ochrany je uvedený na Obr. 39 [24].



Obr. 39 Bloková schéma funkcie logickej ochrany prípojníc

Blokovanie spočíva v tom, že ochrany umiestnené vo vývodových odbočkách posielajú informáciu ochrane umiestnenej v prívodnej odbočke. Ak je porucha v jednej z vývodových odbočiek (P1), ochrana v tejto odbočke posiela ochrane umiestnenej v prívodnej odbočke blokovací signál. Potom sa ochrana v prívodnej odbočke prepne do nastavenia dlhšieho času pôsobenia ako je čas nastavený v odbočke vývodu postihnutého poruchou. Ochrana v prívodnej odbočke reaguje iba po zlyhaní ochrany vo vývodovej odbočke. V prípade správnej funkcie ochrany vo vývodovej odbočke ochrana v prívodnej odbočke nepošle vypínací signál výkonovému vypínaču. V rozvodni je vypnutá len odbočka, v ktorej nastala porucha. Ochrany v ostatných vývodoch taktiež nereagujú nakoľko chránia len príslušný vývod. V prípade skratu na prípojniciach (P2) alebo v prívodnej odbočke, ochrana v prívodnej odbočke reaguje v nastavenom čase a vypína celú rozvodňu [25].

4.3.1 Popis algoritmu logickej ochrany prípojníc

Pre algoritmus logickej ochrany prípojníc je nutné aby jednotlivé odbočky mali nastavený algoritmus časovo nezávislej nesmerovej nadprúdovej ochrany. Samotný algoritmus logickej ochrany prípojníc využíva informácie o nadprúde vo vývodových odbočkách a na základe tejto informácie je schopný zmeniť nastavený čas v prívodnej odbočke

Vstupy algoritmu

- S_{rA}, S_{rB}, S_{rC} – rozbehový signál, informácia o nadprúde v jednej z vývodových odbočiek.

Výstup algoritmu

- vyhodnocovací signál – signál posielaný prívodnej odbočke.

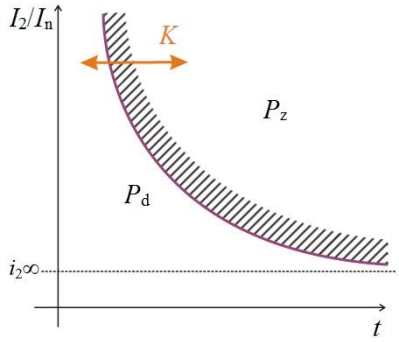
Parametre algoritmu

- T_1 – čas pôsobenia v prívodnej odbočke v prípade ak je porucha v jednej z vývodových odbočiek.

V prípade ak v jednej z vývodových odbočiek je zaznamenaný nadprúd, rozbehový signál S_{rX} (X predstavuje fázu, v ktorej došlo k nadprúdu) do logickej ochrany prípojníc. Logická ochrana prípojníc následne odosiela zmenu nastaveného vypínacieho času prívodnej odbočke – čas T_1. V prípade ak bude porucha v prívodnej odbočke alebo na prípojniciach – prívodná odbočka vypína v prednastavenom čase.

4.4 Ochrana pri nesymetrii

Ochrana pri nesymetrii predstavuje časovo závislú nesmerovú nadprúdovú funkciu, ktorá vyhodnocuje spätnú zložku prúdu. Charakteristika funkcie je zhodná s charakteristikou časovo závislej ochrany – charakteristika ochrany pri nesymetrii je uvedená na Obr. 40 .



Obr. 40 Charakteristika ochrany pri nesymetrii

Ochrana pri nesymetrii je charakterizovaná rovnicou

$$K = \int_0^{T_{nesym}} i^{(2)^2} \mathrm{d}t, \tag{24}$$

kde K je pomerné akumulované teplo v rotore za čas T_{nesym}, $i^{(2)}$ je spätná zložka prúdu v pomerných jednotkách, T_{nesym} je trvanie nesymetrie.

Pre každý stroj je výrobcom definovaná hodnota K_{max}, ktorá je závislá na dizajne rotora a nesmie byť prekročená, potom je vypínacia charakteristika ochrany pri nesymetrii definovaná rovnicou pre vypínací čas

$$T_{nesym} = \frac{K_{max}}{\left(\frac{\left|\bar{I}^{(2)}\right|}{I_{nG}}\right)^2 - StartValue^2} \tag{25}$$

kde K_{max} je maximálne dovolené pomerné akumulované teplo v rotore, $\left|\bar{I}^{(2)}\right|$ je veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu, I_{nG} je menovitý prúd chráneného generátora, *StartValue* je hodnota nesymetrie, ktorá je povolená v normálnych prevádzkových podmienkach.

4.4.1 Popis algoritmu ochrany pri nesymetrii

Algoritmus ochrany pri nesymetrii využíva podobný algoritmus ako časovo závislá nesmerová nadprúdová ochrana, s tým rozdielom, že vyhodnocuje spätnú zložku prúdu.

K svojej funkcii využíva nasledovné parametre:

Vstupy algoritmu

- veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu $\left|\bar{I}^{(2)}\right|$ – vypočítaná podľa vzťahu (26) z fázorov zložky prvej harmonickej prúdov, ktorá bola vypočítaná pomocou FFT z okamžitých hodnôt fázových prúdov i_A, i_B, i_C – SV.

Výstup algoritmu

- vypínací signál.

Parametre algoritmu

- *StartValue* – nastavená hodnota nesymetrie, ktorá je povolená,
- K_{max} – maximálne dovolené akumulované teplo chránenom generátore,
- I_n – menovitý prúd chráneného generátora,
- P_{NULL} – pomer nulovania,
- T_{TRIP} – vypínací čas,
- T_{NULL} – čas nulovania po poklese prúdu,
- $T_{DEACTIVATION}$ – čas deaktivácie vypínacieho signálu,
- S_r, – rozbehový signál,
- T_i – integračná premenná,
- T_z – čas zotavenia.

Algoritmus pracuje so spätnou zložkou prúdu, ktorá je počítaná zo zložky prvej harmonickej meraných prúdov, každú periódu podľa rovnice (22), veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu je určená podľa rovnice (26). Zložka prvej harmonickej meraných prúdov je určená pomocou FFT.

$$\left|\bar{I}^{(2)}\right| = \left|\frac{1}{3}\cdot\left(\bar{I}_{\mathrm{A}} + \bar{a}^{2}\cdot\bar{I}_{\mathrm{B}} + \bar{a}\cdot\bar{I}_{\mathrm{C}}\right)\right|, \tag{26}$$

kde $\left|\bar{I}^{(2)}\right|$ je veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu, $\bar{I}_{\mathrm{X}}$ je fázor prvej harmonickej fázového prúdu vo fáze X (X = A, B, C), $\bar{a}$ je matematická premenná určená – $\bar{a} = 1\angle 120°$, $\bar{a}^{2} = 1\angle 240°$.

Ak veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu $\left|\bar{I}^{(2)}\right|$ prekročí *StartValue* je aktivovaný rozbehový signál S_{r} a začína sa integrovať premenná T_{i}. Ak premenná T_{i} prekročí vypínací čas T_{TRIP}, je aktivovaný vypínací signál.

Ak veľkosť fázoru spätnej zložky prúdu $\left|\bar{I}^{(2)}\right|$ klesne pod medzu *StarValue* · P_{NULL}, je deaktivovaný rozbehový signál a začína sa integrovať premenná T_{z} . Ak doba zotavenia T_{z} prekročí čas nulovania T_{NULL}, integračná premenná T_{i} sa vynuluje.

4.5 Diferenciálna ochrana

Diferenciálne ochrany vyhodnocujú poruchu na základe rozdielu fázorov prúdov na vstupoch a výstupoch chráneného zariadenia, ktorým môže byť vedenie, transformátor, generátor a iné. Ak je súčet prúdov nenulový, predstavuje to existenciu nového zvodu, ktorým uniká poruchový – diferenciálny prúd. V tomto prípade sa v chránenom objekte nachádza vnútorná porucha a ochrana vybaví.

Diferenciálne ochrany je možné rozdeliť:

1. Priečna diferenciálna ochrana
2. Pozdĺžna diferenciálna ochrana

4.5.1 Priečna diferenciálna ochrana

Priečna diferenciálna ochrana je založená na vyhodnocovaní stabilizovaného diferenciálneho prúdu I_{d}. Algoritmus sčítava fázory prúdu základnej frekvenčnej zložky – jednosmerné a harmonické zložky sú potlačené. Diferenciálny prúd je vyhodnocovaný ochranou pre každú fázu a pre každú chránenú zónu – sekciu prípojníc [24]. Diferenciálny prúd je prúd pri n odbočkách pripojených na chránenú prípojnicu

$$I_{\mathrm{d}} = \left|\sum_{j=1}^{n}\bar{I}_{j}\right|, \tag{27}$$

kde I_{d} je diferenciálny prúd a $\bar{I}_{j}$ je prúd v j-tej odbočke.

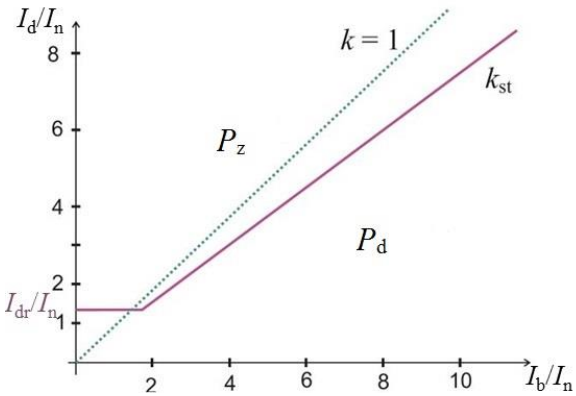
Z dôvodu sčítania veľkého počtu prúdov musí byť vykonaná kompenzácia citlivosti diferenciálnych meracích členov pomocou stabilizačného prúdu

$$I_{\mathrm{b}} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left|\bar{I}_{j}\right|}{n}, \tag{28}$$

kde I_{b} je stabilizačný prúd, I_{j} je prúd v j-tej odbočke a n predstavuje celkový počet odbočiek.

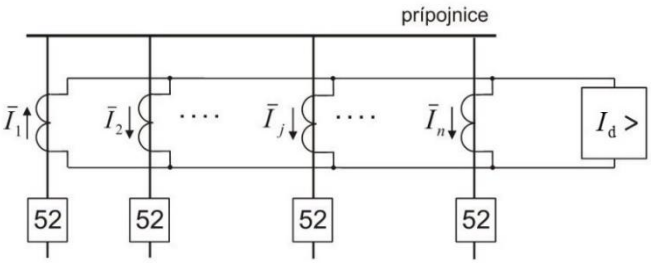
Sklon vypínacej charakteristiky, uvedenej na Obr. 41 [24] je daný hodnotou stabilizačného faktora

$$k_{st} = \frac{I_d}{I_b}, \tag{29}$$



Obr. 41 Vypínacia charakteristika diferenciálnej ochrany prípojníc

Správna funkcia diferenciálnej ochrany je závislá na použitých prístrojových transformátoroch prúdu v jednotlivých odbočkách. Príklad zapojenia diferenciálnej ochrany prípojníc je uvedený na Obr. 42 [24]. V prípade tohto zapojenia musia mať prístrojové transformátory prúdu rovnaký prevod a nadprúdové číslo aby ochrana nepôsobila pri vonkajších skratoch, kedy dochádza k vzniku diferenciálneho prúdu I_d vplyvom presýtenia prístrojového transformátora prúdu v odbočke s poruchou [24].



Obr. 42 Princíp priečnej diferenciálnej ochrany

V prípadoch, kedy nie je možné zaistiť rovnaký prevod a nadprúdové číslo u prístrojových transformátorov prúdu je potrebné vykonať opatrenia k tomu, aby ochrana správne vyhodnocovala vnútorné a vonkajšie skraty. Na základe uvedeného je možné diferenciálnu ochranu prípojníc rozdeliť na dva koncepty

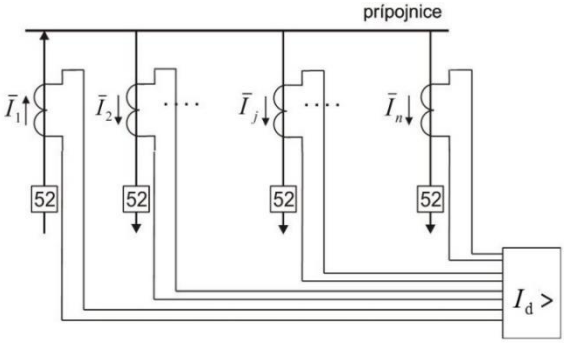
- nízkoimpedančná diferenciálna ochrana prípojníc,
- vysokoimpedančná diferenciálna ochrana prípojníc.

4.5.1.1 Nízkoimpedančná diferenciálna ochrana prípojníc

Sekundárna strana prúdových transformátorov prúdu je pripojená samostatne pre každú fázu a pre každý vývod chránenej sekcie prípojníc – Obr. 43 [24]. Sekundárne strany prístrojových transformátorov sú zaťažené nízkou impedanciou prúdového vstupu ochrany. Rozdielny prevod prístrojových transformátorov je vzájomne prispôsobený meradlom prúdových vstupov v ochrane. Kompenzácia citlivosti diferenciálnych meracích členov pomocou I_b je potrebná z dôvodu sčítania veľkého počtu prúdov. Veľkosť stabilizačného prúdu sa mení podľa počtu vývodov v prevádzke.

Z tohto dôvodu je hodnota stabilizačného faktora k_{st} parametrom, ktorý je možné meniť v nastavení ochrany. Citlivosť diferenciálneho člena (hodnota I_d) musí byť nastavená primerane k celkovému zaťaženiu prípojníc. Nízkoimpedančná diferenciálna ochrana prípojníc sa zvyčajne nastavuje na hodnotu stabilizácie k_{st} = 0,8 a hodnotu rozbehového prúdu $I_{dr} > I_n$, kde I_n je nominálny prúd odbočky [24].

Medzi nevýhody tohto konceptu patrí problematická rozšíriteľnosť o ďalší meraný vstup – vývod v rozvodni.



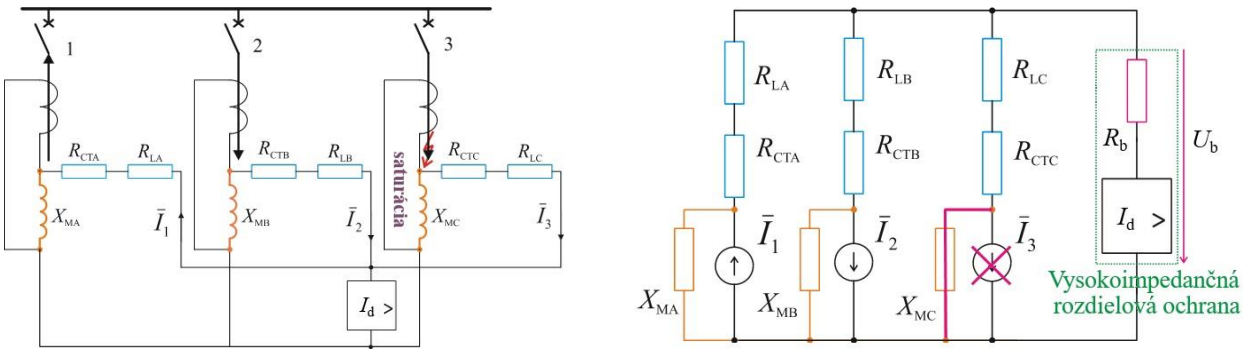
Obr. 43 Pripojenie nízkoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc

4.5.1.2 Vysokoimpedančná diferenciálna ochrana prípojníc

U vysokoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc sú sekundárne svorky prístrojových transformátorov prúdu pripojené paralelne k jednému prúdovému vstupu ochrany – predpokladá sa ich jednotný prevod. Na Obr. 44 je uvedená schéma paralelného pripojenia troch prúdových transformátorov prúdu k priečnej diferenciálnej ochrane. Prístrojové transformátory prúdy sú reprezentované náhradnou schémou, ktorá obsahuje priečnu magnetizačnú reaktanciu X_m, odpor sekundárneho vinutia R_{CT} a odpor prepojovacieho vedenia R_L. V prípade vonkajšieho skratu dôjde k presýteniu prístrojového transformátoru C a cez rozdielový článok bude pretekať prúd $I_d = \left|\bar{I}_1 + \bar{I}_2\right|$ [24]. Veľkosť tohto prúdu je obmedzená odporom R_b pripojeným sériovo k rozdielovému členu ochrany. Platí

$$I_d = \frac{U_b}{R_b} = \frac{\left|\bar{I}_1 + \bar{I}_2\right|(R_{CTC} + R_{LC})}{R_b} \le k_{st}.I_b\,, \tag{30}$$

kde U_b je napätie na rozdielovom článku, R_b je pridaná obmedzovacia rezistencia, I_b je stabilizačný prúd, k_{st} je stabilizačný faktor určujúci sklon vypínacej charakteristiky.



Obr. 44 Princíp vysokoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc

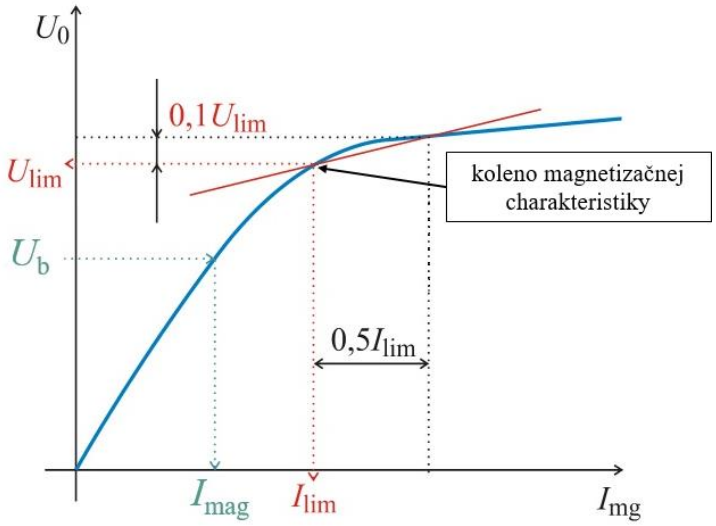
Nastavenie vysokoimpedančnej ochrany je závislé na veľkosti rezistencie R_b, ktorá určuje napätie na rozdielovom článku U_b.

$$U_b = \frac{I_{f,max-ext}}{p_{PTP}}(R_{CT} + R_L), \tag{31}$$

určeného podľa maximálneho prúdu vonkajšej poruchy $I_{f,max-ext}$. Napätie nesmie prekročiť limitné napätie (napätie kolena magnetizačnej charakteristiky) U_{lim} prístrojových transformátorov prúdu a zároveň udáva veľkosť magnetizačného prúdu I_{mag} prístrojových transformátorov prúdu. Na základe uvedených hodnôt je stanovená minimálna hodnota rozbehového prúdu I_{dr} ochrany

$$I_{dr} = \frac{I_{f,min-int}}{p_{PTP}} + n.I_{mag}, \tag{32}$$

kde $I_{f,min-int}$ je minimálny prúd vnútornej poruchy, n je počet prístrojových transformátorov – vývodov chránenej sekcie prípojníc. Princíp vysokoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc je uvedený na Obr. 45.

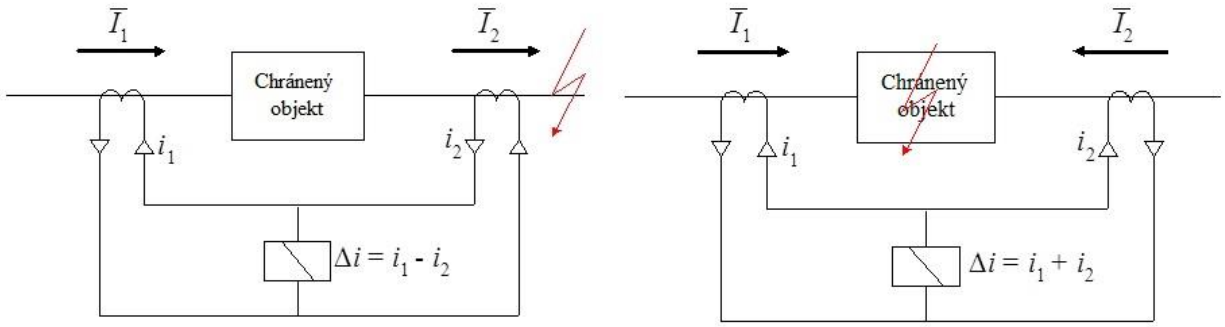


Obr. 45 Princíp vysokoimpedančnej diferenciálnej ochrany prípojníc

Výhodou vysokoimpedančných diferenciálnych ochrán prípojníc je jednoduchá možnosť rozšíriteľnosti o ďalšie chránené vývody. Vplyvom zvýšeného napätia na sekundárnej strane prístrojových transformátorov prúdu ich nie je možné použiť ako zdroj prúdu pre inú ochrannú funkciu, čo je značnou nevýhodou vysokoimpedančných diferenciálnych ochrán prípojníc.

4.5.2 Pozdĺžna diferenciálna ochrana

Pozdĺžna diferenciálna ochrana porovnáva prúdy na vstupoch a výstupoch chráneného zariadenia, ktorým môže byť generátor, transformátor alebo vedenie. Oblasť chránenia je vymedzená prístrojovými transformátormi prúdu, ktorých sekundárne prúdy vyhodnocuje nadprúdový člen zapojený v priečnej vetve vedenia spájajúceho obe strany chráneného zariadenia. Diferenciálna ochrana pôsobí len v prípade vnútornej poruchy, kedy je hodnota diferenciálneho prúdu I_d väčšia ako citlivosť nadprúdového článku. Princíp pozdĺžnej diferenciálnej ochrany je uvedený na Obr. 46 [24] [26].



Obr. 46 Bloková schéma pozdĺžnej diferenciálnej ochrany

Diferenciálny prúd je možné vyjadriť vzťahom

$$I_d = \left| \sum_{j=1}^{k} \frac{\bar{I}_j}{p_j} \right|, \tag{33}$$

kde n je počet prístrojových transformátorov prúdu (porovnávaných vstupov v ochrane), p_j je prevod j-tého prístrojového transformátoru prúdu PTP, $\bar{I}_j$ je primárny prúd – prúd chráneného zariadenia.

Pre počet prístrojových transformátorov prúdu $n = 2$ pri prevodoch $p_1 = p_2 = 1$ bude

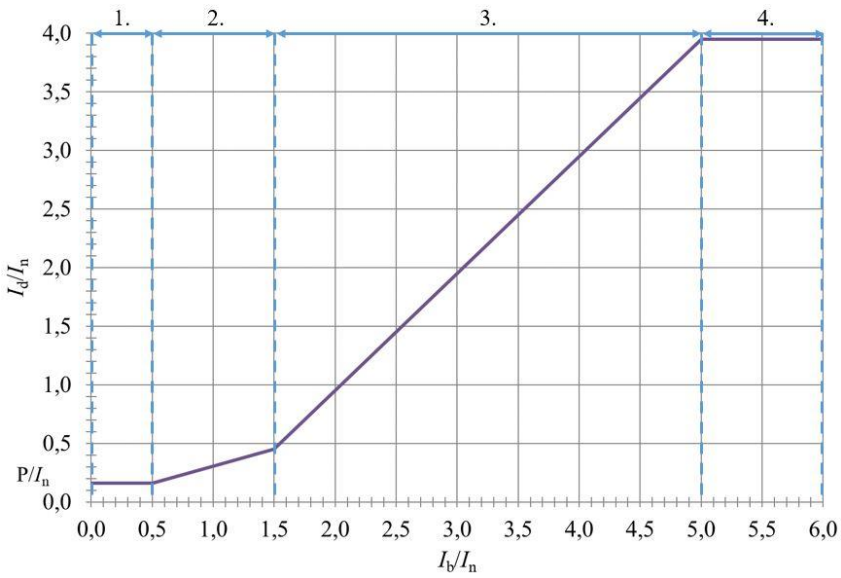
- diferenciálny prúd pre vonkajšiu poruchu, kedy $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2$

$$I_\mathrm{d} = \left| \sum_{j=1}^{n} \frac{\bar{I}_j}{p_j} \right| = \left| \bar{I}_1 - \bar{I}_2 \right| = 0, \tag{34}$$

- diferenciálny prúd pre vnútornú poruchu, kedy $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$

$$I_\mathrm{d} = \left| \sum_{j=1}^{n} \frac{\bar{I}_j}{p_j} \right| = \left| \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \right| = 2 \cdot \left| \bar{I}_1 \right|, \tag{35}$$

Charakteristika diferenciálnej ochrany je uvedená na Obr. 47 [23].



Obr. 47 Vypínacia charakteristika pozdĺžnej diferenciálnej ochrany

Pri chránení výkonového transformátora je diferenciálny prúd spôsobený nepresnosťou prístrojových transformátorov prúdu, zmenou polohy regulačnej odbočky, prúdom transformátoru naprázdno a zapínacím prúdom transformátoru. V prvej oblasti charakteristiky je diferenciálny prúd potrebný k aktivácii ochrany konštantný. V nastavení je zohľadnený prúd vykonového transformátora naprázdno. Druhá oblasť charakteristiky zohľadňuje triedu presnosti a nadprúdový činiteľ prístrojových transformátorov prúdu, reguláciu prepínača odbočiek výkonového transformátora a chybu presnosti A/D prevodníka v ochrane. Tretia oblasť charakteristiky zodpovedá vysokému zaťaženiu chráneného transformátora. Štvrtá oblasť predstavuje prekročenie povoleného stabilizačného prúdu chráneného transformátora.

Pri označení fázorov sekundárnych prúdov základnej frekvencie $\overline{I}_1$ a $\overline{I}_2$ vstupnej a výstupnej strany chráneného zariadenia je veľkosť diferenciálneho prúdu I_d definovaná vzťahmi (34) (35).

U stabilizovanej diferenciálnej ochrany je diferenciálny prúd potrebný k aktivácii ochrannej funkcie tým vyšší čím vyšší je zaťažovací prúd chráneného objektu. Veľkosť zaťažovacieho prúdu je vyjadrená ako stabilizačný prúd I_b, ktorého veľkosť je definovaná vzťahom

$$I_b = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left|\overline{I}_j\right|}{n} = \frac{\left|\overline{I}_1\right| + \left|\overline{I}_2\right|}{2}, \tag{36}$$

Pri použití pozdĺžnej diferenciálnej ochrany je nutné rešpektovať nižšie uvedené obmedzenie, aby pôsobenie ochrany bolo selektívne a spoľahlivé [24]:

1. Z prevodu a zapojenia chráneného transformátora je dané, že prístrojové transformátory prúdu vymedzujúce chránený objekt nie sú identické => nemajú zladené prevody a fázové posunutia. Uvedené je možné riešiť tak, že skupina prístrojových transformátorov prúdu na jednej strane ma rovnaké zapojenie ako protiľahlá strana (vinutie) chráneného transformátora. V digitálnych ochranách je tento problém vyriešený priamo v ochrane vhodným nastavením vstupného prevodu.
2. Náraz magnetizačného prúdu pri zapínaní transformátora môže viesť k chybnému pôsobeniu ochrany nakoľko sa prejavuje ako vnútorná porucha transformátora. Hodnoty nárazu dosahujú až desaťnásobok menovitého prúdu a jeho priebeh je tvorený z veľkej časti 2. harmonickou – z tohto dôvodu sa funkcia ochrany blokuje pri výskyte 2. harmonickej.

Popis parametrov diferenciálnej ochrany [26]:

- ***P*/*I*$_n$** – základné nastavenie stabilizovaného stupňa diferenciálnej ochrany určuje sa ako I_{d1}/I_n. V prvej oblasti charakteristicky ($0{,}0 < I_b/I_n < 0{,}5$) je diferenciálny prúd nutný k aktivácii ochrany konštantný. Základné nastavenie zohľadňuje prúd výkonového transformátora naprázdno. Týmto parametrom je možné ovplyvniť celkovú úroveň (polohu) vypínacej charakteristiky.
- ***S*** – popudový pomer, určený vzťahom I_{d2}/I_{b2}. Vyjadruje priebeh charakteristiky v oblasti 2 ($0{,}5 < I_b/I_n < I_{2tp}/I_n$). V druhej oblasti charakteristiky smernica *S* vyjadruje pomer medzi zmenou zaťažovacieho prúdu a zmenou diferenciálneho prúdu nutného k aktivácii vypnutia.
- ***I*$_{2tp}$/*I*$_n$** – bod druhého zlomu charakteristiky
- **Bod prvého zlomu –** je vždy 0,5
- ***I*$_d$/*I*$_n$>>** – mžikový prúdový diferenciálny stupeň. V prípade ak amplitúda základnej prvej harmonickej prekročí nastavenú hodnotu ***I*$_d$/*I*$_n$>>** je aktivovaný vypínací signál.

- I_{2df}/I_{d1f} – pomer hodnôt zložky druhej harmonickej a základnej frekvenčnej zložky je kritériom pre blokovanie nábehu ochrany pri zapnutí transformátora. Vypočíta sa ako priemer pomerov druhej harmonickej a základnej frekvenčnej zložky diferenciálnych prúdov všetkých troch fáz.
- I_{5df}/I_{d1f} – pomer hodnôt zložky piatej harmonickej a základnej frekvenčnej zložky je kritériom pre blokovanie nábehu ochrany pri prevádzkových situáciách, kedy dochádza k prebudeniu (magnetickému presýteniu) chráneného objektu.
- I_{5df}/I_{d1f} >> – pri prekročení nastavenej hodnoty I_{5df}/I_{d1f} >> dochádza k negovaniu blokovania v okamihu, kedy pomer medzi piatou harmonickou a základnou frekvenčnou zložkou diferenciálneho prúdu prekročí nebezpečnú úroveň v prevádzkových stavoch s vysokým prepätím.
- **CT connection type** – zapojenie prístrojových transformátorov prúdu. Určenie smeru prúdu pripojených prístrojových transformátorov prúdu.
- **Vinutie 1** – zapojenie primárneho vinutia transformátora (Y, YN, D, Z, ZN)
- **Vinutie 2** – zapojenie sekundárneho vinutia transformátora (y, yn, d, z, zn)
- **Hodinový uhol** – nastavenie fázového posunu medzi primárnym a sekundárnym vinutím transformátora.

Nastavenie kompenzácie fázovej diferencie a nulovej zložky diferenciálneho prúdu

V prípade chránenia transformátora dochádza k fázovej diferencii medzi prúdmi na primárnej a na sekundárnej strane transformátora, ktorá je spôsobená zapojením vinutia a hodinovým uhlom chráneného transformátora. Prispôsobenie k tejto fázovej diferencii je vykonané fázovým posunom a číslicovo vytvoreným zapojením trojuholníka v ochrane. Nastavenie kompenzácie fázovej diferencie je možné na oboch stranách – primárnej a sekundárnej – transformátora alebo iba na primárnej alebo sekundárnej strane v intervaloch po 30° [22].

V ochranách je štandardne nulová zložka fázových prúdov eliminovaná skôr ako je vypočítaný diferenciálny a stabilizačný prúd. V prípade ak na strane uzemneného vinutia nie je prispôsobenie k vektorovej skupine zvolené, je možné nulovú zložku fázových prúdov vyhodnotiť samostatne výpočtom a eliminovať ju z každého fázového prúdu. Kompenzácia nulovej zložky je realizovaná pomocou rovníc (37) (38) (39) [22]

$$\bar{I}_{\mathrm{Am}} = \bar{I}_{\mathrm{A}} - \frac{1}{3}\cdot\left(\bar{I}_{\mathrm{A}} + \bar{I}_{\mathrm{B}} + \bar{I}_{\mathrm{C}}\right), \tag{37}$$

$$\bar{I}_{\mathrm{Bm}} = \bar{I}_{\mathrm{B}} - \frac{1}{3}\cdot\left(\bar{I}_{\mathrm{A}} + \bar{I}_{\mathrm{B}} + \bar{I}_{\mathrm{C}}\right), \tag{38}$$

$$\bar{I}_{\mathrm{Cm}} = \bar{I}_{\mathrm{C}} - \frac{1}{3}\cdot\left(\bar{I}_{\mathrm{A}} + \bar{I}_{\mathrm{B}} + \bar{I}_{\mathrm{C}}\right), \tag{39}$$

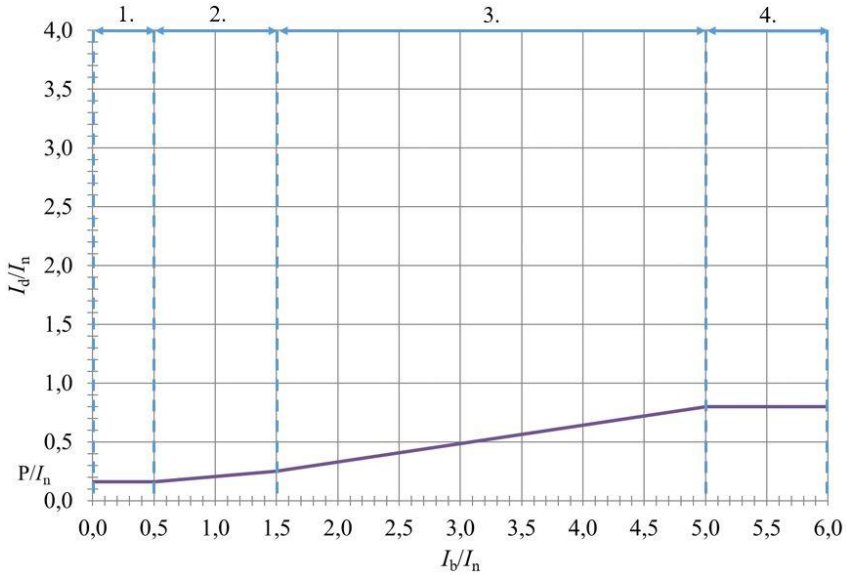
kde $\bar{I}_{\mathrm{X}}$ – fázor prúdu vo fáze X (X = A, B, C), $\bar{I}_{\mathrm{Xm}}$ – fázor prúdu s kompenzovanou nulovou zložkou vo fáze X (X = A, B, C)

4.5.3 Vplyv prúdových senzorov na charakteristiku diferenciálnej ochrany

Prúdové senzory využívajú princíp Rogowskeho cievky – sú konštruované bez feromagnetického jadra. Funkcia prúdového senzora nie je ovplyvnená nelinearitou výstupného signálu v meranom rozsahu a hysteréziou [27]. Z tohto dôvodu prúdové senzory založené na princípe Rogowskeho cievky dosahujú lineárnu charakteristiku v celom meranom rozsahu.

Použitie prúdových senzorov má vplyv na tvar charakteristiky diferenciálnej ochrany nakoľko nie je nutné uvažovať saturáciu jadra transformátora. Z tohto dôvodu strmosť charakteristiky v druhej a tretej oblasti, ktorá vyjadruje stabilizáciu ochrannej funkcie pre vysoké prúdy nie je potrebné uvažovať. Lineárna charakteristika prúdových senzorov v kombinácii s triedou presnosti 0,5 umožňuje redukciu chýb pri meraní – vedie to k vyššej presnosti detekcie porúch [27].

Charakteristika diferenciálnej ochrany v prípade aplikácie prúdových senzorov je uvedená na Obr. 48.



Obr. 48 Vypínacia charakteristika difernciálnej ochrany s uvažovaním výhod prúdových senzorov

S použitím prúdových senzorov súvisí použitie MU a využitie IEC 61850-9-2 SV, čo rieši problémy s rozšíriteľnosťou u nízkoimpedančnej priečnej diferenciálnej ochrany a taktiež problémy so stabilizáciu u vyskoimpedančnej priečnej diferenciálnej ochrany. Merané hodnoty prúdu sú distribuované vo forme SV na Process bus odkiaľ ich diferenciálna ochrana prijíma a spracováva. V tomto prípade bude ochrana limitovaná len kapacitou Ethernetovej siete.

4.5.4 Popis algoritmu diferenciálnej ochrany

Algoritmus diferenciálnej ochrany vyhodnocuje stabilizačný a diferenciálny prúd podľa nastavenej charakteristiky – Obr. 47.

Vstupy algoritmu

- diferenciálny prúd I_{dA}, I_{dB}, I_{dC} – diferenciálny prúd vypočítaný podľa vzťahu (33) z fázorov zložky prvej harmonickej prúdov na vstupe a na výstupe chráneného zariadenia, ktoré boli vypočítané pomocou FFT z okamžitých hodnôt fázových prúdov i_A, i_B, i_C – SV,
- diferenciálny prúd I_{dA2}, I_{dB2}, I_{dC2} – diferenciálny prúd vypočítaný podľa vzťahu (33) z fázorov zložky druhej harmonickej prúdov na vstupe a na výstupe chráneného zariadenia, ktoré boli vypočítané pomocou FFT z okamžitých hodnôt fázových prúdov i_A, i_B, i_C – SV,
- diferenciálny prúd I_{dA5}, I_{dB5}, I_{dC5} – diferenciálny prúd vypočítaný podľa vzťahu (33) z fázorov zložky piatej harmonickej prúdov na vstupe a na výstupe chráneného zariadenia, ktoré boli vypočítané pomocou FFT z okamžitých hodnôt fázových prúdov i_A, i_B, i_C – SV,

- stabilizačný prúd I_{bA}, I_{bB}, I_{bC} – vypočítaný podľa vzťahu (36) z fázorov zložky prvej harmonickej prúdov na vstupe a na výstupe chráneného zariadenia, ktoré boli vypočítané pomocou FFT z okamžitých hodnôt fázových prúdov i_A, i_B, i_C – SV.

Výstup algoritmu

- vypínací signál.

Parametre algoritmu

- $\boldsymbol{P/I_n}$ – základné nastavenie stabilizovaného stupňa diferenciálnej ochrany,
- ***S*** – popudový pomer, určený vzťahom I_{dB}/I_{bB},
- $\boldsymbol{I_{2tp}/I_n}$ – bod druhého zlomu charakteristiky je možné nastaviť na požadovanú hodnotu v rozsahu 1 až 3,
- $\boldsymbol{I_n}$ – menovitý prúd v jednotlivých odbočkách,
- $\boldsymbol{I_d/I_n}$**>> –** mžikový prúdový diferenciálny stupeň,
- $\boldsymbol{I_{2df}/I_{d1f}}$ **–** blokovanie 2. harmonickou zložkou diferenciálneho prúdu,
- $\boldsymbol{I_{5df}/I_{d1f}}$ **–** blokovanie 5. harmonickou zložkou diferenciálneho prúdu,
- $\boldsymbol{I_{5df}/I_{d1f}}$ **>> –** negovanie blokovania 5. harmonickou zložkou diferenciálneho prúdu,
- **CT connection type** – zapojenie prístrojových transformátorov prúdu,
- **vinutie 1** – zapojenie primárneho vinutia transformátora (Y, YN, D, Z, ZN),
- **vinutie 2** – zapojenie sekundárneho vinutia transformátora (y, yn, d, z, zn),
- **hodinový uhol** – nastavenie fázového posunu medzi primárnym a sekundárnym vinutím transformátora.

Z okamžitý meraných hodnôt prúdov sú určené harmonické zložky signálu pomocou FFT. V prípade ak je potrebné dochádza ku kompenzácii fázovej diferencie a nulovej zložky. Následne zo zložky prvej harmonickej meraných prúdov je určený diferenciálny a stabilizačný prúd podľa rovníc (33), (36). V prípade ak diferenciálny prúd I_{dX} (kde X predstavuje fázu, v ktorej bol vyhodnotený diferenciálny prúd) prekročí hodnotu definovanú vypínacou charakteristikou. Algoritmus diferenciálnej ochrany vyhodnotí poruchu a posiela vypínací signál. V prípade ak je splnená podmienka pre blokovanie funkcie diferenciálnej ochrany – 2. harmonickou alebo 5. harmonickou – algoritmus neposiela vypínací signál.

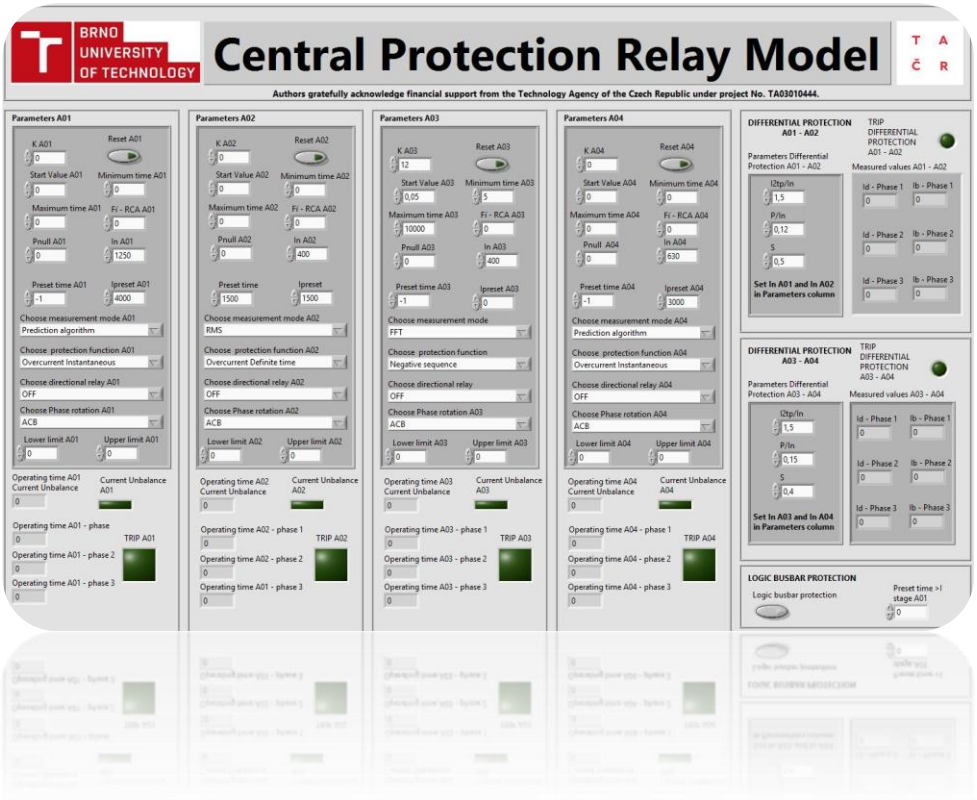
5 MODEL CENTRÁLNEJ OCHRANY V LABVIEW

Pre vývoj modelu centrálnej ochrany bolo zvolené vývojové prostredie LabView od firmy National Instruments. Import hodnôt z Ethernetu do LabView zabezpečuje špeciálna knižnica SVRLIB, ktorá je detailne popísaná v nasledujúcich kapitolách.

Základnou úlohou modelu centrálnej ochrany je umožnenie chránenia malej rozvodne pomocou jednej aplikácie a tým nahradiť štyri v súčasnosti potrebné ochrany. V reálnom čase z importovaných hodnôt je model schopný určiť efektívnu hodnotu - RMS, Fourierovou transformáciou určiť harmonické zložky signálu a taktiež pomocou predikčného algoritmu určiť špičkovú hodnotu signálu z predchádzajúcich dvoch hodnôt. Program združuje základné ochranné funkcie potrebné k chráneniu rozvodných zariadení:

- nadprúdová ochrana,
  - mžiková nadprúdová ochrana,
  - časovo nezávislá nadprúdová ochrana,
  - časovo závislá nadprúdová ochrana,
- smerové relé pre nadprúdovú ochranu,
- logická ochrana prípojníc,
- ochrana pri nesymetrii,
- diferenciálna ochrana.

V prípade vyhodnotenia poruchy model posiela GOOSE správu prostredníctvom Ethernetu. Pre správnu funkciu modelu centrálnej ochrany sú potrebné softwarové nástroje, vyvinuté na Vysokom Učení Technickom – Sampled Value Analyser, Sampled Value Generator a knižnica SVRLIB. Grafické užívateľské prostredie programu Central Protection Relay Model je uvedené na Obr. 49.



Obr. 49 Grafické užívateľské rozhranie Central Protection Relay Model

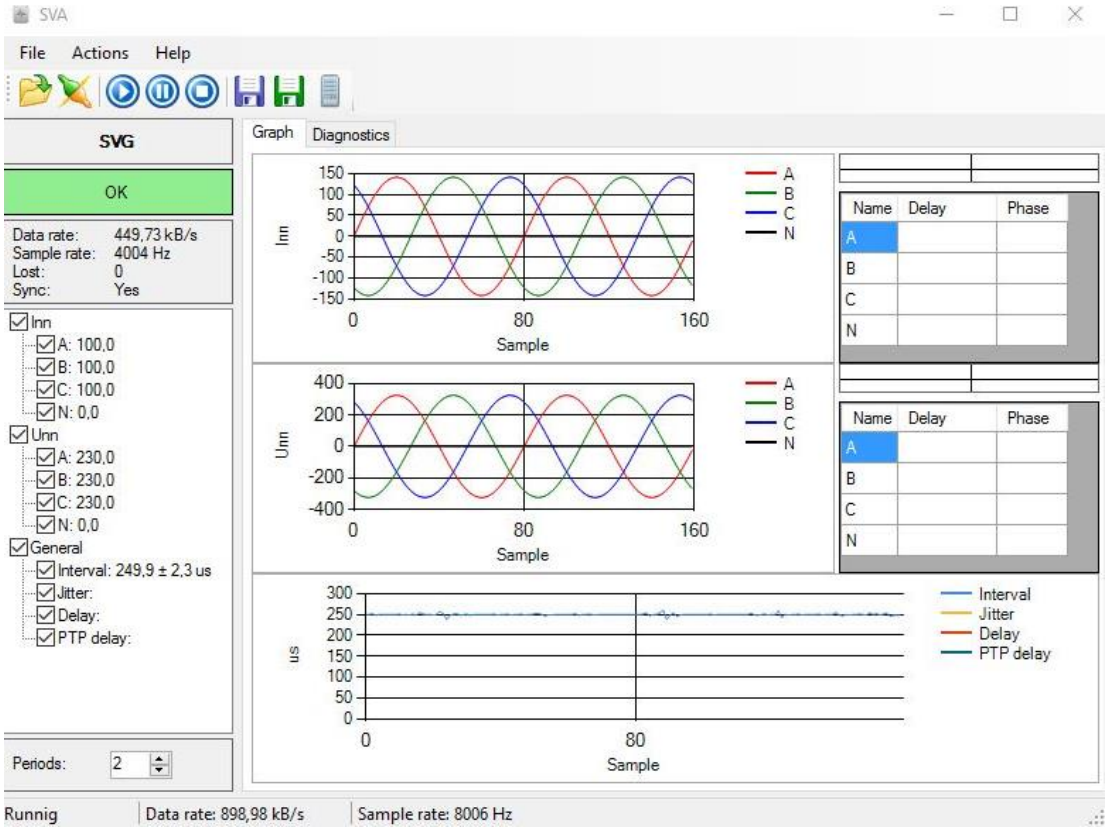
5.1 Softwarové nástroje pre funkciu modelu centrálnej ochrany

Pre správnu funkciu modelu centrálnej ochrany boli vyvinuté nástroje pre prácu so IEC 61850-9-2 SV, špeciálne pre verifikáciu, vizualizáciu, transfer a v neposlednom rade pre samotné generovanie hodnôt vo formáte SV.

5.1.1 SVA - Sampled Value Analyser

Software Sampled Value Analyser je určený pre verifikáciu a vizualizáciu SV prenášaných prostredníctvom Ethernetu podľa protokolu definovaného v štandarde IEC 61850-9-2.

Tento software overuje, či dáta prenášané po Ethernete splňujú požiadavky štandardu. Ak sú tieto požiadavky splnené, dáta sú dekódované a zobrazené v grafe tak ako na Obr. 50 [28].



Obr. 50 Grafické užívateľské rozhranie Sampled Value Analyser

Program umožňuje prijímanie dát z viacerých zdrojov v reálnom čase, takže je možné prijímať, zobrazovať a exportovať dáta z viacerých zdrojov v jednom čase.

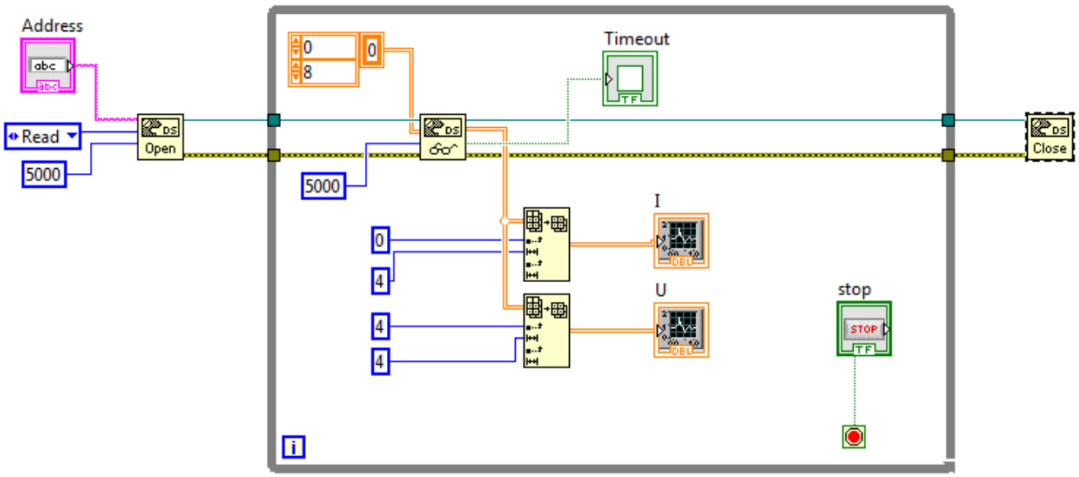
Sample Value Analyser umožňuje viacero možností exportu dát. Dáta je možné ukladať v podobe záznamu do súboru pcap a následne ich prehrávať. Druhou možnosťou exportu dát je ukladanie dekódovaných dát do textového súboru v CSV formáte, ktorý je možné ďalej spracovávať v programoch ako napr. Microsoft Excel. Ukladanie do formátu CSV sa aktivuje v programe tlačidlom Record CSV. Štruktúra ukladaných dát je uvedená v Tab. 5 [28] [29].

Položka received obsahuje informáciu o čase prijatia Ethernetového rámca. V ďalších stĺpcoch sú uvedené mená SV, počítadlo SV, refrTM obsahuje informáciu o aktualizácii časového zásobníka v MU. Po hodnotách smpSynch a smpRate nasledujú stĺpce pre jednotlivé merané veličiny. Jednotlivé premenné sú definované podľa štandardu IEC 61850-9-2 [30].

Tab. 5 Príklad exportovaného súboru zo Sampled Value Analyser vo formáte CSV

received	svID	SmpCnt	refrTm	SmpSynch	SmpRate	Inn_A
2015-12-11T13:42:07.3396320	SVG	1207		1		184,71
2015-12-11T13:42:07.3398180	SVG	1208		1		207,82
2015-12-11T13:42:07.3400370	SVG	1209		1		229,59
2015-12-11T13:42:07.3402170	SVG	1210		1		250,10
2015-12-11T13:42:07.3405790	SVG	1211		1		268,82

Export hodnôt do LabView je realizovaný prostredníctvom DataSocket Servra. Merané hodnoty sú ukladané do dvojrozmerného poľa. Jeden rozmer reprezentuje poradie meraných vzoriek a druhý rozmer predstavuje konkrétnu hodnotu meranej vzorky [28] [29]. V LabView následne musia byť použité bloky pre DataSocket server, tak aby umožnili príjem dát. Zdrojový kód jednoduchej aplikácie na prenos dát a ich zobrazenie v LabView je uvedený na Obr. 51 [28].



Obr. 51 Zdrojový kód aplikácie pre prenos dát a ich zobrazenie v LabView

DataSocket Server posiela každú sekundu hodnoty z buffera Sampled Value Analyser do LabView, kde sú ďalej spracovávané meracími funkciami a ochrannými algoritmami. Pre prípad ochranných funkcií nie je toto riešenie dostatočné, nakoľko na začiatku spracovania sú dáta o 1s oneskorené oproti reálnemu času. Z týchto dôvodov bola vyvinutá knižnica SVRLIB.

5.1.2 Knižnica SVRLIB

Knižnica SVRLIB je určená primárne k importu IEC 61850-9-2 SV z Ethernetu do LabView v reálnom čase. V LabView musia byť použité bloky v správnom poradí tak, aby bol umožnený import hodnôt.

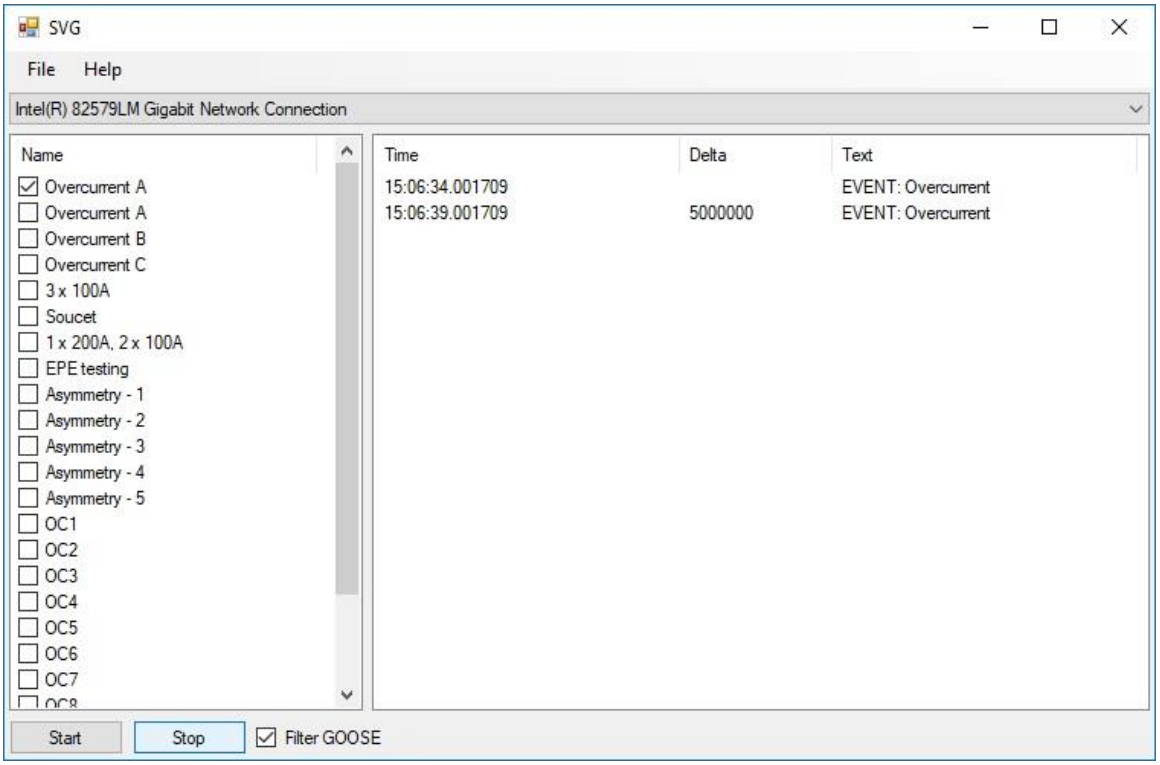
Všetky informácie ako nominálna frekvencia, svID – hodnota určujúca poradie SV, smpRate – vzorkovacia frekvencia sú načítane z Ethernetu. Hodnoty sú uložene v LabView do matice a je možné ich ďalej spracovávať pre ochranné funkcie alebo vyhodnotenie merania.

Knižnica SVRLIB umožňuje posielanie GOOSE správ na Ethernet. Táto funkcia je využívaná, keď musí byť poslaný vybavovací signál – TRIP – k testovaciemu zdroju alebo vypínaču.

5.1.3 SVG - Sampled Value Generator

Sampled Value Generator je užitočný nástroj pre testovanie navrhnutých ochranných algoritmov v LabView. Tento nástroj umožňuje generovanie IEC 61850-9-2 SV na Ethernet. Z tohto dôvodu nie je nutné vlastniť OMICRON alebo iný testovací zdroj pre overenie funkcie navrhnutého ochranného algoritmu v LabView.

Definovanie generovaného signálu prebieha prostredníctvom xml súboru, kde sú určené parametre signálu – RMS hodnota, frekvencia, fáza a tvar generovaného signálu. Užívateľské rozhranie nástroja Sampled Value Generator je na Obr. 52.



Obr. 52 Grafické užívateľské rozhranie Sampled Value Generator

Pomocou Sampled Value Generator je možné merať čas medzi generovaním poruchového signálu a prijatím GOOSE správy od ochrany. V pravej časti okna je uvedený čas generovania poruchového signálu, akonáhle ochrana zareaguje pošle GOOSE správu. Čas prijatia GOOSE správy bude zaznamenaný v Sampled Value Generator. Z rozdielu týchto časov je možné určiť rýchlosť navrhnutého ochranného algoritmu.

Sampled Value Generator ponúka dve možnosti použitia

1. Počítač s nainštalovaným Sampled Value Generator generuje SV na Ethernet a prijíma GOOSE správy z Ethernetu.

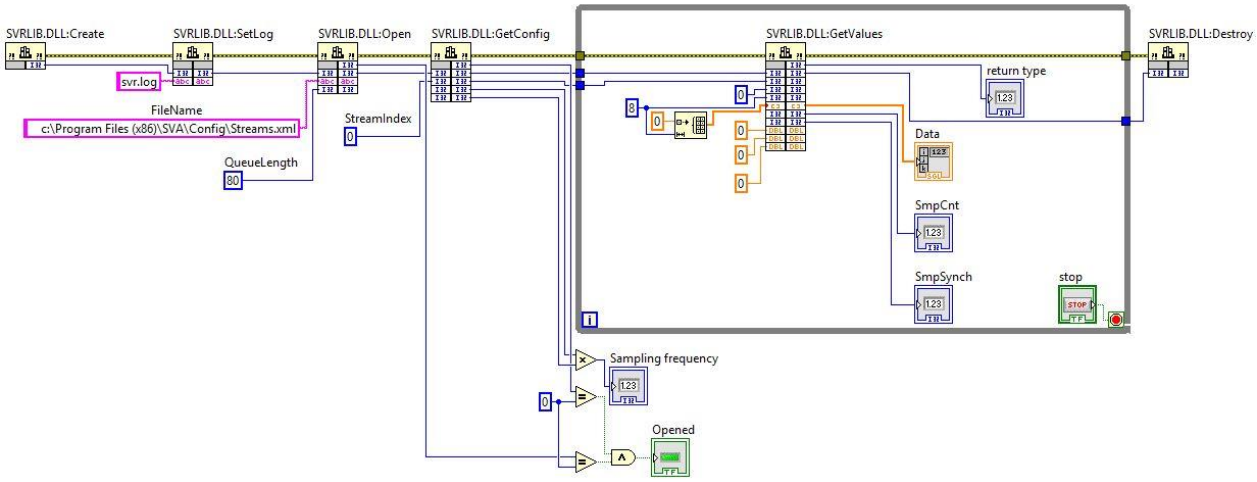
2. Počítač so Sampled Value Generator posiela SV prostredníctvom virtuálnej sieťovej karty do LabView, kde sú tieto hodnoty spracované v ochrannom algoritme. LabView posiela po vybavení ochranného algoritmu GOOSE správu prostredníctvom virtuálnej sieťovej karty do Sampled Value Generator. Testovanie ochranného algoritmu prebieha na jednom počítači, čo prináša efektivitu pri vývoji ochranných funkcií.

5.2 Popis modelu centrálnej ochrany

V tejto kapitole sú popísané funkcie modelu centrálnej ochrany a užívateľské rozhranie. Najskôr je uvedené základné použitie modelu a import IEC 61850-9-2 SV do LabView prostredníctvom knižnice SVRLIB. Nasledujú kapitoly s popisom jednotlivých ochranných funkcií – ich nastavenie a použitie.

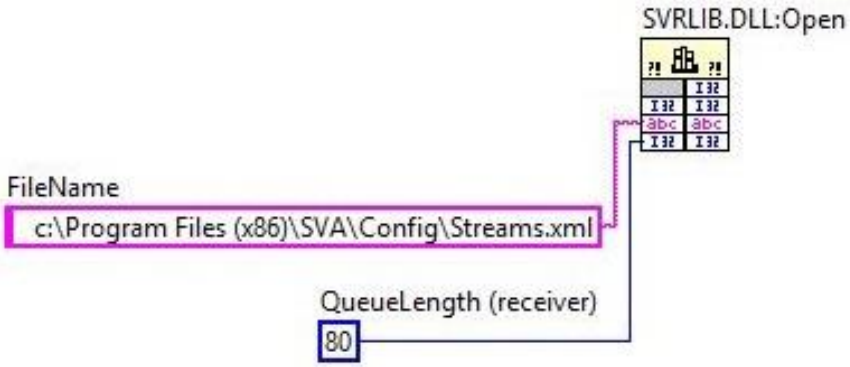
5.2.1 Import hodnôt pomocou knižnice SVRLIB

Pre import hodnôt IEC 61850-9-2 SV z Ethernetu priamo do LabView je potrebné použiť funkcie knižnice v správnom poradí Create -> SetLog -> Open -> GetConfig -> GetValues -> SendEventData -> Destroy. Jednoduchá ukážka použitia knižnice SVRLIB je uvedená na Obr. 53



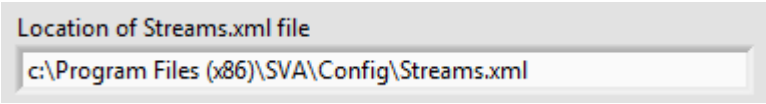
Obr. 53 Zdrojový kód použitia funkcií knižnice SVRLIB v LabView

V LabView je potrebné definovať, kde je uložený súbor Streams.xml, v ktorom sú definované informácie o importovaných streamoch – Obr. 54. Rovnaký súbor využíva aj program SVA, z tohto dôvodu nie je nutné ručne vyplňovať xml súbor, ale stačí definovať streamy v programe SVA.



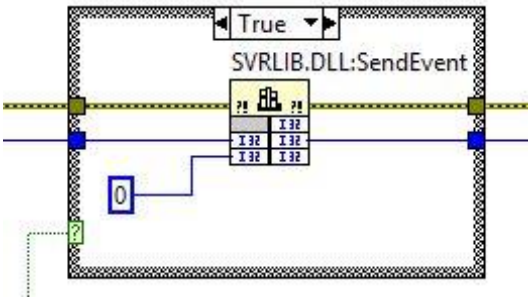
Obr. 54 Definovanie uloženia súboru Streams.xml

V modele centrálnej ochrany prebieha nastavenie cesty k súboru Streams.xml priamo v grafickom užívateľskom prostredí – Obr. 55.



Obr. 55 Definovanie uloženia súboru Streams.xml v grafickom užívateľskom prostredí

Pre odosielanie GOOSE správ z LabView je možné použiť funkcie SendEvent z knižnice SVRLIB – Obr. 56. GOOSE správa je odoslaná okamžite po vybavení ochrannej funkcie v LabView prostredníctvom Ethernetu.



Obr. 56 Funkcia knižnice SVRLIB pre posielanie GOOSE správ

Pre správnu funkciu odosielania GOOSE správ musí byť nakonfigurovaný súbor Streams.xml parametrami GOOSE správy, ktorá má byť odoslaná zo sieťovej karty v použitom PC.

Príklad konfigurácie odosielania GOOSE správy v súbore Streams.xml:

<Event Name="SVR" Device="\Device\NPF_{4A749DA7-B9BC-40CC-853F-EA2744D8313E}" Src="00-00-00-00-00-00" Dst="01-0C-CD-01-00-00" goID="SVR" Type="GOOSE" Active="1" />

5.2.2 Meracie funkcie modelu

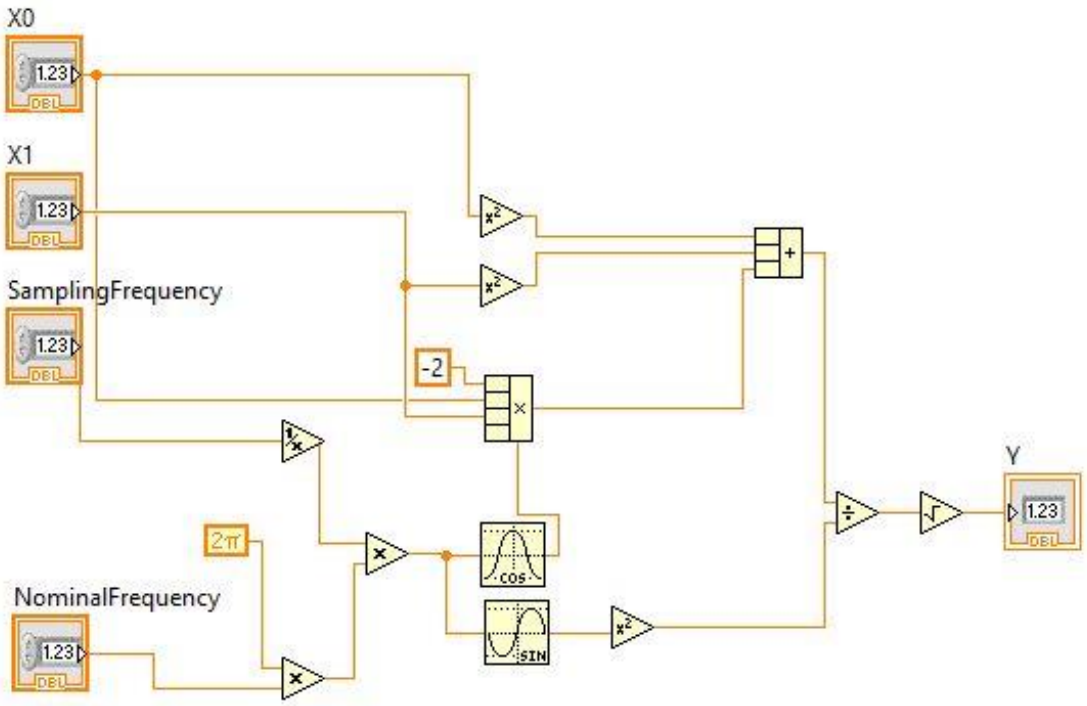
V tejto kapitole sú popísané funkcie, ktorými sú spracované importované hodnoty IEC 61850-9-2 SV v LabView. Po spracovaní hodnôt jednotlivými algoritmami sú výstupné hodnoty z meracích funkcií ďalej vyhodnocované v algoritmoch ochranných funkcií.

Model centrálnej ochrany obsahuje nasledovné meracie funkcie

- predikčný algoritmus,
- efektívna hodnota – RMS,
- rýchla Fourierova Transformácia – FFT.

5.2.2.1 Predikčný algoritmus

Pre určenie špičkovej hodnoty signálu z okamžitých hodnôt bola použitá funkcia predikčného algoritmu – popísaná v kapitole 4.1.2.2. Zdrojový kód predikčného algoritmu v LabView je uvedený na Obr. 57.



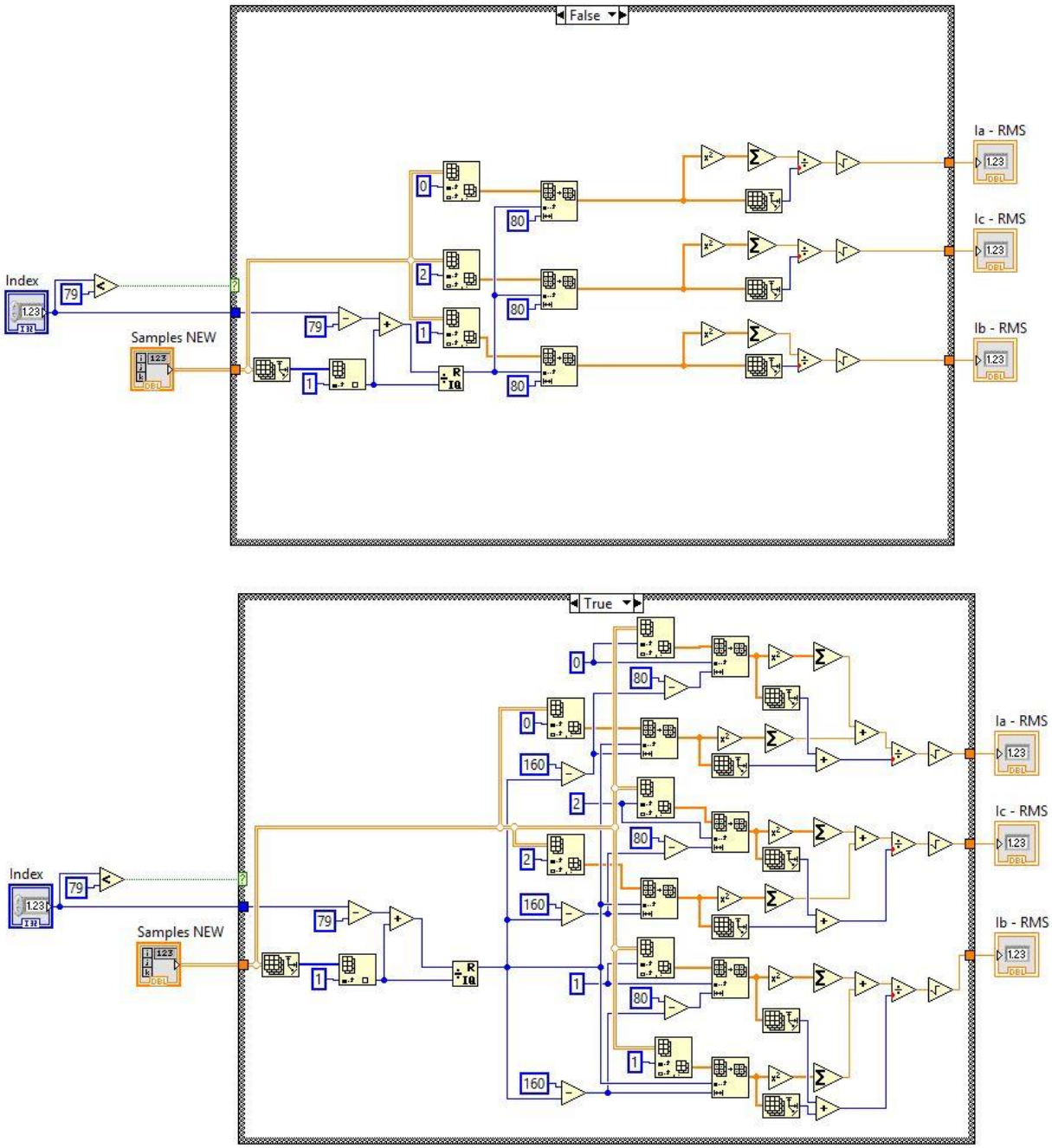
Obr. 57 Zdrojový kód predikčného algoritmu v LabView

Funkcia predikčného algoritmu sa využíva pre ochranné funkcie, u ktorých je kladený dôraz na veľmi rýchle vyhodnotenie poruchy – skratu. Medzi tieto ochrany patrí mžiková nesmerová nadprúdová ochranu, ktorá chráni zariadenie pred účinkami skratu.

5.2.2.2 Efektívna hodnota – RMS

Výpočet efektívnej hodnoty je vykonávaný z jednej periódy – 80 hodnôt. Hodnoty sú na vstupe do LabView ukladané do zásobníka o veľkosti 160 hodnôt. Výpočet efektívnej hodnoty prebieha formou plávajúceho okna, kde sa okno po každom výpočte efektívnej hodnoty posunie o hodnotu ďalej – napr. prvá efektívna hodnota je vypočítaná z hodnôt 0-79, ďalší výpočet efektívnej hodnoty prebieha z hodnôt 1-80.

Algoritmus výpočtu efektívnej hodnoty je uvedený na Obr. 58.



Obr. 58 Zdrojový kód algoritmu pre výpočet RMS v LabView

Výpočet efektívnej hodnoty je využívaný pre časovo závislú, časovo nezávislú nesmerovú nadprúdovú ochranu. Taktiež je využívaný pre logickú ochranu prípojníc.

5.2.2.3 Rýchla Fourierova Transformácia - FFT

Pre výpočet diskrétneho spektra signálu je využitá rýchla Fourierova transformácia – Fast Fourier Transform. Vypočítané diskrétne spektrum predstavuje harmonické zložky signálu – ich amplitúdu a fázu. V roku 1965 [31] bol publikovaný nový algoritmus výpočtu DFT, ktorý sa nazýva rýchla Fourierova transformácia. FFT výrazne znížila počet matematických operácií, čo umožňuje využitie výpočtu v reálnom čase aj pri vysokom počte vstupných vzoriek. Ich počet je rozdeľovaný na polovice a využíva sa periodickosť komplexnej exponenciálnej postupnosti. Počet násobení je v tomto algoritme rovný $0{,}5 \cdot N \cdot \log_2 N$ [31].

Pre každú konečnú postupnosť $f(k), k = 0,1,\ldots,N-1$, $f(k) = 0, k \notin \langle 0, N-1 \rangle$ je priama DFT daná vzťahom

$$F(m) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot e^{-jm\frac{2\pi}{N}k}, \quad m = 0,1,\ldots,N-1, \tag{40}$$

kde $F(m)$ je diskrétne spektrum (postupnosť).

Z určeného diskrétneho spektra podľa vzťahu (40) je možné definovať amplitúdové spektrum $A(m)$ a fázové spektrum $\Phi(m)$

$$A(m) = |F(m)| = \sqrt{[\mathrm{Re}\{F(m)\}]^2 + [\mathrm{Im}\{F(m)\}]^2}, \tag{41}$$

$$\Phi(m) = \arg\{F(m)\} = \arctan \frac{\mathrm{Im}\{F(m)\}}{\mathrm{Re}\{F(m)\}}. \tag{42}$$

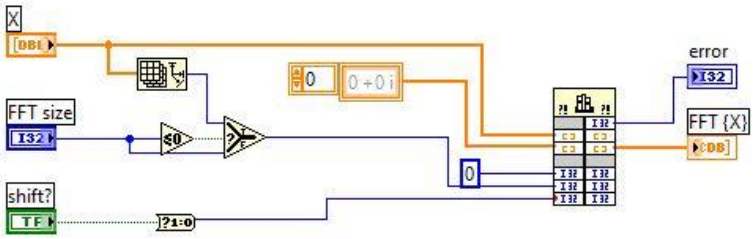
Algoritmus FFT vychádza z diskrétnej Fourierovej transformácie a v prvom kroku rozdelí vstupné vzorky $f(k)$ na vektory polovičnej dĺžky [32]. Vektor $f(2k)$ obsahuje vzorky s párnym indexom a vektor $f(2k+1)$ obsahuje vzorky s nepárnym indexom. Na základe uvedeného predpokladu možné upraviť rovnicu (40) nasledovne

$$F(m) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2k) \cdot e^{-jm\frac{2\pi}{N}2k} + \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2k+1) \cdot e^{-jm\frac{2\pi}{N}(2k+1)} \tag{43}$$

$$F(m) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2k) \cdot e^{-jm\frac{2\pi}{N}2k} + e^{-jm\frac{2\pi}{N}} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2k+1) \cdot e^{-jm\frac{2\pi}{N}2k} \tag{44}$$

Výpočet FFT je definovaný vzťahom (44). Na základe uvedených vzťahov sú vo vývojových prostrediach ako MATLAB, LabView preddefinované bloky pre výpočet FFT.

Model centrálnej ochrany pre výpočet FFT využíva štandardný blok RealFFT dostupný vo vývojovom prostredí LabView – zdrojový kód je uvedený na Obr. 59. Fourierova transformácia je vyhodnocovaná z jednej periódy – 80 hodnôt. Model centrálnej ochrany umožňuje dva varianty výpočtu – v prvom prípade sú určené harmonické signálov prúdu a napätia, v druhom prípade je naviac určená spätná zložka prúdu.

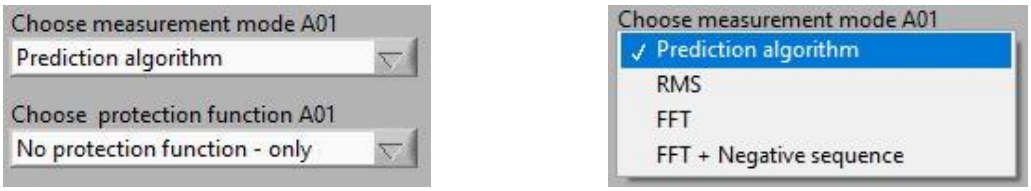


Obr. 59 Zdrojový kód pre výpočet Fourierovej transformácie

Spracovanie IEC 61850-9-2 SV pomocou Fourierovej transformácie sa využíva pre smerovú časovo závislú nadprúdovú ochranu, smerovú časovo nezávislú nadprúdovú ochranu a pre ochranu pri nesymetrii.

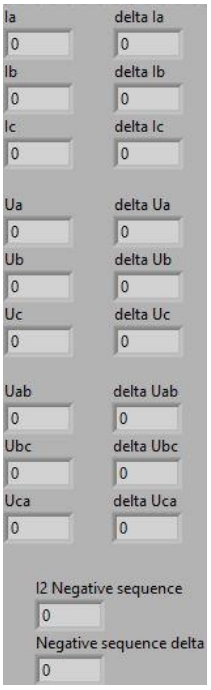
5.2.2.4 Nastavenie meracej funkcie

Pre nastavenie meracej funkcie slúži roletové menu „Choose measurement mode“ v užívateľskom prostredí modelu centrálnej ochrany. V prípade ak nie je potrebné model využívať pre ochrannú funkciu je možné v roletovom menu „Choose protection function“ zvoliť možnosť bez využitia ochranných funkcií – „No protection function – only metering. Nastavenie meracej funkcie v grafickom užívateľskom prostredí Central Protection Relay Model je uvedené na Obr. 60.



Obr. 60 Nastavenie meracej funkcie v grafickom užívateľskom prostredí

Merané hodnoty sa zobrazujú v grafickom užívateľskom prostredí, ktoré je zobrazené na Obr. 61.



Obr. 61 Zobrazenie meraných hodnôt v grafickom užívateľskom prostredí

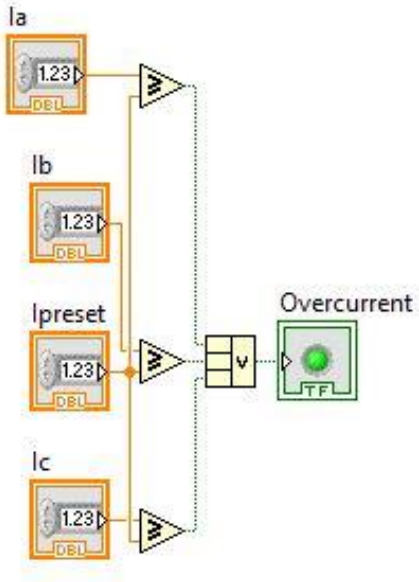
5.3 Ochranné funkcie modelu

V kapitole sú popísané naprogramované algoritmy ochranných funkcií v LabView. Následne je uvedený postup nastavenia jednotlivých ochranných funkcií.

5.3.1 Mžiková nadprúdová ochrana

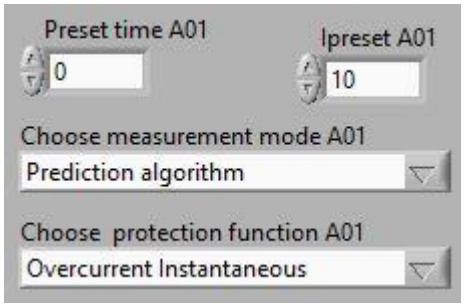
Mžiková nadprúdová ochrana využíva na svojom vstupe hodnoty z predikčného algoritmu a porovnáva ich s vopred nastavenou hodnotou prúdu. Teoretický popis algoritmu mžikovej nadprúdovej ochrany je uvedený v kapitole 4.1.1.1. V prípade ak hodnota na vstupe prekročí nastavenú hodnotu, model ochrany posiela vybavovací signál prostredníctvom Ethernetu vo forme GOOSE správy.

Zdrojový kód mžikovej nadprúdovej ochrany je na Obr. 62.



Obr. 62 Zdrojový kód mžikovej nadprúdovej ochrany

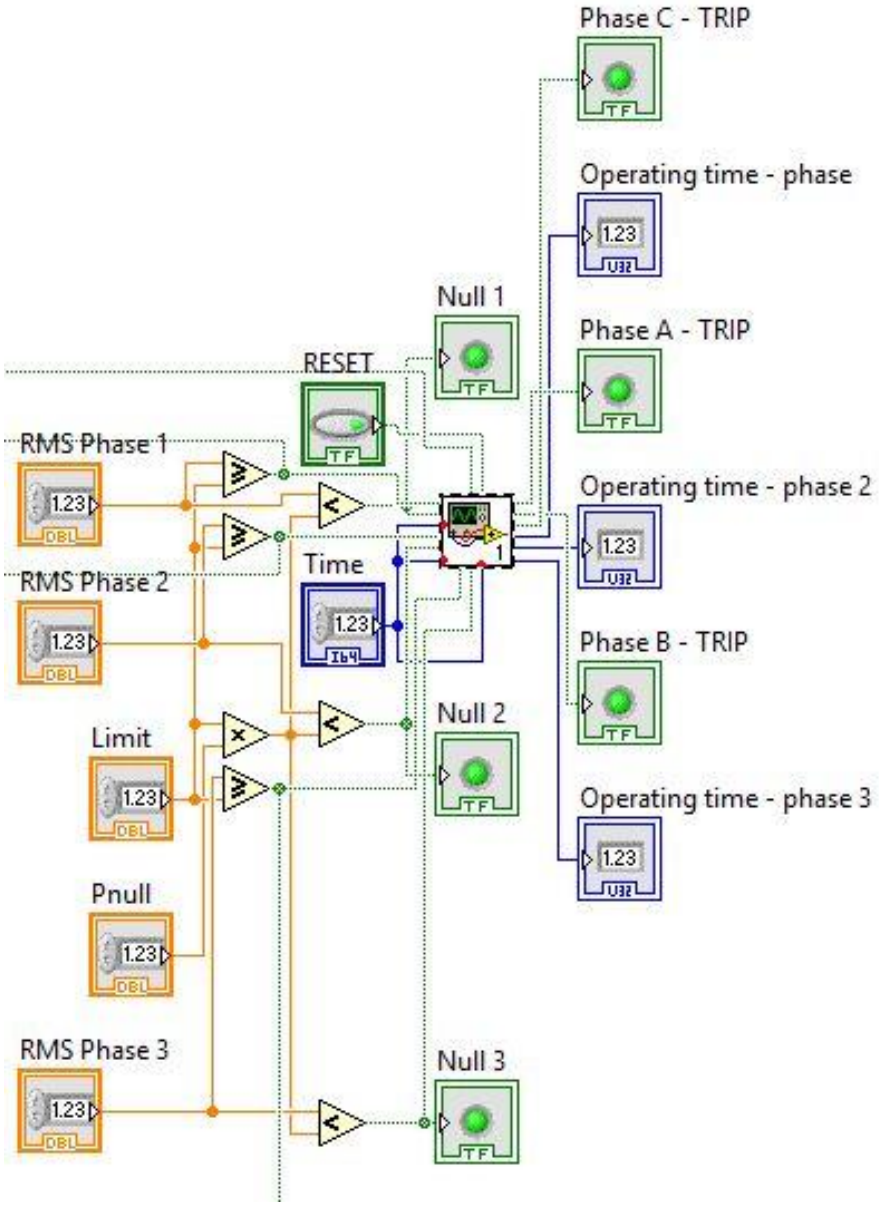
Nastavenie ochrany prebieha v grafickom užívateľskom prostredí kde je nutné vybrať v roletovom menu Prediction algorithm a ako ochrannú funkciu Overcurrent Instantaneous. Hodnota prúdu, ktorá nesmie byť prekročená sa nastavuje v položke I_{PRESET} – podľa Obr. 63.



Obr. 63 Nastavenie mžikovej nadprúdovej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí

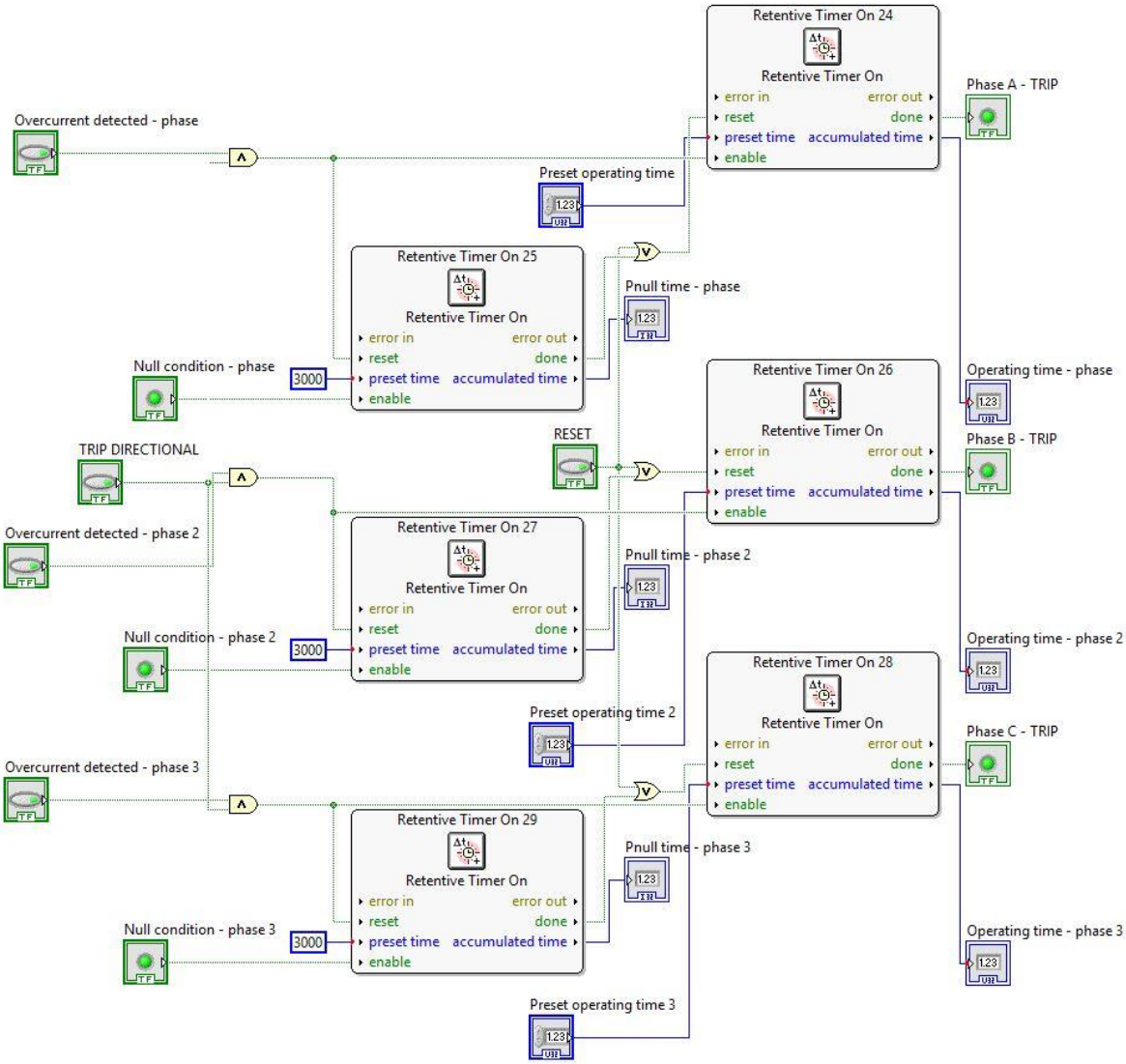
5.3.2 Časovo nezávislá nadprúdová ochrana

Algoritmus časovo nezávislej nadprúdovej ochrany bol naprogramovaný podľa teoretického popisu uvedeného v kapitole 4.1.1.2. Zdrojový kód algoritmu v LabView je uvedený na Obr. 64.



Obr. 64 Zdrojový kód časovo nezávislej nadprúdovej ochrany

Nastavený čas odpočítava časovač, ktorého zdrojový kód je uvedený na Obr. 65. Pevné časové nulovanie popísane v kapitole 4.1.1.2 je súčasťou časovača.



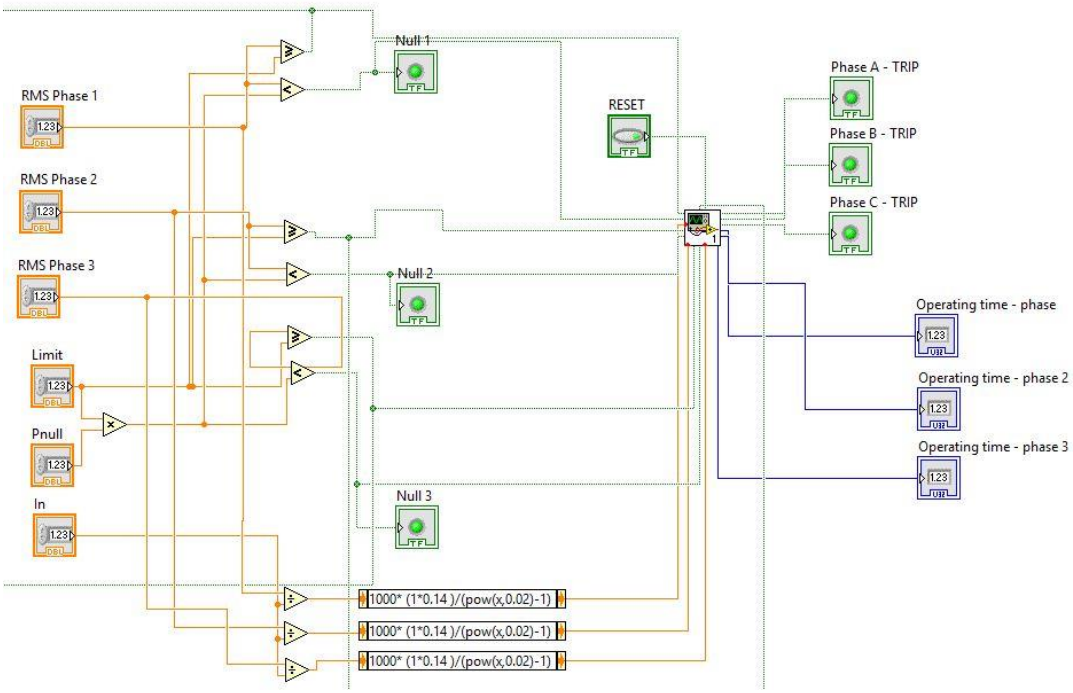
Obr. 65 Zdrojový kód časovača

Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany je vykonávané pomocou grafického užívateľského prostredia. V roletovom menu Choose measurement mode je nutné zvoliť RMS alebo FFT a ako ochrannú funkciu Overcurrent Definite Time. Hodnota prúdu, ktorá nesmie byť prekročená sa nastavuje v položke I_{PRESET} a zvolený čas v milisekundách v položke Preset time. Pomer nulovania pre pevné časove resetovanie predstavuje položka P_{NULL} – podľa Obr. 66.

Obr. 66 Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí

5.3.3 Časovo závislá nadprúdová ochrana

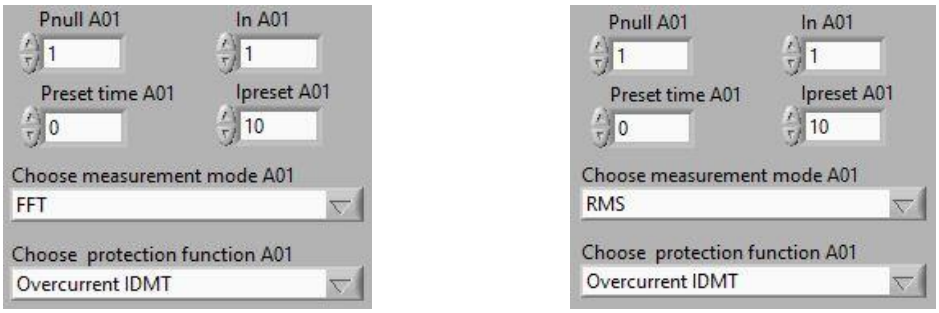
Algoritmus časovo závislej nadprúdovej ochrany bol naprogramovaný podľa teoretického popisu uvedeného v kapitole 4.1.1.3. Zdrojový kód algoritmu v LabView je uvedený na Obr. 67. Vypínací čas je vyhodnocovaný v závislosti na zvolenej charakteristike definovanej v IEC 60255-151 a je závislý na veľkosti nadprúdu. Zdrojový kód v LabView je uvedený na Obr. 67.



Obr. 67 Zdrojový kód časovo závislej nadprúdovej ochrany

Pre integráciu času je využívaný rovnaký zdrojový kód ako v prípade časovo nezávislej ochrany - Obr. 65, s tým rozdielom, že vstupnou hodnotou je čas určený podľa vzťahu v IEC 60255-151.

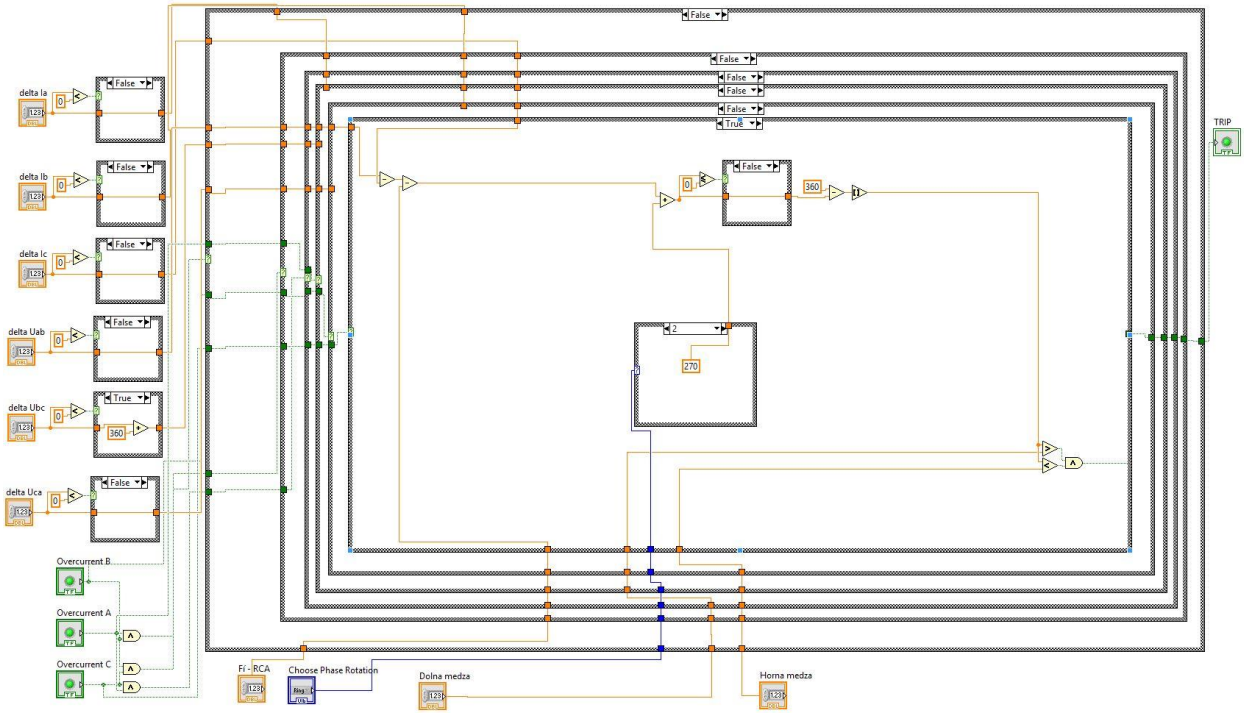
Nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany je vykonávané pomocou grafického užívateľského prostredia. V roletovom menu Choose measurement mode je nutné zvoliť RMS alebo FFT a ako ochrannú funkciu Overcurrent IDMT. Hodnota prúdu, ktorá nesmie byť prekročená sa nastavuje v položke I_{PRESET}, hodnota menovitého prúdu chráneného zariadenia sa nastavuje v položke I_n A01. Položka Preset time sa v prípade funkcie Overcurrent IDMT nemusí nastavovať, nie je použitá v algoritme ochrany. Pomer nulovania pre pevné časové resetovanie predstavuje položka P_{NULL} – podľa Obr. 68.



Obr. 68 Nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí

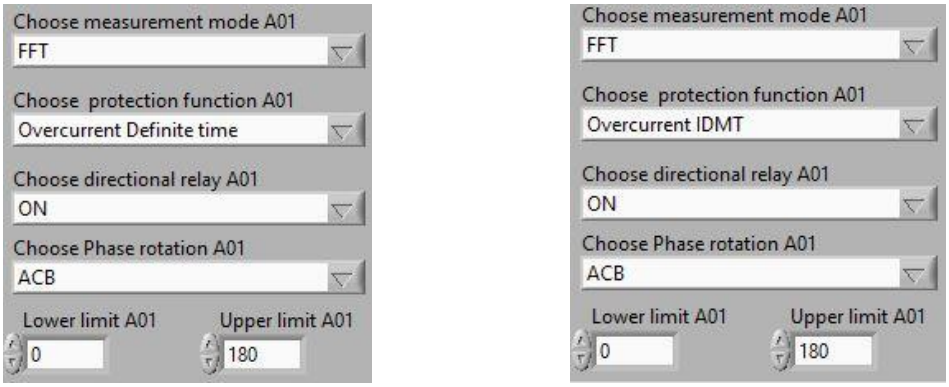
5.3.4 Smerové relé pre časovo závislú/nezávislú nadprúdovú ochranu

Pre časovo závislú a nezávislú nadprúdovú ochranu je možné využiť smerové relé, ktoré dovolí ochrane vybaviť iba pri vopred zvolenom smere prúdu – fázor prúdu sa nachádza vo vopred definovanej oblasti. Naprogramované smerové relé v modele centrálnej ochrany využíva polarizáciu podľa združených napätí popísanú v kapitole 4.2.1. Zdrojový kód v LabView je uvedený na Obr. 69.



Obr. 69 Zdrojový kód smerového relé

Podmienkou použitia smerového člena pre nadprúdové ochrany je použitie meracieho módu Fourierovou transformáciou - v roletovom menu Choose measurement mode je nutné zvoliť FFT. Nastavenie smerového člena ochrany prebieha prostredníctvom grafického užívateľského prostredia, v ktorom sa v roletovom menu Choose directional relay zvolí možnosť ON. Je nutné definovať smer rotácie v chránenej sieti – možnosť výberu ABC alebo ACB. Oblasť, kedy má smerové relé pôsobiť, sa nastavuje položkami Lower limit a Upper limit v stupňoch, čím sa vymedzí oblasť pôsobenia smerového člena – Obr. 70



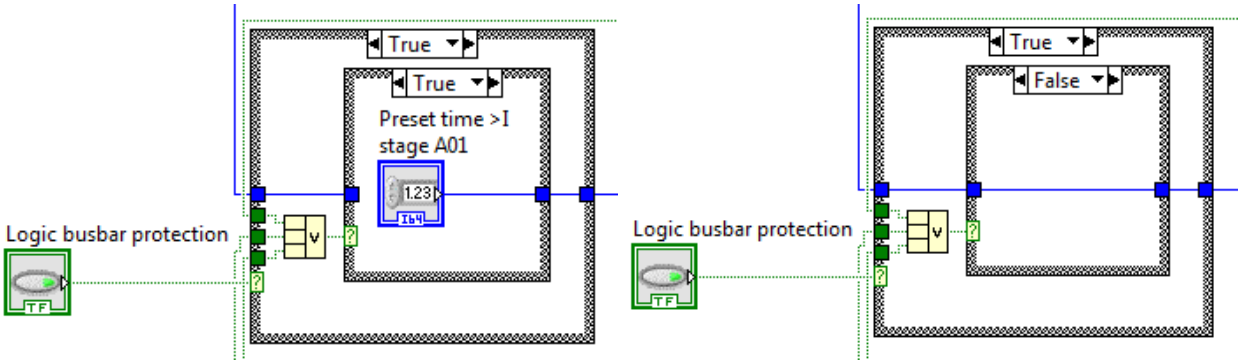
Obr. 70 Nastavenie smerového relé pre nadprúdovú ochranu v grafickom užívateľskom prostredí

5.3.5 Logická ochrana prípojníc

Naprogramovaný algoritmus časovo nezávislej nadprúdovej ochrany je využitý pre logickú ochranu prípojníc malej rozvodne pozostávajúcej zo štyroch polí – jedného prívodu a troch vývodov.

Funkcia logickej ochrany prípojníc je popísaná v kapitole 4.3. Logická ochrana prípojníc využíva zdrojový kód časovo nezávislej nadprúdovej ochrany s dodatočnou funkciou, ktorá v prípade zaznamená nadprúd v jednej z vývodových odbočiek zmení nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany v prívodnej odbočke.

Zdrojový kód dodatočnej funkcie logickej ochrany prípojníc je uvedený na Obr. 71. Nastavenia času prívodnej odbočky v prípade nadprúdu v jednej z vývodových odbočiek sa zmení na čas Preset time > I stage A01.



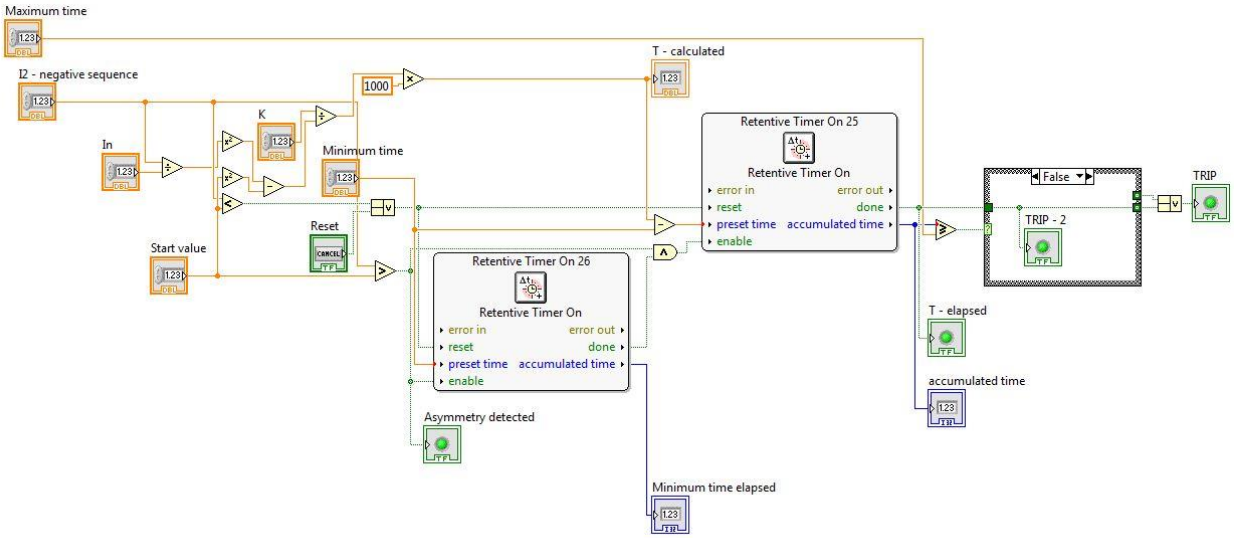
Obr. 71 Zdrojový kód logickej ochrany prípojníc

Pre funkciu logickej ochrany prípojníc je potrebné nastaviť časovo nezávislú ochranu v jednotlivých poliach podľa kapitoly 5.3.2. Funkciu logickej ochrany prípojníc je možné zapnúť v grafickom užívateľskom prostredí tlačidlom Logic busbar protection podľa Obr. 72.

Obr. 72 Nastavenie logickej ochrany prípojníc v grafickom užívateľskom prostredí

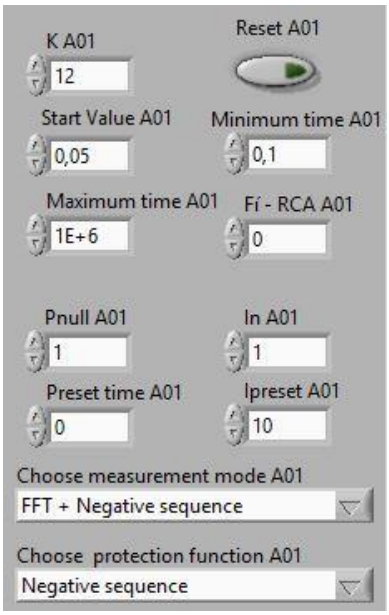
5.3.6 Ochrana pri nesymetrii

Algoritmus ochrany pri nesymetrii je naprogramovaný podľa popisu v kapitole 5.3.6. Zdrojový kód algoritmu ochrany pri nesymetrii je uvedený na Obr. 73.



Obr. 73 Zdrojový kód ochrany pri nesymetrii

Pre správnu funkciu algoritmu je potrebné nastaviť v roletovom menu Choose measurement mode merací mód FFT + Negative Sequence, v ktorom pomocou Fourierovej transformácie je vyhodnotená spätná zložka prúdu. V roletovom menu Choose protection function je nutné zvoliť Negative sequence relay – podľa Obr. 74.



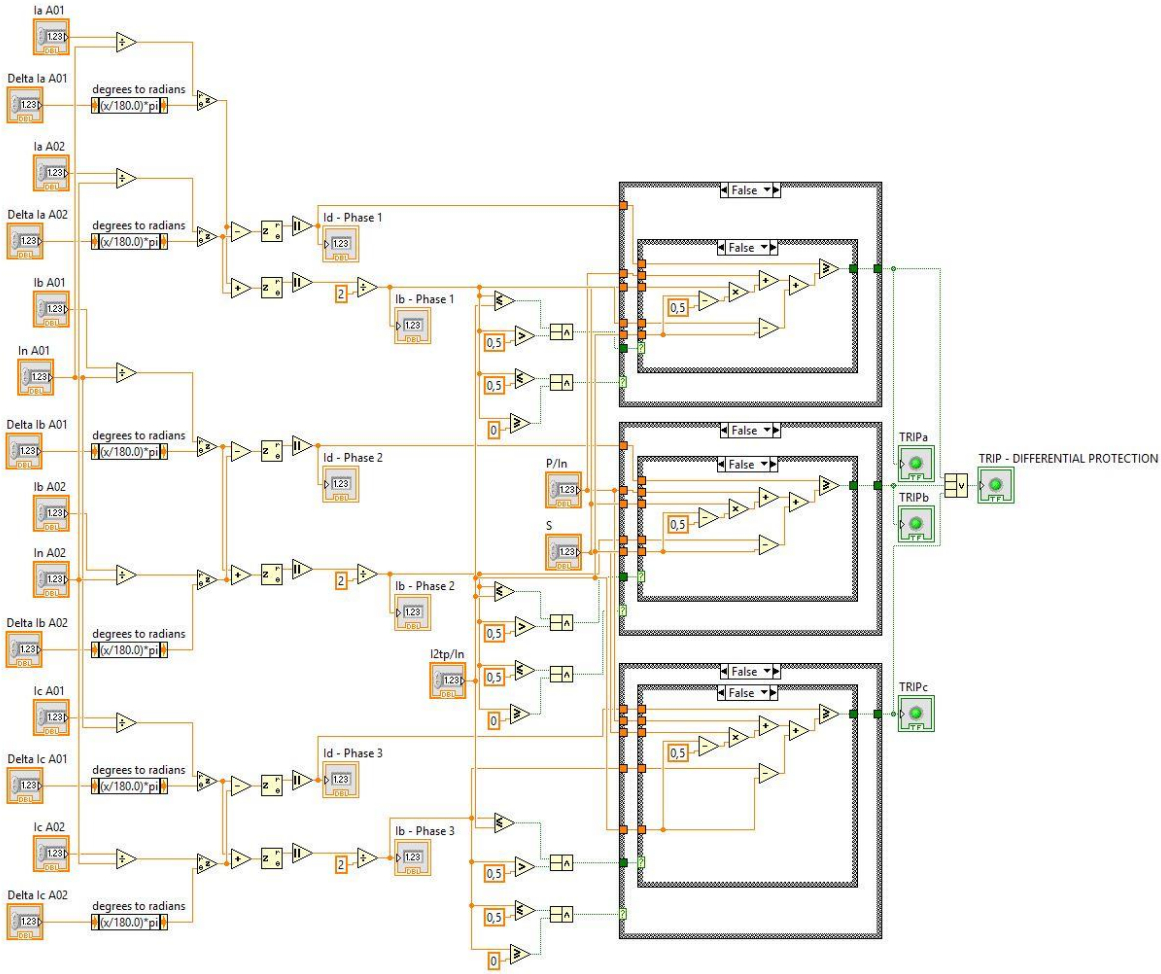
Obr. 74 Nastavenie ochrany pri nesymetrii v grafickom užívateľskom prostredí

Ochrana pri nesymetrii je definovaná nasledovnými položkami

- **Start Value** – štartovacia hodnota, po ktorej prekročení ochrana pri nesymetrii začína pracovať,
- **Minimum time** – parameter definujúci minimálnu dobu, po ktorú je tolerovaná nesymetria,
- **Maximum time** – ak je nesymetrické zaťaženie malé ale trvá dlhú dobu, je možné prostredníctvom parametra Maximum time nastaviť maximálny vypínací čas,
- **K** – konštantou K je určená strmosť inverznej vypínacej charakteristiky,
- $\boldsymbol{I_n}$ – menovitý prúd chráneného generátora.

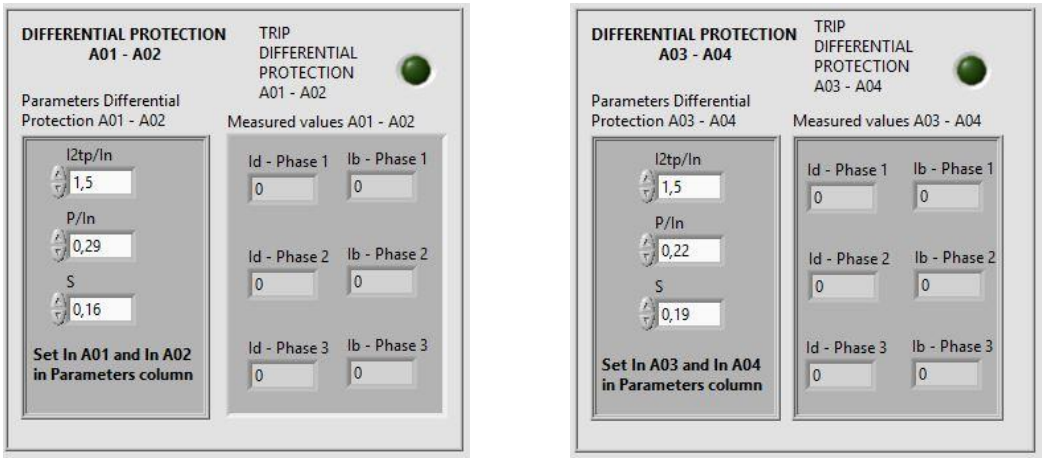
5.3.7 Diferenciálna ochrana

Algoritmus diferenciálnej ochrany je naprogramovaný podľa popisu v kapitole 5.3.7. Zdrojový kód diferenciálnej ochrany v LabView je uvedený na Obr. 75.



Obr. 75 Zdrojový kód diferenciálnej ochrany

Nastavenie diferenciálnej ochrany je možné v grafickom užívateľskom prostred. Ochranu je možné nastaviť medzi odbočkami A01-A02 a medzi odbočkami A03-A04 podľa Obr. 76.



Obr. 76 Nastavenie diferenciálnej ochrany v grafickom užívateľskom prostredí

Naprogramovaná diferenciálna ochrana využíva jednofázové zapojenie z dôvodu možností pri testovaní algoritmu.

Základné parametre pre nastavenie charakteristiky diferenciálnej ochrany

- $\boldsymbol{P/I_n}$ – základné nastavenie stabilizovaného stupňa diferenciálnej ochrany,
- $\boldsymbol{S}$ – popudový pomer, určený vzťahom I_{d2}/I_{b2}. Vyjadruje priebeh charakteristiky v druhej oblasti charakteristiky ($0{,}5<I_b/I_n<I_{2tp}/I_n$).
- $\boldsymbol{I_{2tp}/I_n}$ – bod druhého zlomu charakteristiky,
- Pre správnu funkciu diferenciálnej ochrany je nutné správne nastaviť menovitý prúd v jednotlivých odbočkách – parameter $I_{n\ A0X}$ kde X =1,2,3,4.

5.4 Testovanie modelu centrálnej ochrany

Uvedená kapitola sa venuje overeniu správnej funkcie navrhnutých algoritmov pre model centrálnej ochrany.

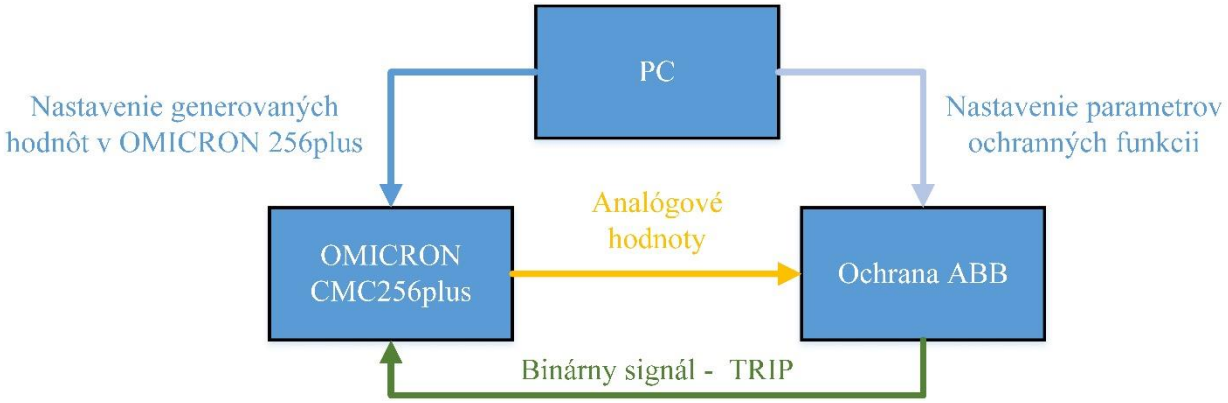
Testovanie je možné pomocou testovacieho zariadenia OMICRON 256plus, ktorý umožňuje generovanie IEC 61850-9-2 SV priamo na Ethernet. Ďalšou možnosťou je využitie digitalizačného modulu DigiECT, MU ParamMU vyvinutých v rámci projektu TAČR - TA03010444, ktorý bol riešený v kooperácii firmy ABB, Ústavu elektroenergetiky a Ústavu automatizácie a meracej techniky. Pre testovanie je vyvinutý hardware využitý s prúdovým senzorom – pre uvedenú prácu je zvolený prúdový senzor od firmy ABB typ KECA 250B1. Tretím spôsobom pre overenie funkčnosti navrhnutých algoritmov je využitie vyvinutých softwarových nástrojov pre testovanie.

Výsledky testovania sú porovnávané s ochranami, ktoré sa v súčasnej dobe používajú v praxi a sú dostupné v laboratóriu ochrán Ústavu elektroenergetiky. Pre porovnávanie boli zvolené ochrany od jedného výrobcu – ABB – uvedené v Tab. 6.

Tab. 6 Tabuľka referenčných ochrán od firmy ABB

Ochranná funkcia	Typ ochrany
Nadprúdová ochrana	ABB REJ 525
Ochrana pri nesymetrii	ABB REM 543
Diferenciálna ochrana	ABB SPAD 346C
Logická ochrana prípojníc	ABB REF 543

Testovanie referenčných ochrán ABB bolo vykonané v zapojení podľa blokovej schémy na Obr. 77.

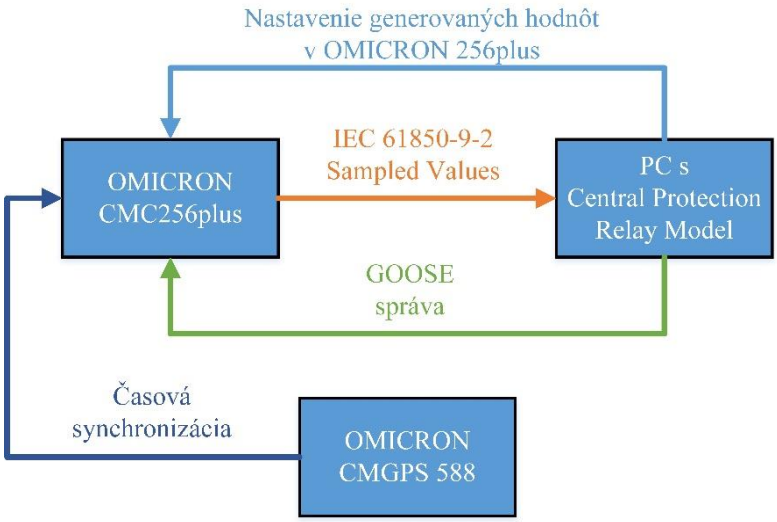


Obr. 77 Bloková schéma zapojenia pre testovanie referenčných ochrán firmy ABB

5.4.1 Testovanie pomocou OMICRON 256plus

Testovanie centrálnej ochrany prebieha pomocou testovacieho zariadenia od firmy OMICRON – 256plus. Model centrálnej ochrany je počas testovania spustený na PC, prepojenie PC a testovacieho zariadenia je realizované metalickým Ethernetovým káblom. Prostredníctvom totožného PC sú nastavované parametre testovacieho zariadenia OMICRON 256plus.

Bloková schéma zapojenia PC s aplikáciou Central Protection Relay Model a testovacieho zdroja OMICRON je uvedená na Obr. 78.

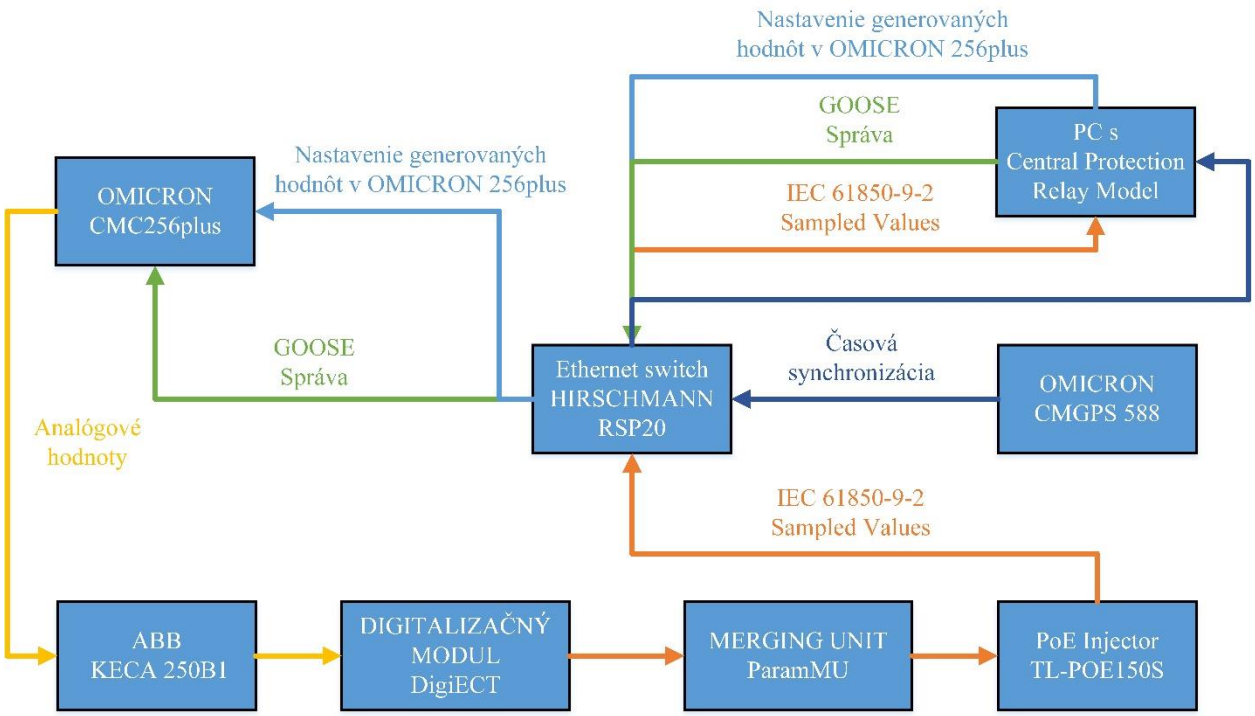


Obr. 78 Bloková schéma zapojenia pre testovanie Central Protection Relay Model

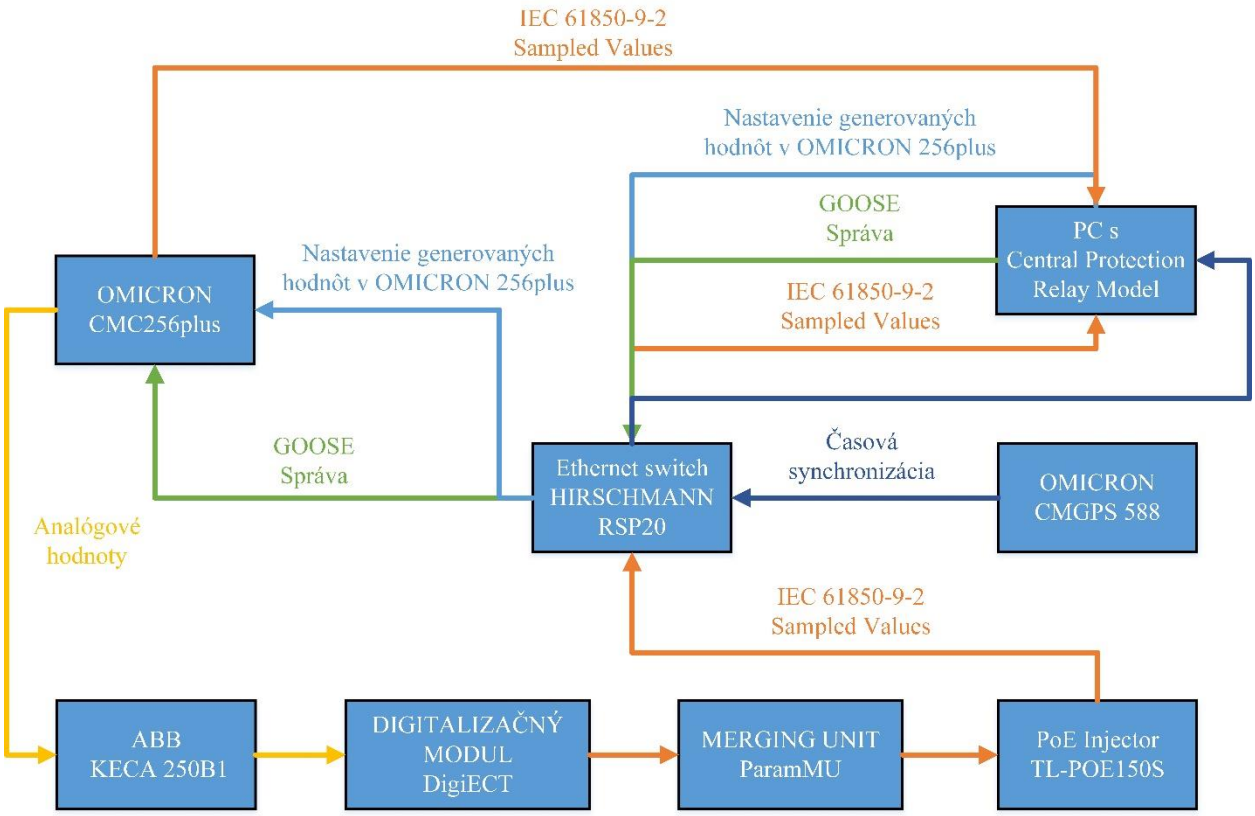
5.4.2 Testovanie pomocou vyvinutého hardware

Vyvinutý hardware pre digitalizáciu výstupného analógového signálu zo senzora v spolupráci s vyvinutou MU bol použitý k overeniu navrhnutých ochranných algoritmov implementovaných v modele centrálnej ochrany. Zapojenie zariadení zodpovedá blokovej schéme podľa Obr. 79. V prípade testovania diferenciálnej ochrany je zapojenie podľa blokovej schémy uvedenej na Obr. 80.

Pomocou software Test Universe sú nastavené parametre generovaného signálu z OMICRON 256plus. Testovacie zariadenie generuje analógový signál, ktorý je meraný pomocou prúdového senzora ABB KECA 250B1. Výstupný signál z prúdového senzora je digitalizovaný pomocou digitalizačného modulu DigiECT a prostredníctvom MU ParamMU je vysielaný na Ethernet vo forme IEC 61850-9-2 SV. Pre spojenie všetkých zariadení je využívaný Ethernetový switch HIRSCHMANN RSP20. Generované signály sú časovo synchronizované pomocou GPS – OMICRON CMGPS 588. V prípade, že navrhnutý algoritmus vyhodnotí poruchu, model centrálnej ochrany pošle TRIP signál vo forme GOOSE správy, ktorá je zaznamenaná v testovacom zariadení OMICRON 256plus.

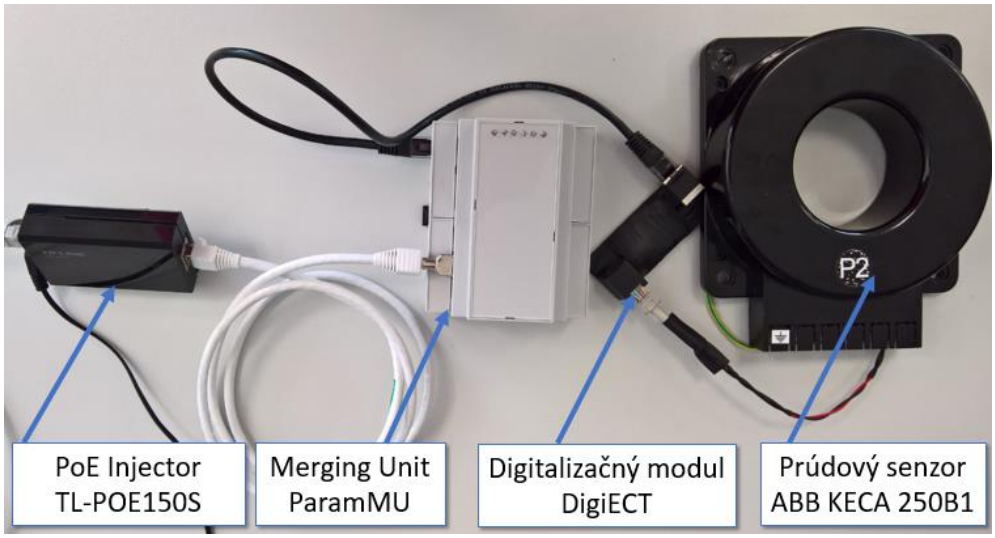


Obr. 79 Bloková schéma pre testovanie Central Protection Relay Model s MU



Obr. 80 Bloková schéma pre testovanie diferenciálnej ochrany Central Protection Relay Model s MU

Na Obr. 81 je zobrazený vyvinutý hardware – MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT – v zapojení s prúdovým senzorom ABB KECA 250B1 a napájanie prostredníctvom PoE Injector TL-POE150S.

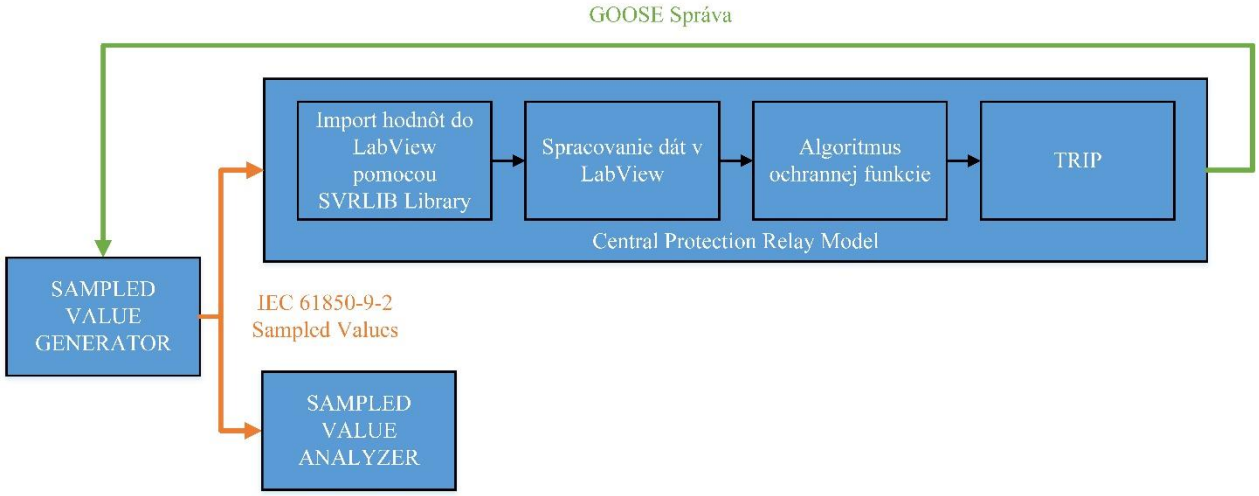


Obr. 81 MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT, prúdový senzor ABB KECA 250B1

5.4.3 Testovanie pomocou softwarových nástrojov

Alternatívnou možnosťou testovania navrhnutých ochranných algoritmov je testovanie pomocou vyvinutých softwarových nástrojov popísaných v kapitole 5.1. Testovanie prináša veľmi efektívnu možnosť overenia správnosti navrhnutého ochranného algoritmu a taktiež jeho rýchlosti. SVG umožňuje definovanie rôznych signálov a je možné pomocou neho vyhodnotiť celkový vypínací čas navrhnutého ochranného algoritmu – rozdiel medzi časom vzniku poruchy a prijatím vypínacieho signálu (GOOSE správy).

Bloková schéma procesu testovania s využitím softwarových nástrojov je uvedená na Obr. 82.



Obr. 82 Bloková schéma testovania Central Protection Relay Model s vyvinutými softwarovými nástrojmi

5.4.4 Popis zariadení pre testovanie

V danej kapitole je uvedený popis jednotlivých zariadení použitých v meracích reťazcoch pre overenie korektnej funkcie navrhnutých ochranných algoritmov v modele centrálnej ochrany – Central Protection Relay Model – ktoré sú popísané v kapitolách 5.4.1 a 5.4.2.

5.4.4.1 MU ParamMU a digitalizačný modul DigiECT

MU použitá k testovaniu bola vyvinutá v rámci projektu TAČR - TA03010444. MU je zobrazená na Obr. 83 spoločne s digitalizačným modulom DigiECT. Digitalizačný modul DigiECT je využívaný pre digitalizáciu výstupného signálu zo senzora a prenos do digitálneho vstupného modulu MU ParamMU semi-synchrónnu sériovú komunikáciu s proprietárnym protokolom, ktorý zaisťuje prenos parametrov uložených vo vnútornej pamäti digitalizačného modulu a aktuálnych meraných okamžitých hodnôt prúdu a napätia. Zároveň je prenášaná aj informácia o vnútornej teplote digitalizačného modulu.

Obr. 83 MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT

Jednotka je napájaná pomocou technológie Power-Over-Ethernet na komunikačnom porte Ethernet. Stav jednotky je signalizovaný LED diódami LED1 až LED6 na prednom panele jednotky.

- **LED1** – zelená farba označuje funkčné hradlové pole FPGA pripravené spracovávať dáta z pripojených senzorov.
- **LED2** – blikajúca LED zelenou farbou označuje korektný príjem dát z pripojeného senzora.
- **LED3** – zelená farba označuje komunikáciu po Ethernete mimo IEC 61850-9-2 SV a IEEE1588 paketov.
- **LED4** – rýchlo blikajúca zelená farba (cca 8x za sekundu) označuje správnu inicializáciu synchronizačnej časti MU, ktorá je pripravená prijímať synchronizačné správy podľa IEEE1588. Pomaly blikajúca zelená farba (cca 1x za sekundu) signalizuje korektnú synchronizáciu k nadradenému systému s odchýlkou do +/- 2 µs.
- **LED5** – intenzívna červená farba signalizuje chybu v napájacích obvodoch jednotky. Jednotku je nutné okamžite odpojiť od Ethernetu.
- **LED6** – zelena farba indikuje korektné napájanie jednotky získané technológiou PoE a správne vyjednané výkonové parametre napájania.

5.4.4.2 Prúdový senzor ABB KECA 250B1

Prúdový senzor od firmy ABB typ KECA 250B1 bol vybraný ako referenčný senzor pre použitie pri testovaní vyvinutého hardware a software. Parametre senzora sú uvedené v Tab. 7 [33] [34].

Tab. 7 Parametre prúdového senzora ABB KECA 250B1

Maximálne napätie pre zariadenie U_m	[kV]	0,72
Menovité výdržné napätie sieťovej frekvencie	[kV]	3
Menovitý primárny prúd I_{pr}	[A]	250
Menovitý trvalý tepelný prúd I_{cth}	[A]	2000
Menovitý transformačný pomer, K_{ra} pre prúdové meranie	[-]	250 A / 150 mV pri 50Hz 180 mV pri 60Hz
Trieda presnosti	[-]	0,5/5P125

Prúdový senzor pracuje na princípe Rogowskeho cievky popísaného v kapitole 2.6.1. Senzor dosahuje triedu 0,5 pre meracie funkcie v rozsahu od 5% menovitého primárneho prúdu až po menovitý trvalý tepelný prúd. Pre dynamické merania prúdu (ochranné funkcie) splňuje požiadavky pre ochrannú triedu 5P v rozsahu do menovitého krátkodobého tepelného prúdu. Prúdový senzor ABB KECA250B1 je uvedený na Obr. 84 [33] [34].

Obr. 84 Prúdový senzor ABB KECA 250B1

5.4.4.3 Testovacie zariadenie OMICRON 256plus

Testovacie zariadenie OMICRON 256plus je zobrazené na Obr. 85 [35]. Zariadenie je využívané ako generátor IEC 61850-9-2 SV na Ethernet a zároveň aj ako generátor analógových signálov do prúdového senzora, ktoré sú následne digitalizované a vysielané vo forme IEC 61850-9-2 SV na Ethernet prostredníctvom MU [35] [36].

Obr. 85 Testovacie zariadenie OMICRON 256plus

Testovacie zariadenie sa nastavuje prostredníctvom obslužného software Test Universe. Pre testovanie navrhnutých ochranných funkcií je využívaný model State Sequencer, ktorý umožňuje definovať viac stavov – bezporuchový, poruchový, po odznení poruchy. Pre vyhodnotenie vypínacieho času algoritmu je vyhodnocovaný rozdiel medzi časom kedy nastane poruchový stav a prijatím GOOSE správy. Pre umožnenie vysielania IEC 61850-9-2 SV a prijímania GOOSE správ je nutná ich konfigurácia v module IEC 61850 [35] [36].

5.4.4.4 GPS OMICRON CMGPS588

Časovú synchronizáciu pomocou protokolu IEEE1588 v meracom reťazci zaisťuje časová základňa GPS – OMICRON CMGPS588 – ktorá je zobrazená na Obr. 86 [37]. Časovú základňu nie je nutné konfigurovať, pracuje ako Precision Time Protocol (PTP) Grandmaster Clock. Časová základňa GPS je využitá z dôvodu aby bolo možné merať časové parametre [37].

Obr. 86 GPS OMICRON CMGPS588

5.4.4.5 PoE Injector TL-POE150S

Zariadenie PoE Injector TL-POE150S, ktoré je zobrazené na Obr. 87 [38], slúži na napájanie vyvinutej MU. Zariadenie je umiestnené ako medzičlánok medzi MU a Ethernetovým switchom.

Obr. 87 PoE Injector TL-POE150S

Zvolený model TL-POE150S: [38]

- vyhovuje štandardom IEEE802.3, IEEE802.3u, IEEE802.3ab, IEEE802.3af,
- zaisťuje napájanie do vzdialenosti 100 m,
- automaticky určuje potrebné požiadavky na napájanie,
- zapojenie bez nutnosti konfigurácie,
- napájanie externým napájacím adaptérom.

5.4.4.6 Ethernet switch HIRSCHMANN RSP20

Pre prepojenie jednotlivých zariadení v meracom reťazci je využitý Ethernetový switch HIRSCHMANN RSP20 pracujúci v režime transparent clock. Switch HIRSCHMANN RSP20 je zobrazený na Obr. 88 [39].

Obr. 88 Ethernet switch HIRSCHMANN RSP20

5.4.5 Mžiková nadprúdová ochrana

Pre testovanie mžikovej nadprúdovej ochrany je použité zapojenie podľa kapitoly 5.4.2. Testovanie prebieha pomocou aplikácie StateSequencer, kde je definovaný poruchový a bezporuchový stav podľa Tab. 8.

Tab. 8 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav

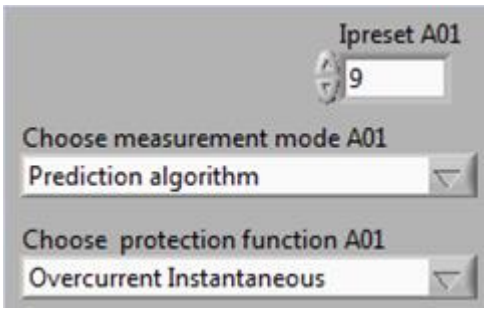
Číslo testu	1	2
Bezporuchový stav I_{NORMAL} [A]	5	5
Poruchový stav I_{PORUCH} [A]	15	21

Parametre ochrannej funkcie sú nastavené podľa Tab. 9.

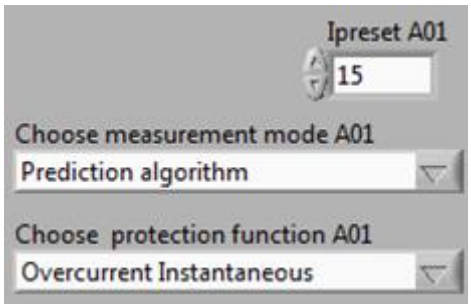
Tab. 9 Nastavenie parametrov mžikovej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1	2
Nastavená hodnota prúdu I_{PRESET} [A]	9	15

Pre vyhodnotenie meraných hodnôt u mžikovej nadprúdovej ochrany bol použitý predikčný algoritmus. Nastavenie parametrov v grafickom užívateľskom prostredí Central Protection Relay Model je uvedené na Obr. 89.



Nastavenie pre stav 1



Nastavenie pre stav 2

Obr. 89 Nastavenie mžikovej nadprúdovej ochrany pre test v grafickom užívateľskom prostredí

Výsledky testovania sú porovnané s ochranou ABB REJ525 v Tab. 10.

Tab. 10 Výsledky z testovania mžikovej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1		2	
Názov ochrany	Central Protection Relay Model	ABB REJ 525	Central Protection Relay Model	ABB REJ 525
Číslo merania	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]
1	0,0020	0,0015	0,0019	0,0016
2	0,0023	0,0016	0,0020	0,0017
3	0,0018	0,0015	0,0021	0,0017
4	0,0017	0,0017	0,0016	0,0015
5	0,0020	0,0015	0,0016	0,0017
6	0,0017	0,0016	0,0019	0,0017
7	0,0019	0,0015	0,0020	0,0016
8	0,0018	0,0017	0,0017	0,0015
9	0,0022	0,0016	0,0017	0,0017
10	0,0018	0,0015	0,0019	0,0016
Priemerný vybavovací čas	0,00192	0,00157	0,00184	0,00163

Tab. 11 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu mžikovej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1	2
Názov ochrany	Central Protection Relay Model	Central Protection Relay Model
Číslo merania	$\delta_{LabView}$ [%]	$\delta_{LabView}$ [%]
1	25,00	15,79
2	30,43	15,00
3	16,67	19,05
4	0,00	6,25
5	25,00	-6,25
6	5,88	10,53
7	21,05	20,00
8	5,56	11,76
9	27,27	0,00
10	16,67	15,79
Priemerná odchýlka vybavovacieho času	18,23	11,41

Vyhodnotenie

Počas testovania mžikovej nadprúdovej ochrany bola overená korektná funkcia naprogramovaného algoritmu. Výsledky testovania sú uvedené v Tab. 10 a odchýlka merania je uvedená v Tab. 11.

Vybavovací čas algoritmu Central Protection Relay Model bol v priemere 1,92 ms pre test 1, čo v porovnaní s priemerným vybavovacím časom ochrany ABB REJ 525 (1,57 ms) predstavuje odchýlku 18,23 %. Pre test 2 bol priemerný vybavovací čas algoritmu Central Protection Relay Model 1,84 ms. Odchýlka v porovnaní s vybavovacím časom ochrany ABB REJ 525 (1,63 ms) je 11,41%.

Namerané hodnoty vybavovacích časov sú porovnateľné s hodnotami nameranými pre nadprúdovú ochranu ABB REJ 525. Odchýlku spôsobujú procesy bežiace na pozadí Windows, na ktorom je spustený model centrálnej ochrany Central Protection Relay Model a taktiež nepresnosť merania prúdového senzora ABB KECA 250B1 použitého pri testovaní algoritmu.

Neistoty navrhnutého ochranného algoritmu sú popísané v kapitole 5.5.2.

5.4.6 Časovo nezávislá nadprúdová ochrana

Overenie funkcie algoritmu časovo nezávislej nadprúdovej ochrany prebieha pomocou zapojenia podľa kapitoly 5.4.2. Testovanie prebieha pomocou aplikácie StateSequencer, kde je definovaný poruchový a bezporuchový stav podľa Tab. 12.

Tab. 12 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav

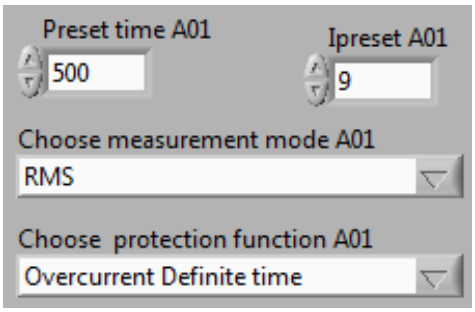
Číslo testu	1	2
Bezporuchový stav I_{NORMAL} [A]	5	5
Poruchový stav I_{PORUCH} [A]	15	21

Parametre ochrannej funkcie sú nastavené podľa Tab. 13.

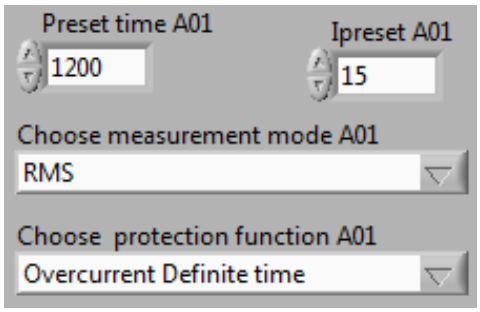
Tab. 13 Nastavenie parametrov časovo nezávislej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1	2
Nastavená hodnota prúdu I_{PRESET} [A]	9	15
Nastavená hodnota času T_{TRIP} [s]	0,5	1,2

Pre vyhodnotenie meraných hodnôt u časovo nezávislej nadprúdovej ochrany bol použitý algoritmus pre výpočet efektívnej hodnoty. Nastavenie parametrov v grafickom užívateľskom prostredí Central Protection Relay Model je uvedené na Obr. 90.



Nastavenie pre stav 1



Nastavenie pre stav 2

Obr. 90 Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre test v grafickom užívateľskom prostredí

Výsledky testovania sú porovnané s ochranou ABB REJ525 a teoretickými hodnotami v Tab. 14.

Tab. 14 Výsledky z testovania časovo nezávislej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	**1**		**2**	
Názov ochrany	**Central Protection Relay Model**	**ABB REJ 525**	**Central Protection Relay Model**	**ABB REJ 525**
Nastavená hodnota času T_{TRIP} [s]	0,5	0,5	1,2	1,2
Číslo merania	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]
1	0,509	0,5041	1,2089	1,2041
2	0,509	0,5022	1,2094	1,2043
3	0,5093	0,5055	1,2089	1,2051
4	0,5084	0,5027	1,2091	1,2042
5	0,5076	0,5041	1,2078	1,2024
6	0,5087	0,5044	1,2096	1,2019
7	0,5092	0,5051	1,2086	1,2031
8	0,5084	0,5028	1,2085	1,2025
9	0,5082	0,5024	1,2080	1,2039
10	0,5081	0,5041	1,2082	1,2021
Priemerný vybavovací čas	0,5086	0,5037	1,2087	1,2034

Tab. 15 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu časovo nezávislej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1		2	
Názov ochrany	Central Protection Relay Model	ABB REJ 525	Central Protection Relay Model	ABB REJ 525
Číslo merania	$\delta_{LabView}$ [%]	δ_{ABB} [%]	$\delta_{LabView}$ [%]	δ_{ABB} [%]
1	1,77	0,81	0,74	0,34
2	1,77	0,44	0,78	0,36
3	1,83	1,09	0,74	0,42
4	1,65	0,54	0,75	0,35
5	1,50	0,81	0,65	0,20
6	1,71	0,87	0,79	0,16
7	1,81	1,01	0,71	0,26
8	1,65	0,56	0,70	0,21
9	1,61	0,48	0,66	0,32
10	1,59	0,81	0,68	0,17
Priemerná odchýlka vybavovacieho času	1,69	0,74	0,72	0,28

Vyhodnotenie

Počas testovania časovo nezávislej nadprúdovej ochrany bola overená korektná funkcia naprogramovaného algoritmu. Výsledky testovania sú uvedené v Tab. 14 a odchýlka merania je uvedená v Tab. 15.

Vybavovací čas algoritmu Central Protection Relay Model bol v priemere 0,5086 s pre test 1, čo predstavuje odchýlku od nastaveného času 1,69 %. Priemerný vybavovací čas ochrany ABB REJ 525 (0,5037 ms) predstavuje odchýlku 0,74 % od nastaveného času. Pre test 2 bol priemerný vybavovací čas algoritmu Central Protection Relay Model 1,2087 s – s odchýlkou od nastaveného času 0,72 %. Priemerný vybavovací čas ochrany ABB REJ 525 (1,2034 s) predstavuje odchýlku 0,28 % od nastaveného času.

Namerané hodnoty vybavovacích časov Central Protection Relay Model sú porovnateľné s hodnotami nameranými pre nadprúdovú ochranu ABB REJ 525 a teoretickými vybavovacími časmi. Odchýlku spôsobujú procesy bežiace na pozadí Windows, na ktorom je spustený model centrálnej ochrany Central Protection Relay Model a taktiež nepresnosť merania prúdového senzora ABB KECA 250B1 použitého pri testovaní algoritmu. Algoritmus pracuje s efektívnou hodnotou prúdu, ktorá je počítaná každú periódu, čo má taktiež vplyv na vybavovací čas algoritmu.

Neistoty navrhnutého ochranného algoritmu sú popísané v kapitole 5.5.2.

5.4.7 Časovo závislá nadprúdová ochrana

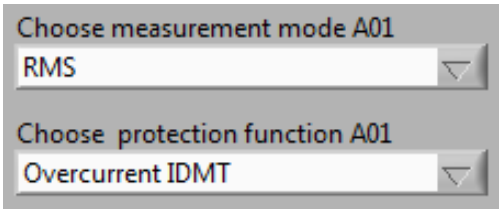
Overenie funkcie algoritmu časovo závislej nadprúdovej ochrany prebieha pomocou zapojenia podľa kapitoly 5.4.2. Parametre ochrannej funkcie – časovo závislej nadprúdovej ochrany – boli nastavené podľa Tab. 16. Charakteristika Standard Inverse bola zvolená pre nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany.

Tab. 16 Nastavenie parametrov časovo závislej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	**1**
Konštanta pre charakteristiku ochrany β [-]	0,14
Konštanta pre charakteristiku ochrany α [-]	0,02
Maximálny menovitý prúd ochrany I_n [A]	1
Časový násobiteľ *TMS* [-]	1

Pre vyhodnotenie meraných hodnôt u časovo nezávislej nadprúdovej ochrany bol použitý algoritmus pre výpočet efektívnej hodnoty. Testovanie prebiehalo pomocou aplikácie StateSequencer, kde je definovaný poruchový a bezporuchový stav. Pre poruchový stav bola hodnota prúdu pre každé meranie zmenená tak, aby bola premeraná celá charakteristika nastavenia ochrany podľa Tab. 16. Pre testovanie bol zvolený sínusový signál s frekvenciou 50Hz.

Nastavenie parametrov v grafickom užívateľskom prostredí Central Protection Relay Model je uvedené na Obr. 91.



Obr. 91 Nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany pre test v grafickom užívateľskom prostredí

Výsledky testovania sú porovnané s ochranou ABB REJ525 a teoretickými hodnotami v Tab. 17.

Tab. 17 Výsledky z testovania časovo závislej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1		
Názov ochrany	**Teoretická hodnota**	**Central Protection Relay Model**	**ABB REJ 525**
RMS generovaného signálu [A]	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]
2	10,0290	10,0351	10,0241
3	6,3019	6,3047	6,3110
4	4,9798	4,9829	4,9862
5	4,2797	4,2820	4,2804
6	3,8372	3,8414	3,8401
7	3,5277	3,5301	3,5295
8	3,2968	3,2986	3,2988
9	3,1163	3,1184	3,1175
10	2,9706	2,9734	2,9725

Tab. 18 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu časovo závislej nadprúdovej ochrany

Číslo testu	1	
Názov ochrany	**Central Protection Relay Model**	**ABB REJ 525**
RMS generovaného signálu [A]	$\delta_{LabView}$ [%]	δ_{ABB} [%]
2	0,06	-0,11
3	0,04	0,10
4	0,06	0,07
5	0,05	-0,04
6	0,11	-0,03
7	0,07	-0,02
8	0,05	0,01
9	0,07	-0,03
10	0,09	-0,03

Vyhodnotenie

Počas testovania časovo závislej nadprúdovej ochrany bola overená korektná funkcia naprogramovaného algoritmu. Výsledky testovania sú uvedené v Tab. 17 Tab. 10 a odchýlka merania je uvedená v Tab. 18.

Vybavovací čas algoritmu Central Protection Relay Model dosiahol najvyššiu kladnú odchýlku od teoretického času pre RMS generovaného signálu 4 A – 0,11 %. Najvyššia kladná odchýlka vybavovacieho času ochrany ABB REJ 525 bola pre RMS generovaného signálu 3 A – 0,10 %.

Namerané hodnoty vybavovacích časov Central Protection Relay sú porovnateľné s hodnotami nameranými pre nadprúdovú ochranu ABB REJ 525. Vybavovacie časy sú porovnateľné s teoretickými vybavovacími časmi. Odchýlku spôsobujú procesy bežiace na pozadí Windows, na ktorom je spustený model centrálnej ochrany Central Protection Relay Model a taktiež nepresnosť merania prúdového senzora ABB KECA 250B1 použitého pri testovaní algoritmu. Algoritmus pracuje s efektívnou hodnotou prúdu, ktorá je počítaná každú periódu, čo má taktiež vplyv na vybavovací čas algoritmu.

Neistoty navrhnutého ochranného algoritmu sú popísané v kapitole 5.5.2.

5.4.8 Smerové relé pre časovo závislú/nezávislú nadprúdovú ochranu

Funkciu smerového relé je možné použiť pre časovo závislú a časovo nezávislú nadprúdovú ochranu. Overenie funkcie prebieha pomocou zapojenia podľa kapitoly 5.4.1, kedy v poruchovom stave ochrana vyhodnocuje poruchu len v prípade ak je prúd v nastavenom smere. Testovanie smerového relé prebehlo v spolupráci s algoritmom pre časovo nezávislú nadprúdovú ochranu pomocou aplikácie StateSequencer, kde je definovaný poruchový a bezporuchový stav. Bezporuchový stav je uvedený v Tab. 19. Poruchový stav je navodený vždy v určitej fáze, prípadne súčasne v dvoch fázach podľa Tab. 21.

Tab. 19 Parametre pre bezporuchový stav

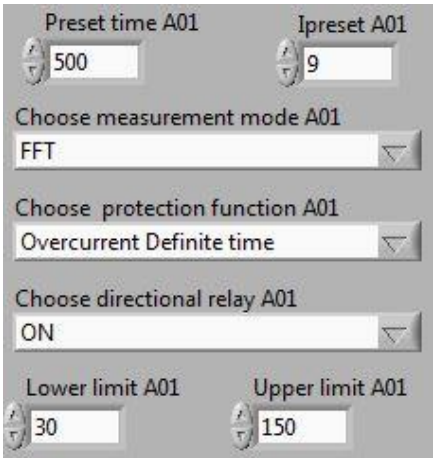
Číslo testu	1	2
I_A [A]	5 ∟0°	5 ∟0°
I_B [A]	5 ∟-120°	5 ∟-120°
I_C [A]	5 ∟+120°	5 ∟+120°
U_A [V]	10 ∟0°	10 ∟0°
U_B [V]	10 ∟-120°	10 ∟-120°
U_C [V]	10 ∟+120°	10 ∟+120°

Parametre nastavenia časovo nezávislej nadprúdovej ochrany a smerového relé sú uvedené v Tab. 20.

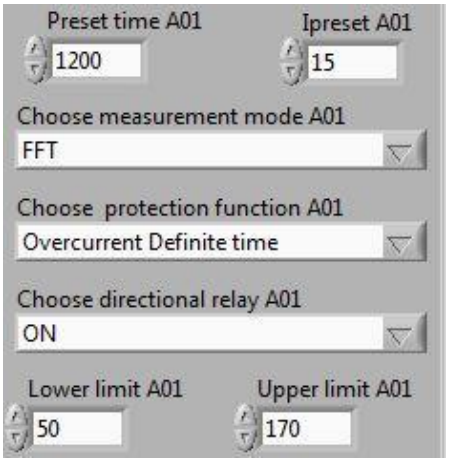
Tab. 20 Nastavenie parametrov časovo závislej nadprúdovej ochrany a smerového relé

Číslo testu	**1**	**2**
Nastavená hodnota prúdu I_{PRESET} [A]	9	15
Nastavená hodnota času T_{TRIP} [s]	0,5	1,2
Charakteristický uhol ochrany φ_{RCA}	0	0
Interval pôsobenia ochrany	<30° - 150°>	<50° - 170°>

Nastavenie parametrov v grafickom užívateľskom prostredí Central Protection Relay Model je uvedené na Obr. 92.



Nastavenie pre stav 1



Nastavenie pre stav 2

Obr. 92 Nastavenie časovo nezávislej nadprúdovej ochrany a smerového relé pre test v grafickom užívateľskom prostredí

Výsledky testovania smerového relé sú uvedené v tabuľke v Tab. 21.

Tab. 21 Výsledky z testovania časovo nezávislej nadprúdovej ochrany a smerového relé

Číslo testu			**1**	**2**
Názov ochrany			**Central Protection Relay Model**	**Central Protection Relay Model**
Nastavená hodnota času T_{TRIP} [s]			0,5	1,2
Číslo merania	**Postihnutá fáza**	**Veľkosť poruchového prúdu [A]**	$t_{Operating}$ [s]	$t_{Operating}$ [s]
1	A	$\bar{I}_A = 21 \angle 80°$	0,5085	1,2088
2	B	$\bar{I}_B = 21 \angle -60°$	0,5089	1,2091
3	C	$\bar{I}_C = 21 \angle -120°$	0,5092	1,2087
4	A	$\bar{I}_A = 21 \angle 40°$	0,5082	Blokuje smerové relé
5	B	$\bar{I}_B = 21 \angle 40°$	Blokuje smerové relé	1,2080
6	C	$\bar{I}_C = 21 \angle 40°$	Blokuje smerové relé	Blokuje smerové relé
7	A-B	$\bar{I}_A = 21 \angle 90°$ $\bar{I}_B = 21 \angle -120°$	0,5088	Blokuje smerové relé
8	B-C	$\bar{I}_B = 21 \angle 40°$ $\bar{I}_C = 21 \angle 120°$	0,5091	1,2089
9	C-A	$\bar{I}_C = 21 \angle 40°$ $\bar{I}_A = 21 \angle 0°$	Blokuje smerové relé	Blokuje smerové relé

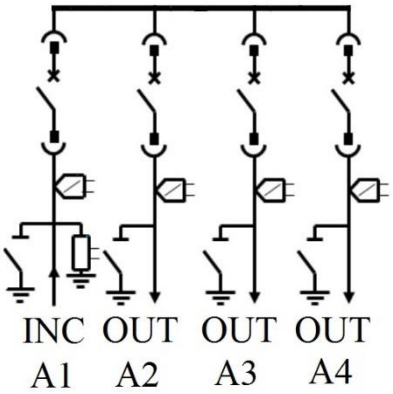
Vyhodnotenie

Počas testovania bola overená korektná funkcia navrhnutého algoritmu. Pri testovaní boli simulované jednofázové a dvojfázové poruchy, čím boli otestované všetky možnosti smerového algoritmu. Časovo nezávislá ochrana pôsobila iba v prípade ak sa poruchový prúd nachádzal v definovanom intervale. V ostatných prípadoch smerové relé blokovalo časovo nezávislú nadprúdovú ochranu a nedošlo k vybaveniu ochrany.

Príčiny odchýlok vo vybavovacích časoch časovo nezávislej nadprúdovej ochrany sú popísané v kapitole 5.4.6. a 5.5.2.

5.4.9 Logická ochrana prípojníc

Logická ochrana prípojníc bola otestovaná pomocou testovacieho zariadenia OMICRON 256plus podľa zapojenia popísaného v kapitole 5.4.1. V module State Sequencer boli definované tri stavy – pred poruchou, poruchový stav, po odznení poruchy. Výsledky testovania boli porovnané s testovaním ochrán ABB REF543. Jednopólová schéma testovanej rozvodne je uvedená na Obr. 93.



Obr. 93 Jednopólová schéma testovanej rozvodne

Pre logickú ochranu prípojníc je využitý algoritmus časovo nezávislej ochrany. Parametre pre nastavenie ochrannej funkcie sú uvedené v Tab. 22.

Tab. 22 Nastavenie parametrov časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre logickú ochranu prípojníc

	I_{PRESET} [A]	T_{TRIP} [ms]
Prívodná odbočka >> *I*	80	500
Prívodná odbočka > *I*	80	1300
Vývodová odbočka	50	1000

Testované boli dve možné poruchy – skrat na vývodovej odbočke, skrat na prípojniciach.

1. **Skrat vo vývodovej odbočke**

Prvým testovaným stavom je skrat vo vývodovej odbočke. Pre túto poruchu boli definované tri stavy v module State Sequencer – podľa Tab. 23.

Stav 1 demonštruje podmienky pred poruchou. Prúd v jednotlivých odbočkách je nastavený podľa Tab. 23. Po uplynutí doby 5 s nastane Stav 2, ktorý demonštruje podmienky počas poruchy. Prúd v odbočkách A2 a A1 je zvýšený na hodnotu podľa Tab. 23. Ochrana vo vývodovej odbočke A2 posiela blokovací signál ochrane odbočke A1 aby nevybavila. Pri skrate vo vývodovej odbočke A2 vybaví len ochrana v tejto odbočke a posiela vypínací signál testovaciemu zariadeniu OMICRON 256plus. Po prijatí vypínacieho signálu testovacie zariadenie automaticky prechádza do stavu 3, ktorý predstavuje podmienky po odznení poruchy.

Tab. 23 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav pre skrat vo vývodovej odbočke

Stav 1 – stav pred poruchou		
	Prívodná odbočka A1	**Vývodová odbočka A2**
I_A [A]	40 ∟0°	40 ∟0°
I_B [A]	40 ∟-120°	40 ∟-120°
I_C [A]	40 ∟+120°	40 ∟+120°
Stav 2 – poruchový stav		
	Prívodná odbočka A1	**Vývodová odbočka A2**
I_A [A]	100 ∟0°	100 ∟0°
I_B [A]	100 ∟-120°	100 ∟-120°
I_C [A]	100 ∟+120°	100 ∟+120°
Stav 3 – stav po poruche		
	Prívodná odbočka A1	**Vývodová odbočka A2**
I_A [A]	20 ∟0°	0 ∟0°
I_B [A]	20 ∟-120°	0 ∟-120°
I_C [A]	20 ∟+120°	0 ∟+120°

2. Skrat na prípojniciach

Druhým testovaným stavom je skrat na prípojniciach. Pre túto poruchu boli definované tri stavy v module State Sequencer – podľa Tab. 24. Stav 1 demonštruje podmienky pred poruchou. Prúd v jednotlivých odbočkách je nastavený podľa Tab. 24. Po uplynutí doby 5 s nastane Stav 2, ktorý demonštruje podmienky počas poruchy. Prúd v odbočke A1 je zvýšený na hodnotu podľa Tab. 24. Pri skrate na prípojniciach vybaví ochrana v prívodnej odbočke A1 a posiela vypínací signál testovaciemu zariadeniu OMICRON 256plus. Po prijatí vypínacieho signálu testovacie zariadenie automaticky prechádza do Stavu 3, ktorý predstavuje podmienky po odznení poruchy.

Tab. 24 Parametre pre bezporuchový a poruchový stav pre skrat na prípojniciach

Stav 1 – stav pred poruchou		
	Prívodná odbočka A1	**Vývodová odbočka A2**
I_A [A]	40 ∟0°	40 ∟0°
I_B [A]	40 ∟-120°	40 ∟-120°
I_C [A]	40 ∟+120°	40 ∟+120°
Stav 2 – poruchový stav		
	Prívodná odbočka A1	**Vývodová odbočka A2**
I_A [A]	100 ∟0°	40 ∟0°
I_B [A]	100 ∟-120°	40 ∟-120°
I_C [A]	100 ∟+120°	40 ∟+120°
Stav 3 – stav po poruche		
	Prívodná odbočka A1	**Vývodová odbočka A2**
I_A [A]	0 ∟0°	0 ∟0°
I_B [A]	0 ∟-120°	0 ∟-120°
I_C [A]	0 ∟+120°	0 ∟+120°

Výsledky testovania logickej ochrany prípojníc sú uvedené v Tab. 25. V Tab. 25 sú uvedené vypínacie časy pre model centrálnej ochrany, ochrany ABB REF543 a teoretický vypínací čas.

Tab. 25 Výsledky z testovania logickej ochrany prípojníc

	Central Protection Relay Model	ABB REF 543	Teoretický čas
	$t_{Operating}$ [ms]	$t_{Operating}$ [ms]	$t_{Operating}$ [ms]
Stav 1 – Skrat vo vývodovej odbočke	104	124	100
Stav 2 – Skrat na prípojniciach	52	70	50

Tab. 26 Odchýlky vybavovacích časov algoritmu logickej ochrany prípojníc

	Central Protection Relay Model	ABB REF 543
	$\delta_{LabView}$ [%]	δ_{ABB} [%]
Stav 1 – Skrat vo vývodovej odbočke	3,85	19,35
Stav 2 – Skrat na prípojniciach	3,85	28,57

Vyhodnotenie

Testovanie overilo správnu funkciu navrhnutého algoritmu logickej ochrany prípojníc. Porovnanie s ochranami ABB REF543 demonštruje porovnanie klasického prepojenia ochrán vodičmi a digitálneho spôsobu podľa štandard IEC 61850, ktoré využíva model centrálnej ochrany. Z porovnania je vidieť, že model centrálnej ochrany je rýchlejší o 20 ms než klasické prepojenie vodičmi. Výsledky testovania logickej ochrany prípojníc sú uvedené v Tab. 25. Odchýlky vybavovacích časov Central Protection Relay Model a ochrany ABB REF 543 sú uvedené v Tab. 26.

5.4.10 Ochrana pri nesymetrii

Testovanie ochrany pri nesymetrii bolo uskutočnené pomocou zapojenia popísaného v kapitole 5.4.1. Výsledky testovania ochrany sú porovnané s výsledkami testovania ochrany ABB REM543, ktorá bola otestovaná pomocou testovacieho zariadenia OMICRON 256plus. V ochrane ABB REM543 bola nastavená ochranná funkcia NPS3HIGH.

Parametre nastavenia ochrannej funkcie pre model centrálnej ochrany a ochrany ABB REM543 sú uvedené v Tab. 27.

Tab. 27 Nastavenie parametrov ochrany pri nesymetrii

Číslo testu	1	2
K	12	8
StartValue	0,05	0,12

Parametre generovaného poruchového signálu sú uvedené v Tab. 28.

Tab. 28 Parametre generovaného poruchového signálu

Číslo merania	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]	φ_A [°]	φ_B [°]	φ_C [°]	$I^{(2)}$ [A]
1	2,5	2,5	0	0	120	240	0,833
2	2,0	2,0	0	0	120	240	0,667
3	1,5	1,5	0	0	120	240	0,500
4	1,0	1,0	0	0	120	240	0,333
5	0,7	0,.7	0	0	120	240	0,233

Výsledky testovania ochrany pri nesymetrii pre test číslo 1 podľa Tab. 27 sú uvedené v Tab. 29; pre test číslo 2 podľa Tab. 27 sú uvedené v Tab. 30.

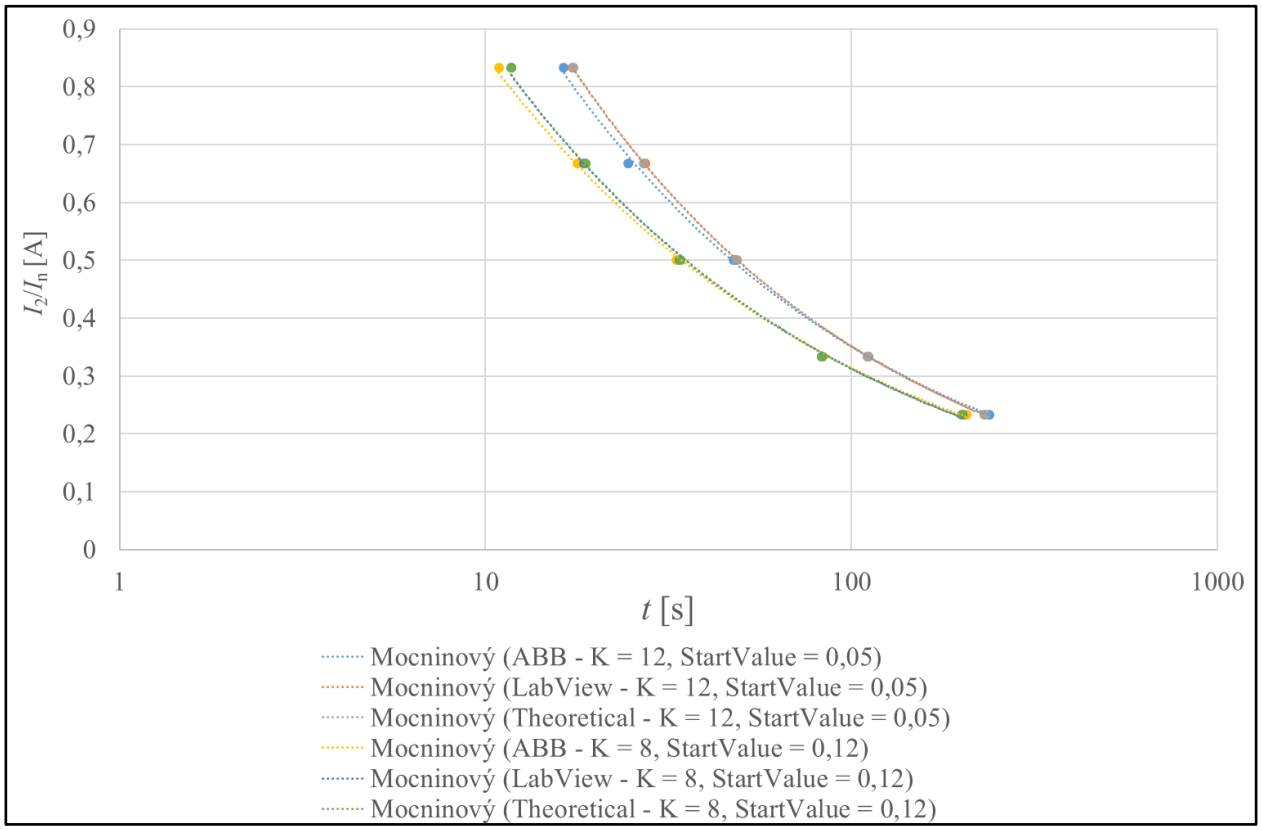
Tab. 29 Výsledky z testovania ochrany pri nesymetrii pre test číslo 1 (K = 12, StartValue = 0,05)

Číslo merania	t_{ABB} [s]	$t_{LabView}$ [s]	$t_{theor.}$ [s]	δ_{ABB} [%]	$\delta_{LabView}$ [%]
1	16,367	17,307	17,356	-6,04	-0,28
2	24,578	27,332	27,125	-10,36	0,75
3	47,733	48,587	48,485	-1,58	0,21
4	111,425	110,655	110,712	0,64	-0,05
5	237,966	231,302	231,709	2,63	-0,18

Tab. 30 Výsledky z testovania ochrany pri nesymetrii pre test číslo 2 (K = 8, StartValue = 0,12)

Číslo merania	t_{ABB} [s]	$t_{LabView}$ [s]	$t_{theor.}$ [s]	δ_{ABB} [%]	$\delta_{LabView}$ [%]
1	10,879	11,774	11,742	-7,93	0,27
2	17,798	18,584	18,735	- 5,27	- 0,82
3	33,286	33,956	34,037	- 2,26	- 0,24
4	83,309	82,911	82,862	0,56	0,06
5	206,67	200,557	200,156	3,15	0,20

Vypínacie charakteristiky pre obidve nastavenia ochrannej funkcie sú zobrazené na Obr. 94. V grafe sú vynesené vypínacie charakteristiky Central Protection Relay Model, ochrany ABB REM543 a teoretické hodnoty. Jednotlivé namerané body vypínacej charakteristiky boli pri zostavovaní vypínacej charakteristiky preložené mocninovou trendovou funkciou. Z grafu vypínacích charakteristík je možné vyhodnotiť korektnú funkciu ochranných algoritmov ochrany pri nesymetrii.



Obr. 94 Vypínacie charakteristiky ochrany pri nesymetrii

Vyhodnotenie

Testovaním bola overená korektná funkcia navrhnutého algoritmu ochrany pri nesymetrii. Vybavovacie časy Central Protection Relay Model a ochrany ABB REM 543 sú uvedené v Tab. 30. V tejto tabuľke sú uvedené aj odchýlky od teoretických hodnôt vybavovacích časov.

Maximálna odchýlka Central Protection Relay Model je 0,20 %. Pre ochranu ABB REM 543 je maximálna odchýlka 3,15 %. Z nameraných hodnôt bola zostavená vypínacia charakteristika pre obidve nastavenia ochrannej funkcie preložením nameraných hodnôt trendovou čiarou s mocninovou funkciou – zobrazená na Obr. 94 – je vidieť, že vypínacie charakteristiky modelu centrálnej ochrany a ochrany ABB REM543 sú porovnateľné s teoreticky vypočítanými hodnotami. Výsledky testovania algoritmu pri nesymetrii potvrdzujú spoľahlivosť navrhnutého algoritmu.

Neistoty navrhnutého ochranného algoritmu sú popísané v kapitole 5.5.2.

5.4.11 Diferenciálna ochrana

Pri testovaní diferenciálnej ochrany boli zariadenia zapojené podľa popisu v kapitole 5.4.2. Výsledky testovania navrhnutého algoritmu sú porovnané s výsledkami testovania ochrany ABB SPAD 346C. Pre testovanie ochrany ABB SPAD 346C bolo použité zapojenie podľa Obr. 77. Ochrana bola napájaná prostredníctvom testovacieho zariadenia OMICRON 256plus sekundárnymi hodnotami prúdov na vstupe a výstupe zariadenia. Pre test bol uvažovaný rovnaký prevod na vstupe a výstupe zariadenia a to I_n = 1A – podľa Tab. 31.

Testovanie algoritmu diferenciálnej ochrany implementovanej v Central Protection Relay Model prebiehalo podľa zapojenia na Obr. 80. Z dôvodu, že k testu bola využívaná MU a prúdový senzor ABB KECA 250B1, ktorý dosahuje presnosť až od 12,5A, boli prúdy generované z OMICRON 256plus v rozsahu primárnych hodnôt. Prevod na vstupe a výstupe chráneného zariadenia bol počas testu zhodný a to I_n = 75 – podľa Tab. 31. Pre zväčšenie rozsahu vstupných prúdov bolo použitých 10 závitov na senzore ABB KECA 250B1. Testovanie Central Protection Relay Model demonštruje možnosti spracovania signálov z dvoch nezávislých zdrojov – z OMICRON 256plus a z MU. Parametre nastavenia prevodov pre testy diferenciálnej ochrany sú uvedené v Tab. 31

Tab. 31 Parametre menovitého prúdu diferenciálnych ochrán

SPAD 346C	I_n	[A]	1
Central Protection Relay Model	I_n	[A]	75

Výpočet hodnôt s ktorými pracuje algoritmus diferenciálnej ochrany je uvedený v Tab. 32 pre jednotlivé ochrany ABB SPAD 346C a Central Protection Relay Model.

Tab. 32 Hodnoty generovaných prúdov pre testy algoritmu diferenciálnej ochrany

Testovaná ochrana	**Generovaný prúd z OMICRON 256plus**		**Veľkosť prúdu meraná senzorom ABB KECA 250B1**		**Veľkosť prúdu pre algoritmus diferenciálnej ochrany**	
	I_{1GEN}	I_{2GEN}	I_{1MER}	I_{2MER}	I_1	I_2
	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
ABB SPAD 346C	0,365	0,200			0,365	0,200
	1,635	1,200			1,635	1,200
	3,315	1,800			3,315	1,800
Central Protection Relay Model	2,73	1,5	27,3	15	0,364	0,2
	12,27	9	122,7	90	1,636	1,2
	24,87	13,5	248,7	135	3,316	1,8

Pre testovanie bola zvolená štandardná charakteristika diferenciálnej ochrany popísaná v kapitole 4.5 bez uvažovania vplyvu prúdových senzorov uvedeného v kapitole 4.5.3.

Parametre nastavenia charakteristiky pre diferenciálnu ochranu sú uvedené v Tab. 33.

Tab. 33 Nastavenie parametrov diferenciálnej ochrany

P/I_n	[%]	16
S	[%]	29
I_{2tp}/I_n	[-]	1,5

Metodika testovania diferenciálnej ochrany prebiehala jednofázovo, kedy boli nastavené prúdy na zhodnú veľkosť, čím bolo dosiahnuté, že diferenciálny prúd bol nula. Následne bol zvyšovaný jeden z prúdov po kroku 10 mA/s až kým ochrana nevybavila. Výsledky testovania diferenciálnej ochrany sú uvedené v Tab. 34.

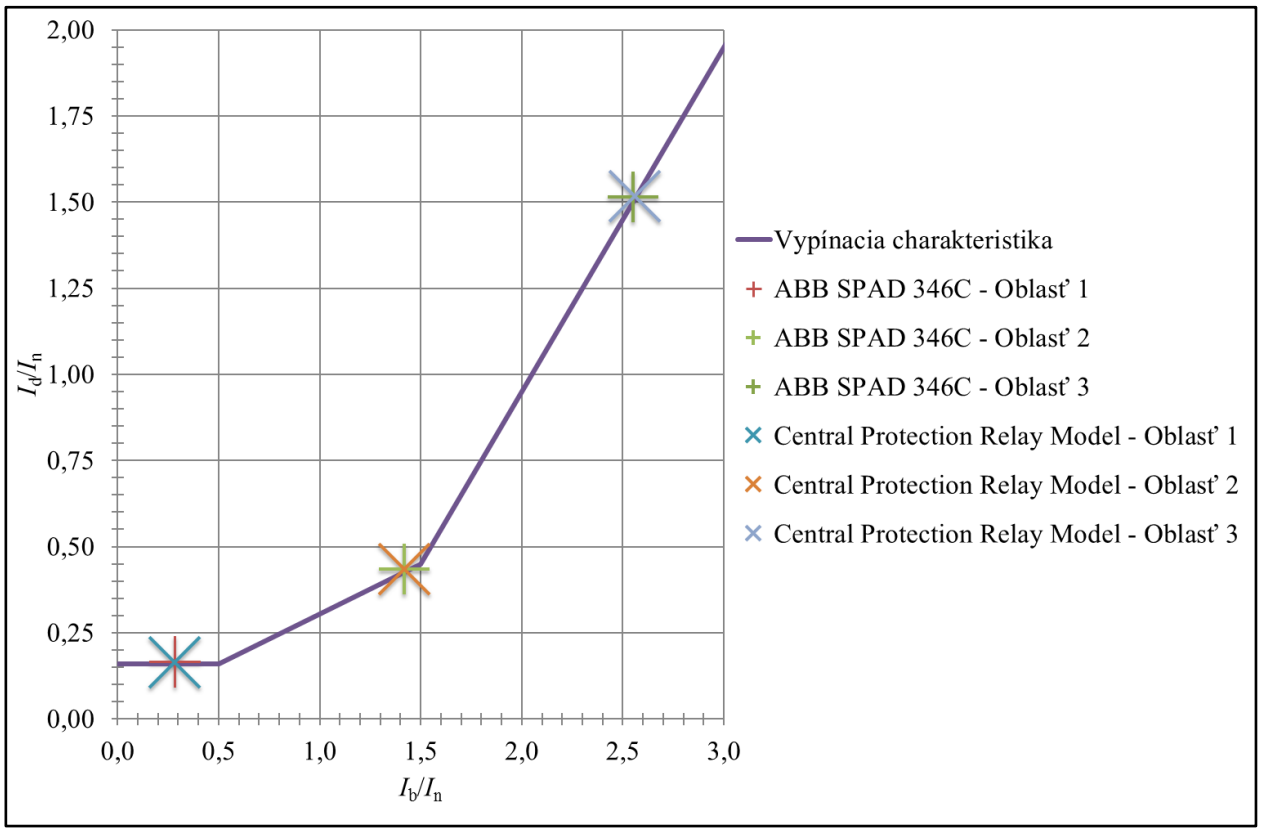
Tab. 34 Výsledky z testovania diferenciálnej ochrany

Testovaná ochrana	Hodnoty prúdov na konci testu v sekundárnych hodnotách		Súradnice nameraného bodu v priestore vypínacej charakteristiky		Súradnice bodov odpovedajúce nastaveniu ochrany		Oblasť charakteristiky
	I_1	I_2	I_{bm}/I_n	I_{dm}/I_n	I_b/I_n	I_d/I_n	
	[A]	[A]	-	-	-	-	
ABB SPAD 346C	0,365	0,200	0,2825	0,1650	0,2825	0,1600	1
	1,635	1,200	1,4175	0,4350	1,4175	0,4259	2
	3,315	1,800	2,5575	1,5150	2,5575	1,5075	3
Central Protection Relay Model	0,364	0,200	0,2820	0,1640	0,2805	0,1600	1
	1,636	1,200	1,4180	0,4360	1,4180	0,4262	2
	3,316	1,800	2,5580	1,5160	2,5580	1,5080	3

Tab. 35 Odchýlky súradníc vybavovacích bodov diferenciálnej ochrany

Oblasť charakteristiky	Odchýlka od teoretických hodnôt	
	$\delta_{LabView}$	δ_{ABB}
	[%]	[%]
1	2,44	3,03
2	2,25	2,09
3	0,53	0,50

Vypínacia charakteristika s vynesenými bodmi, kedy jednotlivé ochrany vybavili je uvedená na Obr. 95.



Obr. 95 Vypínacia charakteristika diferenciálnej ochrany

Vyhodnotenie

Výsledky testovania navrhnutého algoritmu diferenciálnej ochrany sú uvedené v Tab. 34. Z nameraných hodnôt je vidieť, že navrhnutý algoritmus vyhodnocuje poruchu správne.

Namerané hodnoty sú porovnateľné s hodnotami nameranými pri ochrane ABB SPAD 346C. Získané hodnoty pri testovaní boli porovnané s teoretickými hodnotami v Tab. 35. Maximálna odchýlka nastala v prvej oblasti – pre Central Protection Relay Model bola maximálna odchýlka 2,44 % a pre ABB SPAD 346C bola maximálna odchýlka 3,03 %.

Vzniknutá odchýlka bola spôsobená krokom zvyšovania prúdu – 10mA a taktiež možnou nepresnosťou, ktorá vznikla pri meraní primárneho prúdu prúdovým senzorom ABB KECA 250B1. Testovaním bola overená korektná funkcia navrhnutého algoritmu.

5.5 Neistoty navrhnutých algoritmov ochranných funkcií

Pri návhru ochrannej funkcie je nutné dbať aby vybavila len v prípade poruchy a zároveň aby vypínací čas ochrany bol čo najkratší. V meracích reťazcoch použitých k testovaniu modelu centrálnej ochrany Central Protection Relay Model sú použité prvky, ktoré pracujú s určitou neistotou. V uvedenej kapitole budú vyhodnotené jednotlivé prvky meracieho reťazca a ich možný vplyv na výsledky meraní vypínacích časov v Central Protection Relay Model.

V závere kapitoly je vyhodnotená neistota typu A navrhnutých ochranných algoritmov pomocou štatistického vyhodnotenia, nakoľko exaktné určenie neistoty navrhnutých ochranných algoritmov nie je možné z dôvodu, že Central Protection Relay Model pracuje pod Windows vo vývojovom prostredí LabView. Na pozadí operačného systému Windows bežia procesy, ktoré čiastočne ovplyvňujú funkcie Central Protection Relay Model, pre ďalší vývoj je uvedené možné vyriešiť použitím real-time operačného systému.

5.5.1 Vyhodnotenie neistoty jednotlivých členov meracieho reťazca

V uvedenej kapitole je kladený dôraz na rozobratie možných vplyvov jednotlivých členov meracieho reťazca pri testovaní ochranných algoritmov Central Protection Relay Model.

MU ParamMU + digitalizačný modul

Funkcia digitalizačného modulu a MU ma zásadný vplyv na funkciu ochranných algoritmov nakoľko digitalizuje analógový signál a vysiela ho vo forme SV na Ethernet. SV sú vstupnými hodnotami pre ochranný algoritmus a je z nich vyhodnocovaná RMS, prvá harmonická pomocou FFT a špičková hodnota signálu pomocou predikčného algoritmu. Následne prebieha vyhodnotenie poruchy z vypočítaných hodnôt.

V prípade, že MU a digitalizačný modul nepracujú správne a analógový signál nie je prevedený na digitálny s dostatočnou presnosťou – dochádza k odchýlke v okamžitej hodnote. Následne dochádza k odchýlke vo funkcii ochranného algoritmu, čo sa prejaví oneskoreným vypínacím časom. Použitá MU pracuje s presnosťou 0,2. V kapitole 5.6 bolo určené oneskorenie 500 µs –> za túto dobu je meraná hodnota k dispozícii v cieľovej aplikácii.

ABB KECA 250B1

Pri testovaní funkcie ochranných algoritmov je použitý prúdový senzor ABB KECA 250B1, ktorý dosahuje triedu presnosti 0,5 pre meracie funkcie v rozsahu od 5% menovitého primárneho prúdu až po menovitý trvalý tepelný prúd. Pre dynamické merania prúdu (ochranné funkcie) splňuje požiadavky pre ochrannú triedu 5P v rozsahu do menovitého krátkodobého tepelného prúdu.

Presnosť senzora má vplyv na okamžitú hodnotu meranej veličiny, čo sa prejaví aj na funkcii ochranného algoritmu – dochádza k nepresnosti amplitúdy a fázy meraného signálu. Ochranný algoritmus následne pracuje s chybnou hodnotou a dochádza k chybe vypínacieho času.

OMICRON 256plus

Ako zdroj bol použitý OMICRON 256plus, ktorý umožňuje generovať analógový signál ale taktiež aj digitálny signál vo forme SV podľa IEC 61850-9-2. Presnosť testovacieho zdroja je definovaná výrobcom [35] ako

- <0,015% rd. + 0,005% rg. pre 0 ... 12,5A,
- <0,04% rd. + 0,01% rg. pre 0 ... 12,5A.

Pre minimalizovanie chyby bolo testovacie zariadenie pred testami kalibrované výrobcom. Presnosť generovaného signálu z OMICRON 256plus je lepšia ako presnosť jednotlivých zariadení, ktorým tento signál je ďalej spracovávaný. Neistota merania spôsobená použitím testovacieho zariadenia OMICRON 256plus je nízka.

OMICRON CMGPS588

Podľa [37] GPS OMICRON CMGPS588 poskytuje presnosť časovej synchronizácie +/- 100 ns. Výpadok časovej synchronizácie neumožňuje spracovávanie viacerých signálov v Central Protection Relay Model. Nakoľko nie je zaručené, že budú vyhodnocované SV z rovnakého časového okamihu pre jednotlivé signály.

Bez časovej synchronizácie je možné testovať ochranný algoritmus spracovávajúci signál z jednej MU, kedy je vyhodnocovaná doba od vzniku poruchy po prijatie vypínacieho signálu od ochrany. V reálnej prevádzke je časová synchronizácia nutná pre použitie chrániaceho systému využívajúceho IEC 61850-9-2 SV z viacerých zdrojov.

PoE Injector TL-POE150S

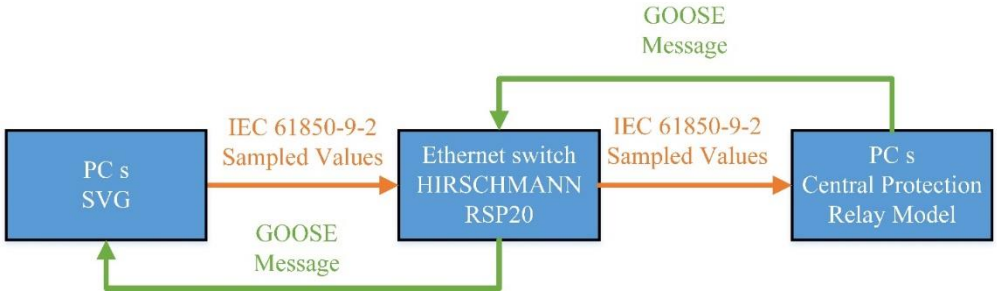
Použitá MU je napájaná prostredníctvom Ethernetu pomocou zariadenia PoE Injector, ktoré nemá vplyv na presnosť ochranného algoritmu.

Ethernet switch HIRSCHMANN RSP20

Ethernetový switch slúži pre prepojenie jednotlivých zariadení v meracom reťazci. Pre testy je použitý priemyselný switch od firmy HIRSCHMANN. Vplyv Ethernetového switcha na ochranný algoritmus sa môže prejavovať vo forme časového oneskorenia dostupnosti SV na vstupe ochranného algoritmu a taktiež pri prenose vypínacieho signálu vo forme GOOSE správy z Central Protection Relay Model k vyhodnocovaciemu zariadeniu – OMICRON 256plus, PC s SVG. Réžia prenosu SV od Ethernetového switcha do aplikácie SVA predstavuje hodnotu približne 40 µs.

5.5.2 Vyhodnotenie neistoty navrhnutých ochranných algoritmov

Nakoľko nie je možné exaktne určiť neistotu software bežiaceho na operačnom systéme Windows bola zvolená štatistická metóda pre vyhodnotenie neistoty typu A navrhnutých algoritmov. Pre jednotlivé ochranné algoritmy bolo nameraných 1000 vypínacích časov pomocou dvoch počítačov a software SVG. Počítače boli medzi sebou prepojené Ethernetovým switchom HIRSCHMANN RSP20, čím bolo zároveň do vyhodnotenia neistoty zahrnuté časové oneskorenie SV spôsobené Ethernetovým switchom.



Obr. 96 Bloková schéma pre testovanie neistoty navrhnutých ochranných algoritmov

Pre jednotlivé ochranné algoritmy bolo vykonaných 1000 opakovaní, kedy bola simulovaná porucha a zaznamenával sa vypínací čas ochrany. Signál bol generovaný pomocou PC so software SVG a prenášaný prostredníctvom Ethernetu vo forme SV na PC s Central Protection Relay Model. Čas vygenerovania poruchového signál, bol zaznamenaný priamo v SVG. Následne ochranný

algoritmus v Central Protection Relay Model spracoval signál, vyhodnotil poruchu a poslal vypínací signál vo forme GOOSE správy na Ethernet. Čas prijatia GOOSE správy bol následne zaznamenaný pomocou SVG. Rozdiel medzi časom vygenerovania poruchového signálu a časom prijatia GOOSE správy je uvažovaný ako celkový vypínací čas navrhnutého ochranného algoritmu Central Protection Relay Model. V rámci merania je uvažované aj časové oneskorenie prenosu spôsobené zaradením Ethernetového switcha.

Gaussove rozdelenie pravdepodobnosti

Medzi najdôležitejšie rozloženia spojitého typu patrí Gaussove rozdelenie pravdepodobnosti – nazývané taktiež Normálne rozdelenie pravdepodobnosti [40].

Definícia Gaussovho rozdelenie pravdepodobnosti No (μ, σ^2) – náhodná veličina x má normálne rozdelenie s parametrami μ a σ^2, kde $-\infty < \mu < \infty$ a $\sigma^2 > 0$, ak jej hustota pravdepodobnosti je [40]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\cdot\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\cdot\sigma^2}\right]}, \quad -\infty < x < \infty \tag{45}$$

Hustota pravdepodobnosti $f(x)$ je symetrická podľa priamky $x = \mu$ a jej tvar závisí na parametri σ^2.

Pre kvalifikované zhodnotenie chyby navrhnutých ochranných algoritmov bolo vykonaných 1000 meraní pre každé nastavenie ochrannej funkcie. Následne boli namerané hodnoty spracované pomocou Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti. Z grafu hustoty Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti je možné stanoviť chybu vypínacieho času navrhnutých ochranných algoritmov.

Mžiková nadprúdová ochrana

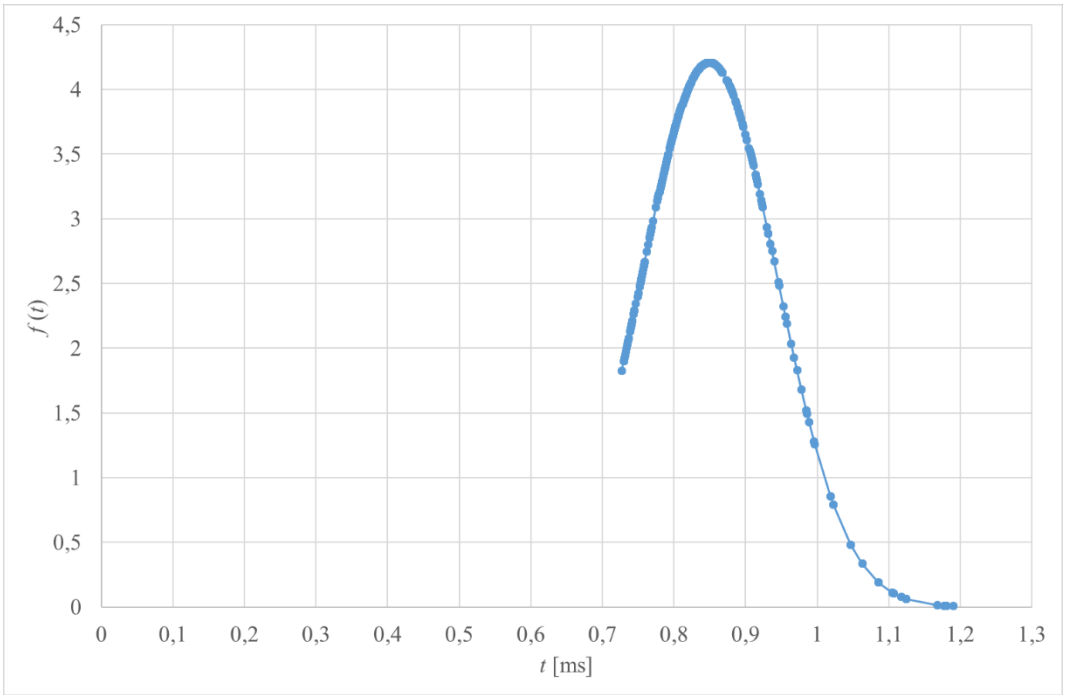
Pre algoritmus mžikovej nadprúdovej ochrany pre nastavenie podľa testu číslo 1 z kapitoly 5.4.5 bolo vykonaných 1000 meraní vypínacieho času. Po spracovaní nameraných hodnôt vypínacích časov bol zostavený graf hustoty Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti pre vypínacie časy mžikovej nadprúdovej ochrany – Obr. 97.

Z nameraných hodnôt bola vypočítaná stredná hodnota Gaussovho rozdelenia a smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia – Tab. 36. Tieto hodoty definujú interval, v ktorom sa nachádza 68% vypínacích časov.

Na základe nameraných hodnôt vypínacích časov dochádza u algoritmu mžikovej nadprúdovej ochrany k oneskoreniu vypínacieho času o 0,8496 ms. Za ideálny stav je považovaný vypínací čas 0 ms, ktorý však nie je možné u žiadnej ochrany dosiahnuť z dôvodu nutných procesov pri spracovaní SV a vyhodnocovaní poruchového stavu.

Tab. 36 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – mžiková nadprúdová ochrana

Číslo testu	Stredná hodnota Gaussovho rozdelenia	Smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia
[-]	μ [ms]	σ [ms]
1	0,85	0,095



Obr. 97 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – mžiková nadprúdová ochrana

Časovo nezávislá nadprúdová ochrana

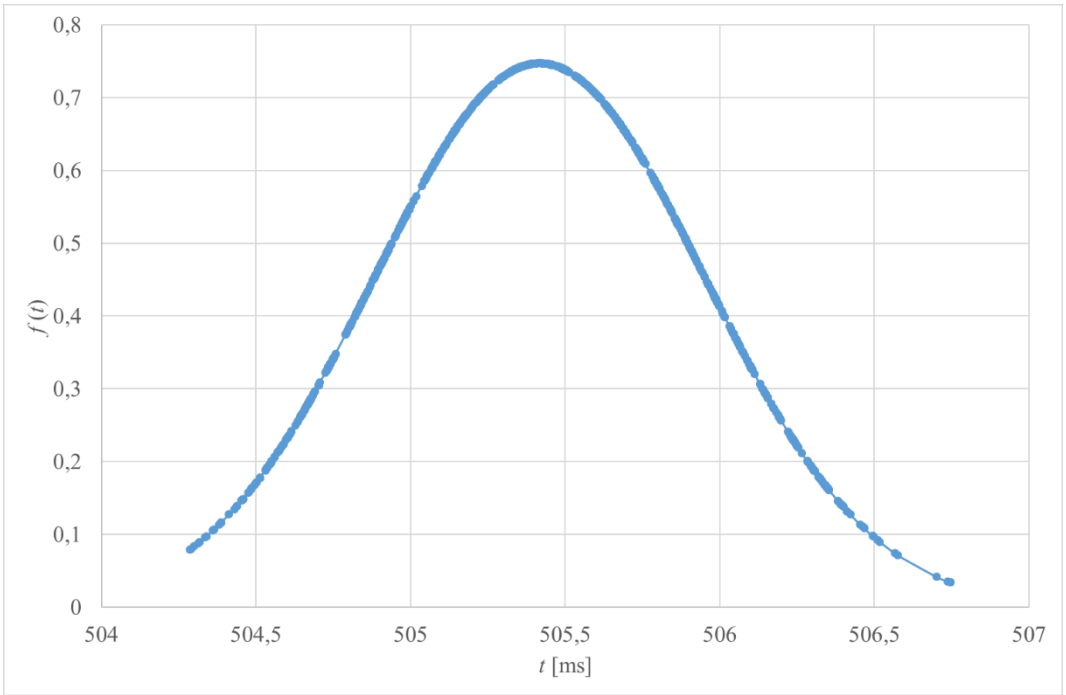
Pre algoritmus časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre nastavenie podľa testu číslo 1 a 2 z kapitoly 5.4.6 bolo vykonaných 1000 meraní vypínacieho času. Po spracovaní nameraných hodnôt vypínacích časov boli zostavené grafy hustoty Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti pre vypínacie časy časovo nezávislej nadprúdovej ochrany – Obr. 98 a Obr. 99.

Z nameraných hodnôt bola vypočítaná stredná hodnota Gaussovho rozdelenia a smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia – Tab. 37. Tieto hodoty definujú interval, v ktorom sa nachádza 68% vypínacích časov.

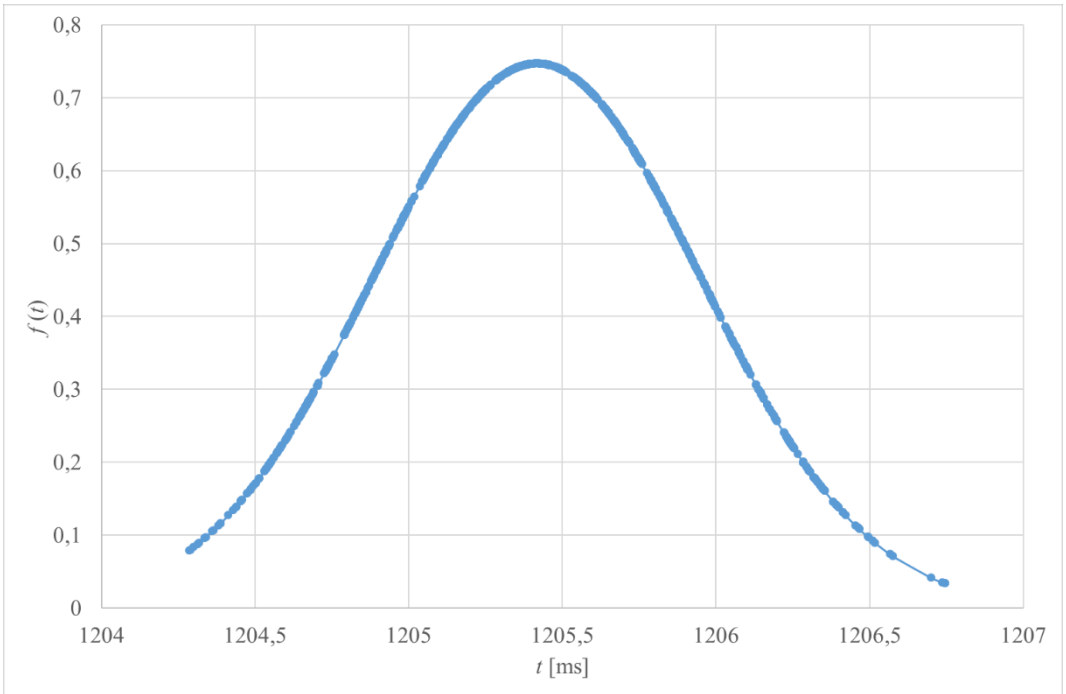
Teoretický vypínací čas algoritmu časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre test číslo 1 je 500 ms a pre test číslo 2 je 1200 ms. Pre obidva testy vychádza odchýlka oproti teoretickým hodnotám 5,4 ms. Táto odchýlka je spôsobená procesmi pri spracovaní hodnôt v algoritme. Z nameraných hodnôt je vidieť, že odchýlka je konštantná pre rozdielne nastavenia a je ju možné kompenzovať interne v algoritme.

Tab. 37 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo nezávislá nadprúdová ochrana

Číslo testu	Stredná hodnota Gaussovho rozdelenia	Smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia
[-]	μ [ms]	σ [ms]
1	505,42	0,534
2	1205,42	0,534



Obr. 98 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo nezávislá nadprúdová ochrana (test číslo 1)



Obr. 99 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo nezávislá nadprúdová ochrana (test číslo 2)

Časovo závislá nadprúdová ochrana

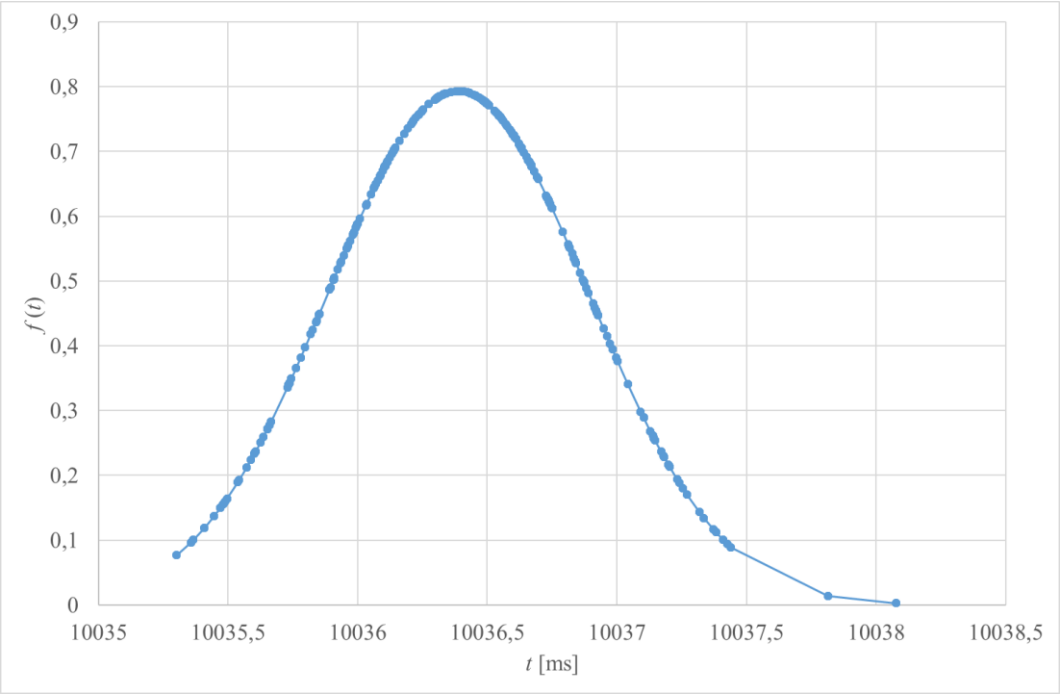
Pre algoritmus časovo nezávislej nadprúdovej ochrany pre nastavenie podľa testu číslo 1 z kapitoly 5.4.7 bolo vykonaných 1000 meraní vypínacieho času. Po spracovaní nameraných hodnôt vypínacích časov boli zostavené grafy hustoty Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti pre vypínacie časy časovo závislej nadprúdovej ochrany – Obr. 100, Obr. 101, Obr. 102, Obr. 103, Obr. 104, Obr. 105, Obr. 106, Obr. 107 a Obr. 108.

Z nameraných hodnôt bola vypočítaná stredná hodnota Gaussovho rozdelenia a smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia –Tab. 38. Tieto hodoty definujú interval, v ktorom sa nachádza 68% vypínacích časov.

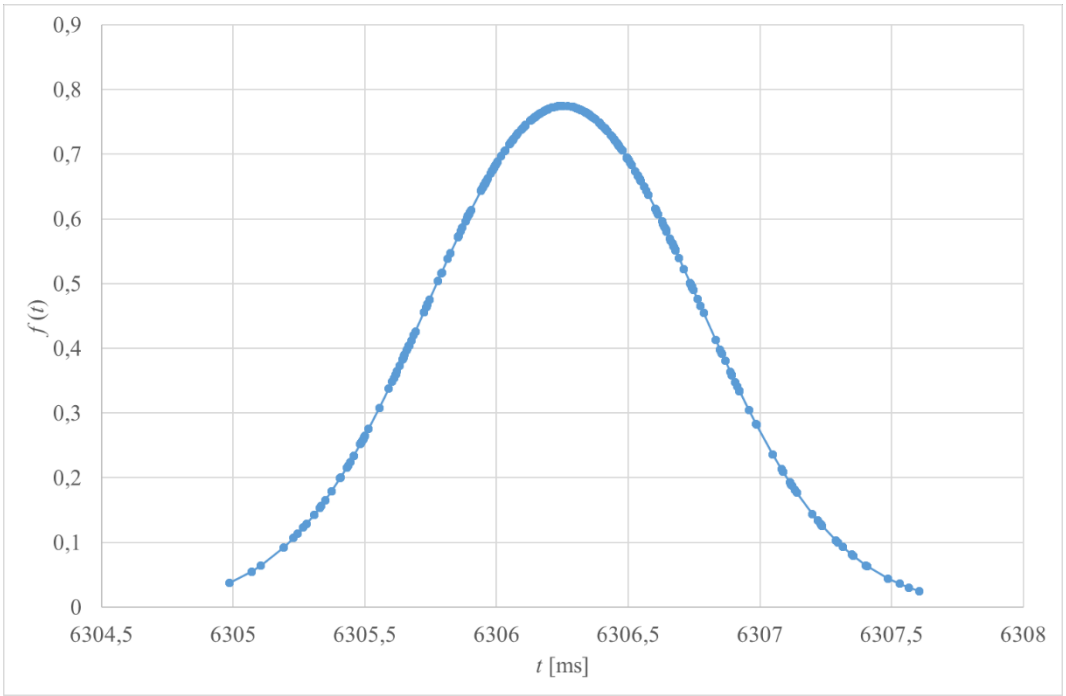
Teoretické hodnoty vypínacích časov pre test číslo 1 časovo závislej nadprúdovej ochrany sú uvedené v Tab. 17. Na základe nameraných hodnôt vypínacích časov je určená stredná hodnota Gaussovho rozdelenia, kde je vidieť, že dochádza k odchýlke oproti teoretickým vypínacím časom v rozsahu 2-6 ms.

Tab. 38 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana

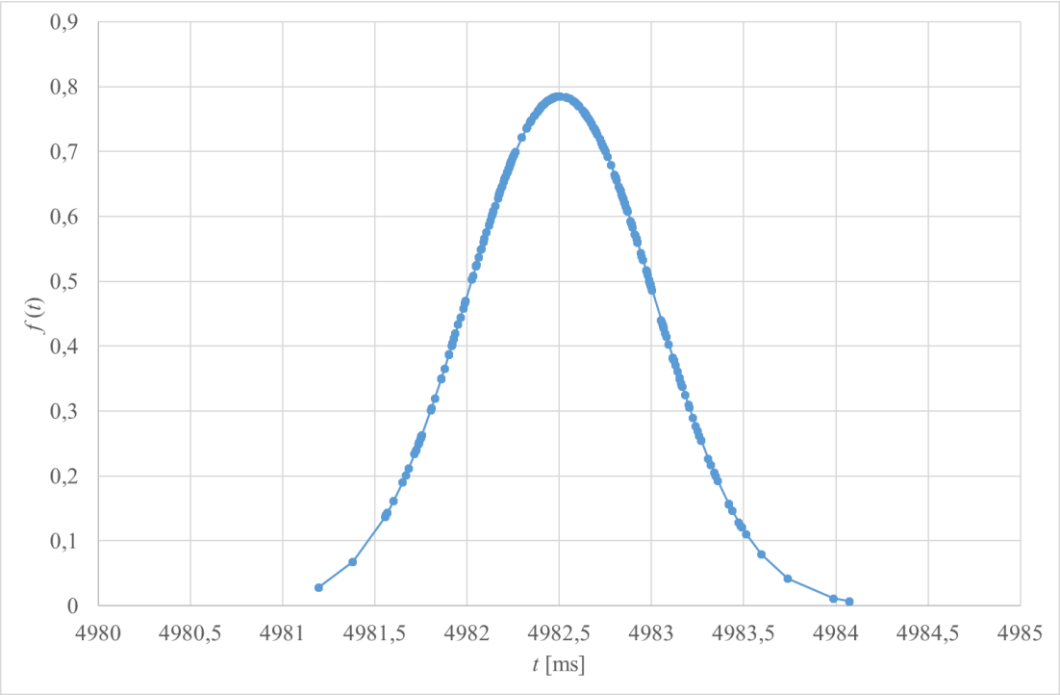
RMS	Stredná hodnota Gaussovho rozdelenia	Smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia
[A]	μ [ms]	σ [ms]
2	10036,39	0,503
3	6306,26	0,515
4	4982,51	0,508
5	4282,32	0,482
6	3839,02	0,539
7	3529,76	0,493
8	3298,54	0,497
9	3117,56	0,499
10	2972,37	0,525



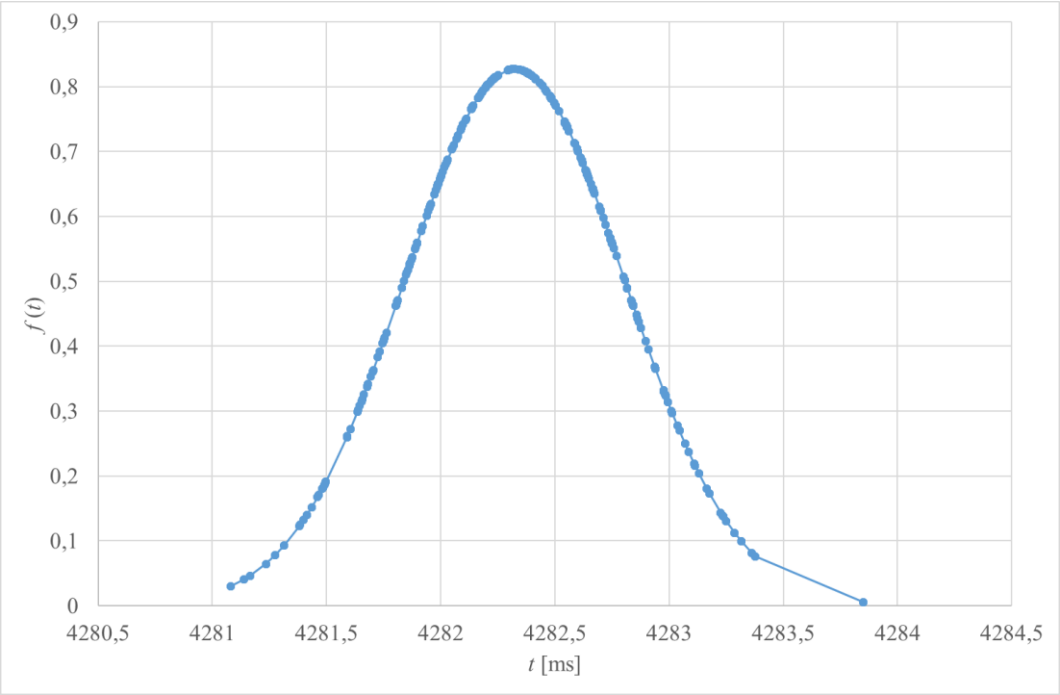
Obr. 100 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 2 A)



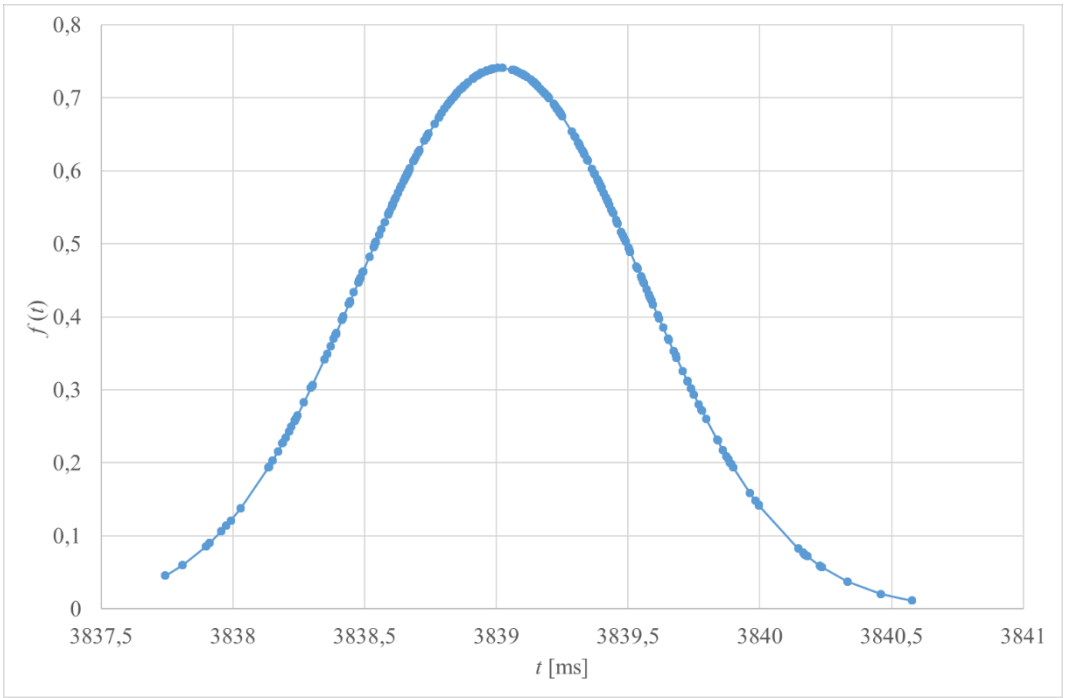
Obr. 101 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 3 A)



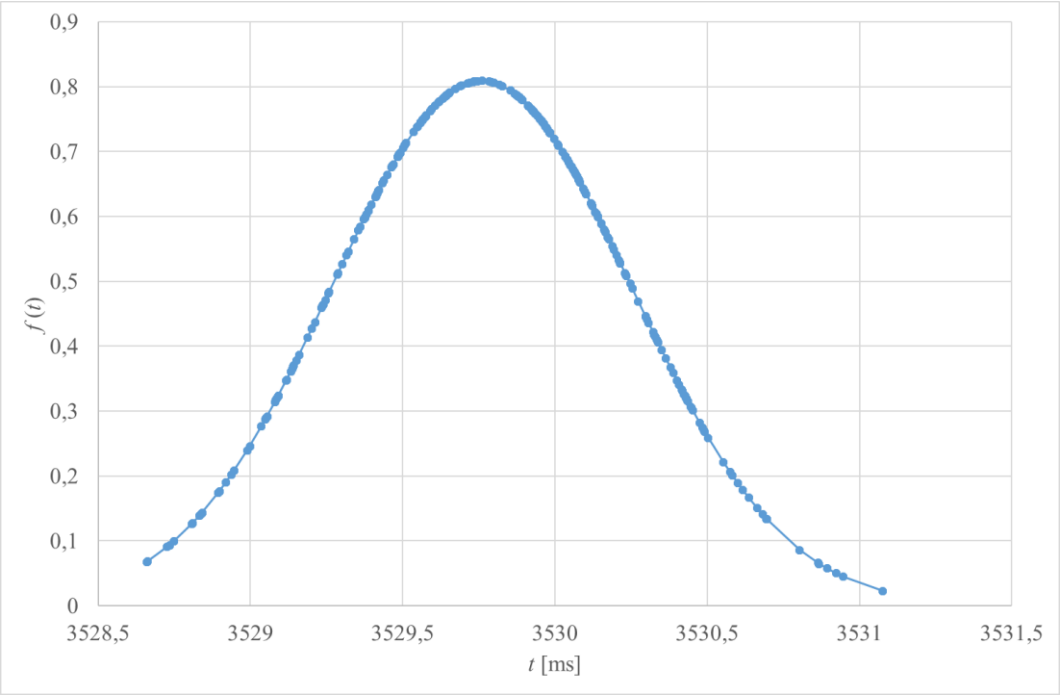
Obr. 102 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 4 A)



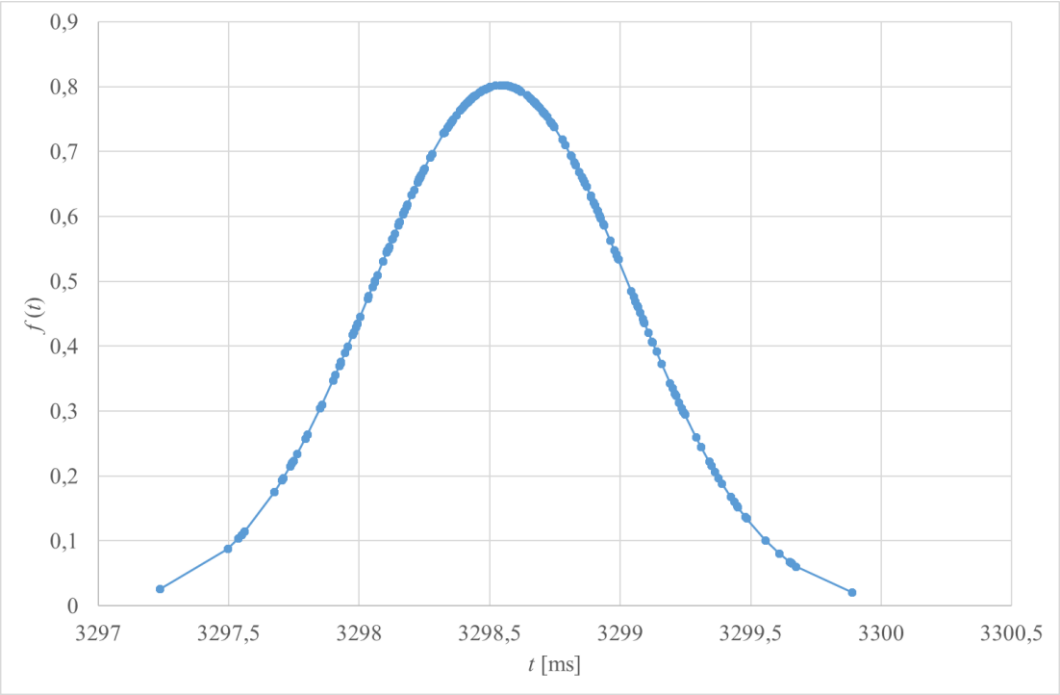
Obr. 103 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 5 A)



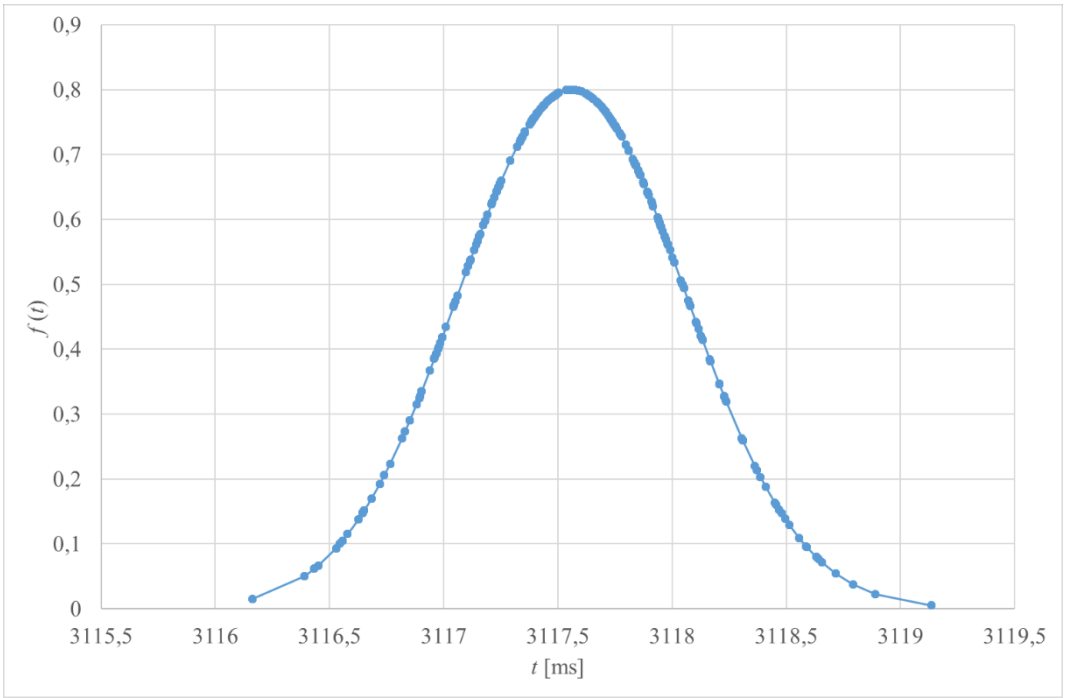
Obr. 104 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 6 A)



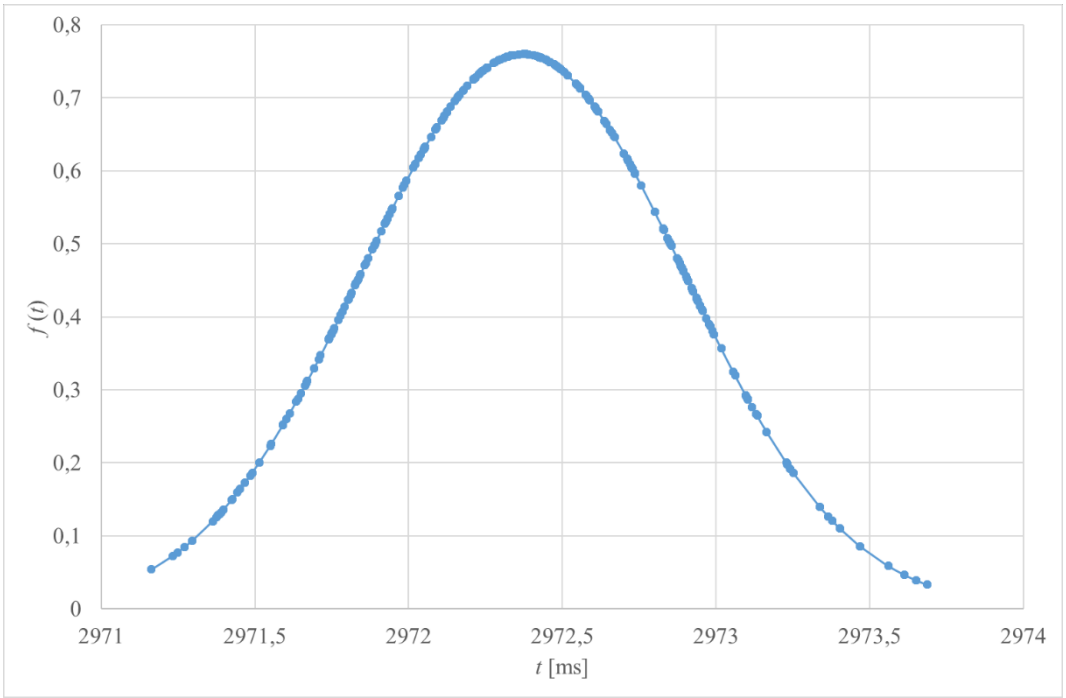
Obr. 105 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 7 A)



Obr. 106 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 8 A)



Obr. 107 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 9 A)



Obr. 108 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – časovo závislá nadprúdová ochrana (RMS generovaného signálu 10 A)

Smerové relé pre časovo závislú/nezávislú nadprúdovú ochranu

Smerové relé pracuje s fázormi prúdu a napätia v jednotlivých fázach. Spoľahlivosť algoritmu závisí na správnom vyhodnotení fázy pomocou FFT, čo je ovplyvnené najmä presnosťou vstupných hodnôt. Tie môžu byť ovplyvnené testovacím zariadením OMICRON 256plus ale aj použitými prúdovými a napäťovými senzormi. Meraný signál zo senzorov je digitalizovaný v MU, ktorej trieda presnosti má vplyv na presnosť vstupných hodnôt ochranného algoritmu.

Logická ochrana prípojníc

Logická ochrana prípojníc pracuje na princípe algoritmu časovo nezávislej nadprúdovej ochrany. Z tohto dôvodu je možné uvažovať zhodnú neistotu pre vypínací čas ako pre časovo nezávislú nadprúdovú ochranu.

Ochrana pri nesymetrii

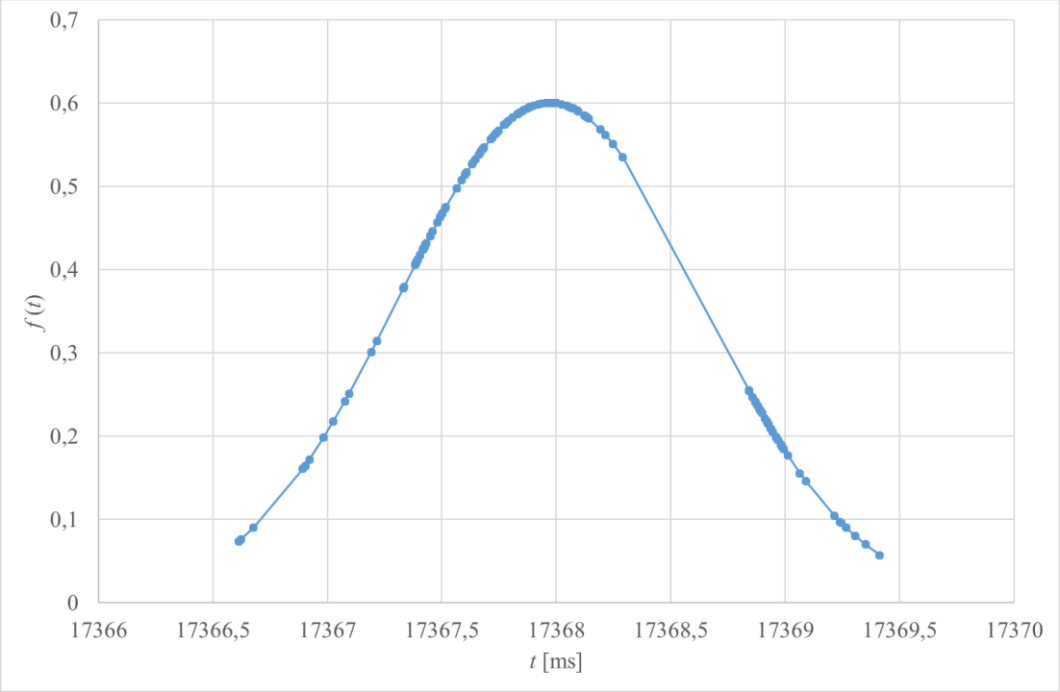
Pre algoritmus ochrany pri nesymetrii pre nastavenie podľa testu číslo 1 z kapitoly 5.4.7 bolo vykonaných 1000 meraní vypínacieho času. Po spracovaní nameraných hodnôt vypínacích časov boli zostavené grafy hustoty Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti pre vypínacie časy ochrany pri nesymetrii – Obr. 109, Obr. 110, Obr. 111, Obr. 112 a Obr. 113.

Z nameraných hodnôt bola vypočítaná stredná hodnota Gaussovho rozdelenia a smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia – Tab. 39. Tieto hodoty definujú interval, v ktorom sa nachádza 68% vypínacích časov.

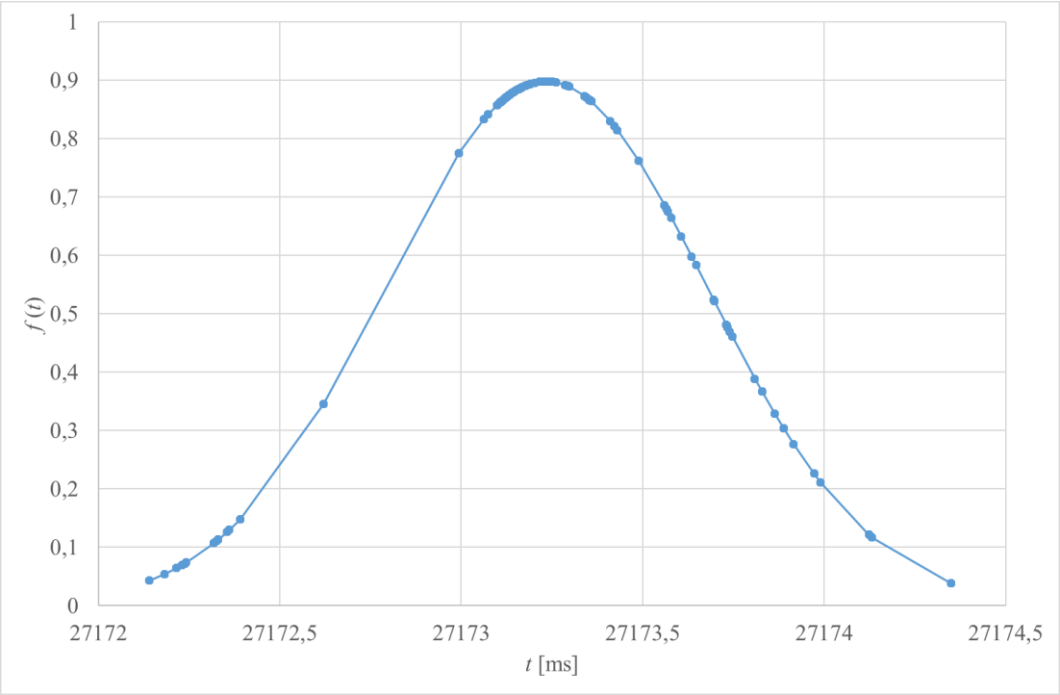
Na základe nameraných hodnôt bola určená stredná hodnota Gaussovho rozdelenia, ktorá predstavuje priemerný vypínací čas. Teoretické hodnoty sú uvedené v Tab. 29. Algoritmus ochrany pri nesymetrii musí vyhodnocovať prvú harmonickú pomocou FFT a určiť spätnú zložku prúdu, čo predstavuje zložitejšie procesy vyhodnotenia vstupných hodnôt z čoho plynú vyššie nároky na výpočtový čas algoritmu.

Tab. 39 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii

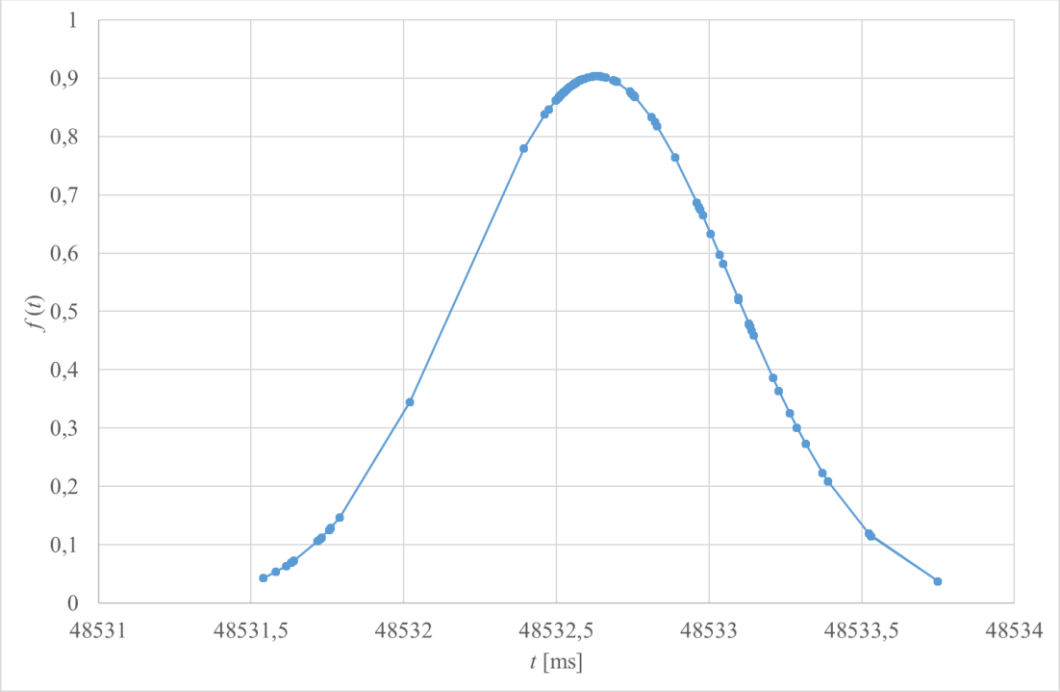
Číslo merania	Stredná hodnota Gaussovho rozdelenia	Smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia
[-]	μ [ms]	σ [ms]
1	17367,97	0,665
2	27173,23	0,444
3	48532,63	0,442
4	110566,20	0,446
5	231563,96	0,665



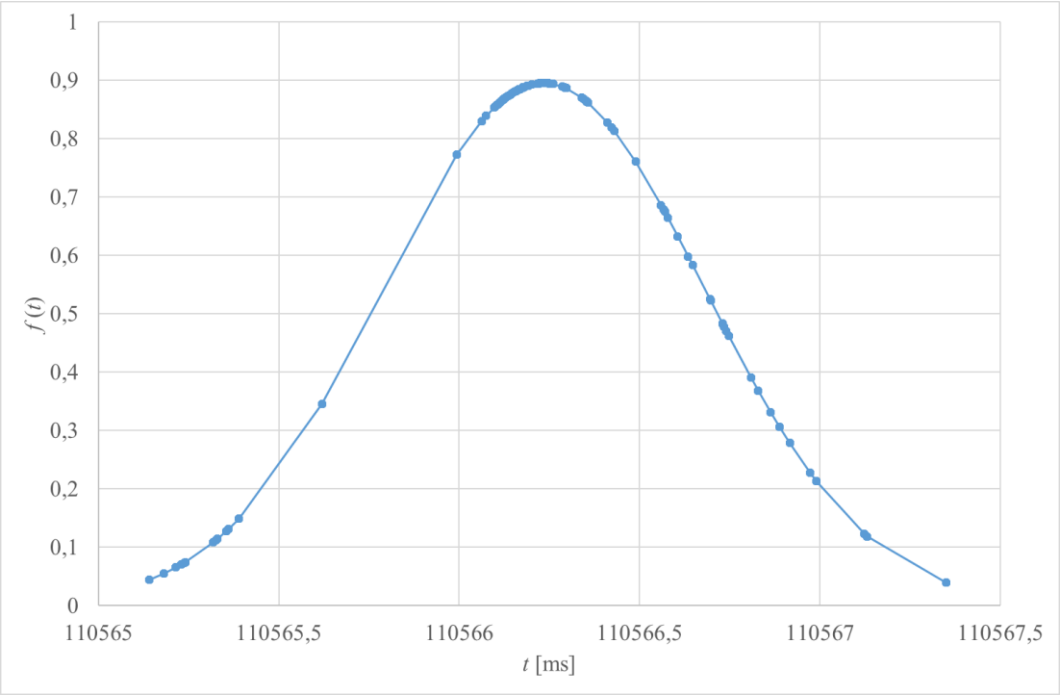
Obr. 109 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 1)



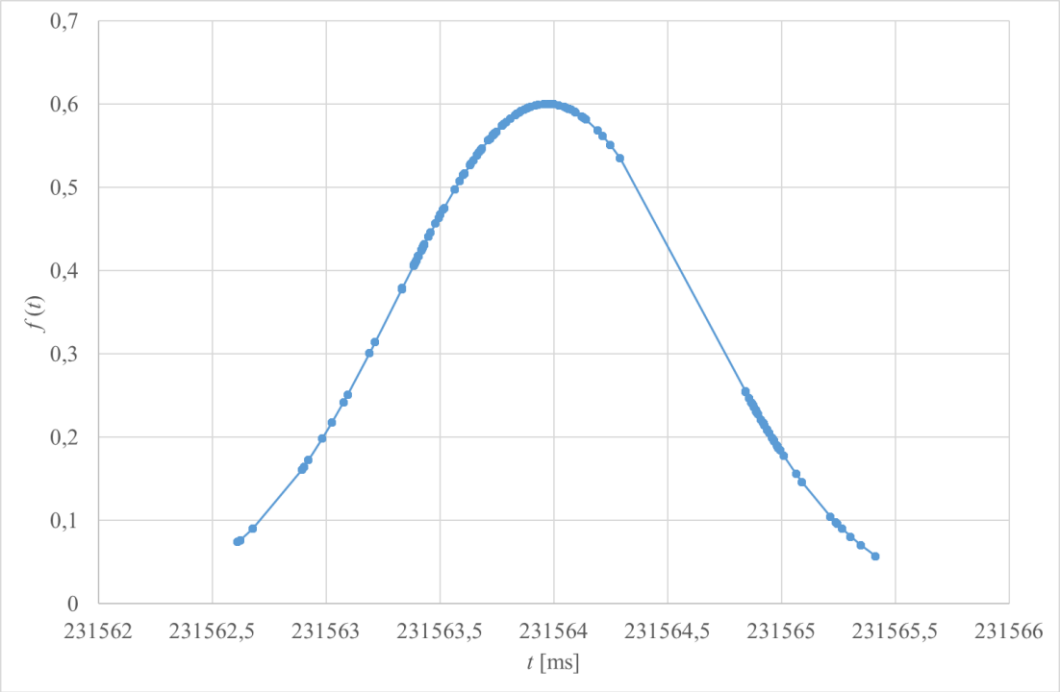
Obr. 110 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 2)



Obr. 111 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 3)



Obr. 112 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 4)



Obr. 113 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – ochrana pri nesymetrii (meranie číslo 5)

Diferenciálna ochrana

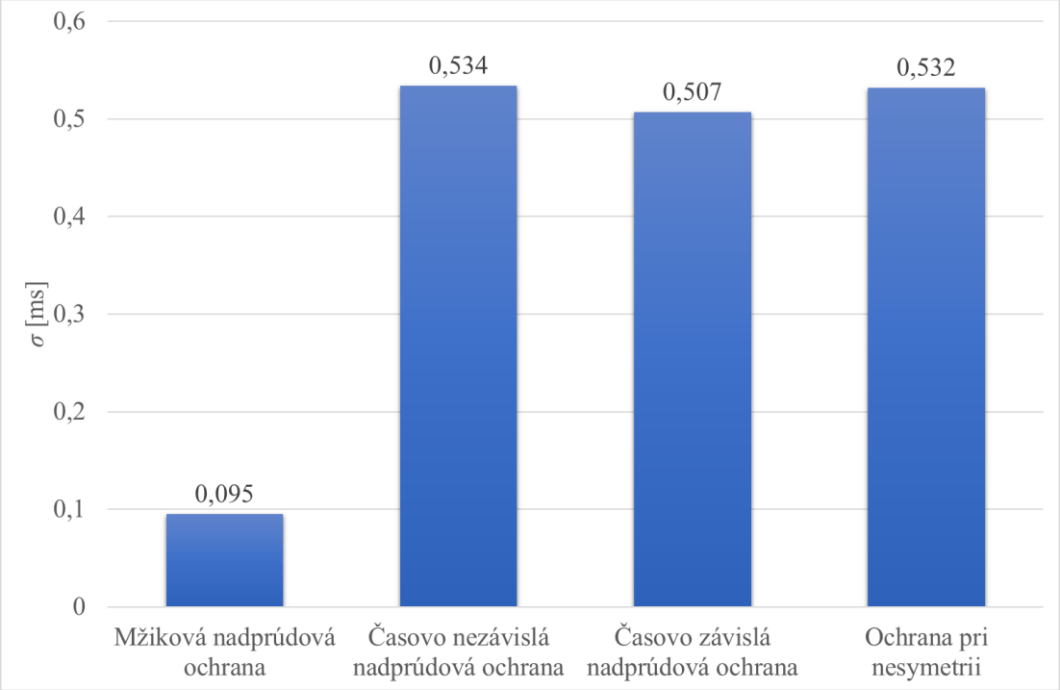
Neistota diferenciálnej ochrany závisí na správnom vyhodnotení harmonických zložiek signálu, ktoré sú vyhodnocované pomocou FFT. Presnosť vstupných hodnôt SV závisí na neistote použitého testovacieho zariadenia – OMICRON 256plus. Taktiež sú hodnoty ovplyvnené presnosťou napäťových a prúdových senzorov a taktiež triedou presnosti použitej MU.

Zhrnutie

Na základe nameraných vypínacích časov jednotlivých ochranných algoritmov je vyhodnotená ich priemerná smerodajná odchýlka v závislosti na použitej meracej funkcii. Priemerné smerodajné odchýlky pre jednotlivé algoritmy sú uvedené v Tab. 40 a vynesené v stĺpcovom grafe na Obr. 114. Najnižšia priemerná smerodajná odchýlka (0,095 ms) je u mžikovej nadprúdovej ochrany, ktorá k spracovaniu okamžitých hodnôt využíva predikčný algoritmus. Ochranné algoritmy – časovo nezávislá nadprúdová ochrana, časovo závislá nadprúdová ochrana a ochrana pri nesymetrii – využívajú meracie funkcie RMS a FFT, čo spolu so zložitejším algoritmom spôsobuje zvýšenie priemernej smerodajnej odchýlky na 0,5 ms. Naprogramované algoritmy neobsahujú vnútornú kompenzáciu oneskorenia vypínacieho času oproti prednastavenej hodnote. Jej implementovaním je možné znížiť odchýlku vypínacieho času oproti prednastavenej hodnote u časovo nezávislej nadprúdovej ochrany, časovo závislej nadprúdovej ochrany a ochrany pri nesymetrii.

Tab. 40 Priemerné smerodajné odchýlky vypínacích časov navrhnutých ochranných algoritmov

Ochranný algoritmus	Použitá meracia funkcia	σ [ms]
Mžiková nadprúdová ochrana	Predikčný algoritmus	0,095
Časovo nezávislá nadprúdová ochrana	Efektívna hodnota - RMS	0,534
Časovo závislá nadprúdová ochrana	Efektívna hodnota - RMS	0,507
Ochrana pri nesymetrii	Rýchla Fourierova Transformácia - FFT	0,532



Obr. 114 Priemerné smerodajné odchýlky vypínacích časov navrhnutých ochranných algoritmov

5.6 Testy kompatibility MU

V rámci testovania prebehol test pre zistenie oneskorenia doručenia hodnôt z MU do nadradeného systému. Porovnaním časovej značky priradenej hodnote v MU a okamžiku, kedy táto hodnota bola prijatá, je určené oneskorenie prenosu. V prípade nulového fázového posunu hodnota vyjadruje celkové oneskorenie meracieho reťazca.

Pre testovanú konfiguráciu (zapojenie podľa popisu v kapitole 5.4.2) s využitím programu Sampled Value Analyser bolo určené oneskorenie 500 µs –> za túto dobu je meraná hodnota k dispozícii v cieľovej aplikácii. V tejto hodnote je zahrnutá réžia spracovania v MU, topológia Ethernetovej siete a vlastnosti použitého prijímača dát. Taktiež bola zmeraná réžia prenosu od Ethernetového switcha do aplikácie SVA, ktorá predstavuje hodnotu približne 40 µs. Testy preukázali, že MU pracuje korektne a splňuje predpokladané parametre. Celková doba oneskorenia je limitnou hodnotou pre reakciu ochrannej funkcie, ktorá bude MU využívať, v tomto prípade Central Protection Relay Model.

5.7 Test kapacity Ethernetu pre IEC 61850-9-2 SV

Štandard IEC 61850 používa Ethernet ako fyzickú komunikačnú vrstvu a TCP/IP ako komunikačný protokol. Je nutné uvažovať kapacitu Ethernetu pre prenos IEC 61850-9-2 SV. Základným predpokladom je použitie Ethernetu s rýchlosťou 100 Mb/s.

Štandard IEC 61850-9-2 definuje dve vzorkovacie frekvencie pre rôzne použitia:

- Ochranné funkcie – 80 vzoriek na periódu, jeden set vzoriek je poslaný v rámci jednej SMV správy
- Meracie funkcie – 256 vzoriek na periódu, 8 setov vzoriek je poslaných v rámci jednej SMV správy

Výpočet kapacity siete je realizovaný pre ochranné funkcie – 80 vzoriek na periódu – a sieť s frekvenciou 50 Hz. Výpočet periódy pre jednu vzorku

$$f_{\text{sample}} = 80 \cdot 50 = 4000\ \text{Hz} = 4\ \text{kHz} \Rightarrow T = \frac{1}{4000} = 0{,}00025\ \text{s} = 250\ \mu\text{s} \tag{46}$$

SMV rámec je definovaný ako štyri prúdy – i_A, i_B, i_C, i_0 a štyri napätia – u_A, u_B, u_C, u_0. Jeden SMV rámec má veľkosť 160 B = 1280 b, čo predstavuje objem dát potrebný pre prenos jednej hodnoty z každej veličiny. Pri uvažovaní potrebného prenosu z jednej MU – štyri prúdy a štyri napätia – je potrebná kapacita siete

$$80 \cdot 50 \cdot 1280 = 5120000\,\text{b/s} = 5{,}12\,\text{Mb/s}\,. \tag{47}$$

Po zhodnej Ethernetovej sieti sú vysielané aj GOOSE správy, ktorých prenos je pri výpočte maximálneho počtu SV nutné uvažovať.

Základne predpoklady, ktoré sú uvažované pre ďalší výpočet:

- Maximálny čas pre správu definovaný podľa [41] = 1s => 1 správa za 1s
- Jedna udalosť v rámci rozvodne = pošlú sa 4 správy za 1s
- Jeden DataSet, kde je 10 signálov/dát
- Jeden GOOSE rámec ma veľkosť 200B = 1600 b

Kapacita siete potrebné pre posielanie GOOSE správ s uvažovaním predpokladov je

$$4 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 1600 = 64000\,\text{b/s} = 0{,}64\,\text{Mb/s} \tag{48}$$

Pri dizajnovaní siete a jej kapacity je potrebné uvažovať prenos GOOSE správ a zároveň aj SV. Všeobecným pravidlom je rezervovanie polovice kapacity 100 Mb/s siete (50Mb/s) pre vysielanie MMS telegramov medzi zariadenia v sieti, SCADA systém a GOOSE správy – udalosti v rozvodni zdieľané medzi zariadeniami pre ovládanie, blokovanie.

Maximálny počet vysielačov IEC 61850-9-2 SV v prípade PRP zapojenia je

$$\frac{50}{5{,}21} = 9{,}76 \tag{49}$$

Maximálny počet vysielačov IEC 61850-9-2 SV v prípade HSR zapojenia je

$$\frac{50}{2 \cdot 5{,}21} = 4{,}88\,, \tag{50}$$

Pri uvažovaní polovičnej kapacity 100Mb/s siete len pre SV a GOOSE správy je maximálny počet vysielačov IEC 61850-9-2 SV – 9. Pri uvažovaní polovičnej kapacity 100Mb/s siete len pre SV je maximálny počet vysielačov IEC 61850-9-2 SV – 4.

Overenie výpočtu maximálneho počtu vysielačov SV prebehlo pomocou software SVG a Central Protection Relay Model. V generátore IEC 61850-9-2 SV bol postupne zvyšovaný počet vysielačov až do okamžiku kedy model centrálnej ochrany v LabView nebol schopný korektnej funkcie.

Výsledkom testovania bol potvrdený výpočet maximálneho počtu 9 vysielačov IEC 61850-9-2 pre Ethernetovú sieť s kapacitou 100Mb/s. Pri reálnej aplikácii je nutné uvažovať, že sieť je využívaná aj pre ďalšie aplikácie. Pre korektnú funkciu a zvyšovanie počtu vysielačov IEC 61850-9-2 SV je odporúčané použiť sieť s kapacitou 1 Gb/s, kedy sa 10 násobne zvýši počet možných vysielačov IEC 61850-9-2 SV v sieti.

5.8 Test spracovania IEC 61850-9-2 SV v LabView

Vyvinutý model centrálnej ochrany Central Protection Relay Model je schopný spracovávať dáta z Ethernetu v reálnom čase podľa štandardu IEC 61850-9-2. Model je schopný prijímať hodnoty pre rozvodňu pozostávajúcu zo štyroch odbočiek. Počet odbočiek je limitovaný výkonom použitého hardware. Nakoľko LabView beží pod operačným systémom Windows, výpočtový výkon počítača je využívaný aj na ďalšie procesy bežiace v pozadí.

Príjem hodnôt zo štyroch zdrojov je maximálnym počtom, pri ktorom je možné zabezpečiť správnu funkciu spracovávania dát v LabView. Počas vývoja bola testovaná možnosť použiť zariadenie od firmy National Instruments CompactRIO s operačným systémov NI Linux Real-Time. Na základe výsledkov testovania bolo zistené, že na uvedenom zariadení je možné spracovávať v reálnom čase hodnoty len z jedného zdroja.

6 ZHODNOTENIE PRÍNOSU CENTRÁLNEJ OCHRANY

Dizertačná práca je zameraná na popis algoritmov a ich implementáciu vo vývojovom prostredí LabView. V rámci práce bol vyvinutý model centrálnej ochrany v LabView, ktorý umožňuje prijímanie meraných hodnôt prúdu a napätia zo štyroch polí v rozvodni a obsahuje základné ochranné funkcie. Počas vývoja modelu centrálnej ochrany vznikli softwarové nástroje, ktoré umožňujú spracovanie IEC 61850-9-2 SV v reálnom čase a taktiež testovanie navrhnutých algoritmov. Central Protection Relay Model – predstavuje prvotný návrh modelu centrálnej ochrany. V rámci testovania bola overená korektná funkcia navrhnutých algoritmov. Zadanie dizertačnej práce bolo súčasťou projektu TAČR - TA03010444 - Systém chránění sítě VN s využitím senzorů proudu a napětí se standardizovaným digitálním výstupem IEC 61850-9-2, ktorý bol riešený v kooperácii firmy ABB, Ústavu elektroenergetiky a Ústavu automatizácie a meracej techniky.

Koncept centrálnej ochrany predstavuje nový spôsob chránenia elektrizačnej sústavy využívajúc digitálne dáta z MU prostredníctvom procesnej zbernice popísanej v IEC 61850-9-2. Centrálna ochrana prináša množstvo výhod v rámci ochranných funkcií, kedy všetky algoritmy použitých funkcií prebiehajú na jednom zariadení. Použitie konceptu centrálnej ochrany má vplyv na celú topológiu systému rozvodne, kedy nie je potrebné IED pre každé pole v rozvodni, z čoho vyplýva zníženie nákladov na pole. Zároveň je toto riešenie pripravené pre inteligentné siete.

Využitie digitalizácie v rozvodniach so sebou prináša aj určité negatívne stránky, s ktorými je nutné počítať pri návrhu ochranného systému.

V prípade nižšie uvedených stavov nie je možné chrániť vymedzenú časť rozvodne

1. **Porucha MU**
   - Popis poruchy: MU hlási chybu pripojenia, nie je možne vysielať merané hodnoty vo forme IEC 61850-9-2 SV. Uvedená porucha spôsobí nefunkčnosť ochranných funkcií pre pole, v ktorom došlo k poruche MU.
   - Riešenie: Nutná oprava/výmena MU. Implementovať záložnú nadprúdovú ochranu do poľa, aby pri výpadku vysielania dát bola zaistená základná ochrana poľa.
2. **Porucha sieťovej karty v centrálnej ochrane**
   - Popis poruchy: Centrálna ochrana hlási chybu pripojenia, nie je možný príjem meraných hodnôt vo forme IEC 61850-9-2 SV. V prípade výskytu tejto poruchy nie je možné zabezpečiť chránenie rozvodne, nakoľko sú ovplyvnené všetky ochranné algoritmy.
   - Riešenie: Nutná oprava/výmena sieťovej karty. Implementovať záložnú nadprúdovú ochranu do poľa, aby pri výpadku vysielania dát bola zaistená základná ochrana poľa, kým nedôjde k odstávke rozvodne alebo odstráneniu poruchy.
3. **Chyba v prúdovom alebo napäťovom senzore**
   - Popis poruchy: Nedostupné merané hodnoty prúdu a napätia => centrálna ochrana nemôže chrániť časť siete.
   - Riešenie: Nie je možné eliminovať – nutná oprava/výmena senzorov prúdu/napätia. V prípade, že je porucha len v rámci jedného poľa, je možné odstaviť len postihnuté pole.

4. **Chyba v Etherntovom switchi**
   - Popis poruchy: V prípade poruchy Ethernetového switcha nastane výpadok sieťovej komunikácie, čo spôsobí nedostupnosť meraných hodnôt pre ochranné algoritmy v centrálnej ochrane.
   - Riešenie: Redundantné zapojenie siete s využitím dvoch Ethernetových switchov umožní pokračovať v prevádzke rozvodne aj v prípade poruchy jedného z Ethernetových switchov.
5. **Chyba časovej synchronizácie – výpadok signálu z GPS**
   - Popis poruchy: Merané hodnoty z jednotlivých zdrojov nie sú synchronizované, čo spôsobí problém s vyhodnocovaním porúch v rámci ochranných funkcií. Centrálna ochrana môže nesprávne vyhodnotiť poruchu alebo poslať vybavovací signál s oneskorením => nemožnosť chrániť časť rozvodne.
   - Riešenie: Zavedenie záložného časového servera v sieti napr. v Ethernetovom switchi alebo MU.

Navrhnutý model centrálnej ochrany bude využitý v rámci výuky predmetov na Ústave Elektroenergetiky v spolupráci s MU. Ďalší rozvoj v problematike ochranných algoritmov a rozvoju modelu centrálnej ochrany v rámci riešenia bakalárskych a diplomových prác.

Riešenie centrálnej ochrany a ochranných algoritmov bude ďalej rozvíjané v rámci vývojových projektov zameraných na prenosy dát a chránenie elektrizačnej sústavy.

Navrhnutá MU v rámci projektu TAČR - TA03010444 bude v rámci vývojového projektu nasadená do reálnej rozvodne vysokého napätia, kde bude digitalizovať a posielať merané hodnoty z vývodového poľa do laboratória ochrán Ústavu elektroenergetiky. Merané hodnoty budú následne spracovávané pomocou Central Protection Relay Model v LabView a ďalších softvérových nástrojov. V rámci projektu bude pokračovať vývoj centrálnej ochrany.

7 ZÁVER

V úvode dizertačnej práce je spracovaný prehľad vývoja elektrických ochrán od základných elektromechanických ochrán až po moderné digitálne ochrany. Taktiež sú popísané prvé náznaky vývoja centrálnej ochrany vo forme prvých väčších realizovaných projektov. V súčasnosti je trendom digitalizácia elektrických sietí – s touto problematikou úzko súvisí digitalizácia rozvodní, merania a chránenia.

Medzi nové moderné metódy merania patrí využívanie nekonvenčných princípov merania v tzv. senzoroch. Ich výstupný signál je nízko potenciálový a rozvedenie signálu na väčšie vzdialenosti klasickým vodičovým spôsobom je nerealizovateľné. Z tohto dôvodu vznikla iniciatíva tieto hodnoty zdieľať digitálne, bol vytvorený Process bus, po ktorom je možné zdieľať merané hodnoty (SV) v digitálnej forme.

V roku 2013 uviedla firma ABB koncept UniGear Digital, ktorý predstavuje rozvádzač vysokého napätia využívajúci prúdové a napäťové senzory. Zdieľanie napätia medzi ochranami v rámci rozvodne prebieha prostredníctvom štandardu IEC 61850-9-2. Firma Locamation zaoberajúca sa vývojom ochrán predstavila riešenie centrálnej ochrany na báze vlastných zariadení a komunikačného protokolu. Riešenie firmy Locamation využíva distribútor Alliander v Holandsku.

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo vytvoriť algoritmus centrálnej ochrany využívajúci digitálny výstup zo senzorického systému merania prúdu a napätia, čím bude eliminované veľké množstvo ochrán v rozvodni a budú nahradené jednou centrálnou ochranou. Centrálna ochrana bude obsahovať algoritmy všetkých ochranných funkcií a užívateľ si podľa potreby nastaví potrebné ochranné funkcie pre jednotlivé polia rozvodne. V rámci riešenia dizertačnej práce bol naprogramovaný model centrálnej ochrany v LabView. Pri vývoji bol uvažovaný prenos meraných hodnôt na základe štandardu IEC 61850-9-2. Model centrálnej ochrany disponuje vybranými ochrannými funkciami – nadprúdová ochrana, ochrana pri nesymetrii, logická ochrana prípojníc a diferenciálna ochrana. Jednotlivé algoritmy boli naprogramované vo vývojovom prostredí LabView do ucelenej formy v podobe modelu centrálnej ochrany. Zadanie dizertačnej práce bolo súčasťou projektu TAČR - TA03010444 - Systém chránění sítě VN s využitím senzorů proudu a napětí se standardizovaným digitálním výstupem IEC 61850-9-2, ktorý bol riešený v kooperácii firmy ABB, Ústavu elektroenergetiky a Ústavu automatizácie a meracej techniky. V rámci tohto projektu boli vyvinuté ďalšie softvérové nástroje pre verifikáciu SV, vysielanie SV a knižnica SVRLIB pre príjem SV do LabView.

Navrhnutý model centrálnej ochrany bol otestovaný s pomocou testovacieho zariadenia OMICRON 256plus. Pre testy bol využitý navrhnutý hardware, ktorý vznikol v rámci projektu TAČR - TA03010444. V rámci testovania bola overená funkcia všetkých navrhnutých ochranných funkcií a výsledky testovania boli porovnané s výsledkami testovania ochrán firmy ABB. Na základe výsledkov je možné konštatovať, že navrhnuté algoritmy pracujú správne. V práci bol kladený dôraz aj na zhodnotenie možných neistôt pri testovaní. Jednotlivé ochranné algoritmy boli podrobné testu s 1000 opakovaniami, na základe ktorých boli zostavené grafy hustoty Gaussovho rozdelenia a vyhodnotená stredná hodnota Gaussovho rozdelenia a smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia. Tieto hodoty definujú interval, v ktorom sa nachádza 68% vypínacích časov.

Model centrálnej ochrany je schopný v reálnom čase vyhodnocovať poruchy v štyroch odbočkách, čo predstavuje príjem štyroch prúdov a štyroch napätí z každej odbočky. Tento počet je limitovaný rýchlosťou použitého procesoru a použitia LabView priamo na počítači s OS Windows.

V závere sa práca zaoberá teoretickým vyhodnotením maximálneho počtu vysielačov pre sieť s rýchlosťou 100 Mb/s a následným overením výpočtu. Na základe výpočtu a výsledkov testovania je pre ďalšiu implementáciu doporučené použitie siete s rýchlosťou 1 Gb/s.

Práca pojednáva o prínose centrálnej ochrany a obsahuje zhodnotenie pozitívnych a negatívnych faktorov, ktoré môžu nastať v prípade použitia digitalizácie. V rámci popisu boli navrhnuté riešenia ako eliminovať jednotlivé chyby v prípade ich výskytu. V prípade poruchy MU alebo senzorov pre meranie prúdu a napätia je nutné odstavenie rozvodného zariadenia a výmena prípadne oprava poškodených zariadení. Výpadku časovej synchronizácie prípadne poruche v Ethernetovom switchi je možné predchádzať správnym návrhom siete - použitím redundantného zapojenia a implementáciou záložného zdroja.

7.1 Prínosy dizertačnej práce

V dizertačnej práci je spracovaný teoretický popis algoritmov a ich naprogramovanie vo vývojovom prostredí LabView vo forme modelu centrálnej ochrany – Central Protection Relay Model. Výsledok dizertačnej práce ukazuje nové možnosti chránenia rozvodných zariadení využívajúc štandard IEC 61850. Demonštruje možnosť vzniku centrálnej ochrany pre reálne použitie, či už pre celú rozvodňu alebo skupiny panelov. V modele centrálnej ochrany sú naprogramované základné ochranné funkcie – nadprúdová ochrana (mžiková, časovo nezávislá, časovo závislá), smerové relé, logická ochrana prípojníc, ochrana pri nesymetrii, diferenciálna ochrana.

Medzi prínosy riešenia problematiky centrálnej ochrany s využitím IEC 61850-9-2 SV je nutné zahrnúť aj vznik softwarových nástrojov – SVA, SVG – a knižnice SVRLIB. Pre vývoj algoritmov ochranných funkcii prinášajú jednoduchý spôsob ako je možné algoritmus efektívne otestovať a vyhodnotiť nielen jeho spoľahlivú funkciu ale aj odchýlku vypínacieho času od teoretických hodnôt.

7.2 Návrh ďalšieho postupu

Central Protection Relay Model bol úspešne prezentovaný na záverečnej obhajobe projektu TAČR – TA03010444 - Systém chránění sítě VN s využitím senzorů proudu a napětí se standardizovaným digitálním výstupem IEC 61850-9-2. Spolu s vyvinutou MU a prúdový senzorom s digitalizovaným výstupom bola demonštrovaná ukážka funkcie zariadení a software, ktorý vznikol počas riešenie projekt TA03010444.

Navrhnutá MU bude nasadená do reálnej rozvodne vysokého napätia a digitalizované dáta vo forme IEC 61850-9-2 SV budú prenášané po optike do laboratórií ochrán na Ústave elektroenergetiky. Merané hodnoty budú spracovávané na PC pomocou Central Protection Relay Model a ďalších softvérových nástrojov. V rámci tejto inštalácie je možné ďalej zdokonaľovať algoritmy ochrán a pracovať na princípe centrálnej ochrany. Pre vývojové účely je Central Protection Relay Model naprogramovaný v LabView avšak pre zlepšenie rýchlosti algoritmu je v budúcnosti nutné preprogramovanie v inom programovacom jazyku ako napr. C++ a prevádzkovať Central Protection Relay Model na real-time operačnom systéme.

POUŽITÁ LITERATÚRA

[1] *Centralized Substation Protection and Control - Report of Working Group K15 of the Substation Protection* [online]. IEEE PES Power System Relaying Committee, December 2015 [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.pes-psrc.org/Reports/IEEE_PES_PSRC_WG%20 K15_Report_CPC_Dec_2015.pdf

[2] BALDINGER, Frank, JANSEN, Ton, VAN RIET, Maarten a VOLBERDA, Frans, Nobody knows the future of Smart Grids, therefore separate the essentials in the secondary system. *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change* [online], Manchester, 2010, s. 1-5. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5522248

[3] Locamation, *Versatile Communication Unit (VCU106)* [online]. Locamation, Enschede, 2017, 4 s. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.locamation.com/wp-content/uploads/2017/04/24-1EN4_Versatile_ Communication_Unit_VCU106.pdf

[4] Locamation, *Brekaer Interface Module (BIM641)* [online]. Locamation, Enschede, 2017, 4 s. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.locamation.com/wp-content/uploads/2017/04/20-1EN3_Breaker_ Interface_Module_BIM641.pdf

[5] Locamation, *Current Interface Module (CIM631)* [online]. Locamation, Enschede, 2017, 4 s. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.locamation.com/wp-content/uploads/2017/04/21-1EN4_Current_ Interface_Module_CIM631.pdf

[6] Locamation, *Voltage Interface Module (VIM622)* [online]. Locamation, Enschede, 2017, 4 s. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.locamation.com/wp-content/uploads/2017/04/22-1EN4_Voltage_ Interface_Module_VIM622.pdf

[7] Locamation, *Central Control Unit (CCU 600 series)* [online]. Locamation, Enschede, 2017, 4 s. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.locamation.com/wp-content/uploads/2017/04/23-1EN4_Central_Control _Unit_CCU600.pdf

[8] ABB, *UniGear Digital Engineering Guide*, ABB, 2014, 93 s, 1VLG500007.

[9] STEFANKA, Martin, PROKOP, Václav, SALGE, Gerhard, Application of IEC 61850-9-2 in MV switchgear with sensors use, *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)* [online], June 2013, vol. 1, no. 4, pp. 10-13. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6683166

[10] STEFANKA, Martin, *Aplikace senzorů a digitalizace podle IEC 61850 v sítích a rozvodnách vysokého napětí*, Disertační práce, Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2016, 93 s.

[11] Siemens, *SIPROTEC 6MU805*. Siemens, Wendell, 8 s., EMDG-B10035-00-4AUS

[12] Siemens, *SIPROTEC 5 Process Bus*. Siemens, 66 s., C53000-X3040-C054-1

[13] Siemens, *SIPROTEC goes Process Bus*. Siemens, Erlangen, 2 s.

[14] PAVAIYA Neha, VARGHESE Abraham, BOUCHERIT Mohamed, NEWMAN Philip a DIEMER Peter, IEC 61850 process bus application in Energinet, Denmark, *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)* [online], Kodaň, 2014, s. 1-4. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6822873

[15] SUN X., REDFERN M.A., CROSSLEY P.A., YANG L., LI H.Y., ANOMBEM U.B., WEN A., CHATFIELD R. a WRIGHT J., Design and operation of the IEC 61850 9-2 process bus used for the protection system. *11th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)* [online]. Birmingham, 2012. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6227546

[16] KANABAR Mitalkumar. G., SIDHU Tarlochan. S. a ZADEH Mohammad. R. D. Laboratory investigation of IEC 61850-9-2-based busbar and distance relaying with corrective measure for sampled value loss/delay, *IEEE Trans. PowerDel.* [online], 2011, vol. 26, no. 4, pp. 2587-2595. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6029813

[17] KANABAR Mitalkumar a SIDHU Tarlochan. S. Performance of IEC 61850-9-2 process bus and corrective measure for digital relaying, *IEEE Trans. Power Del.* [online], 2010. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5409526

[18] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60255-151, *Measuring relays and protection equipment - Part 151: Functional requirements for over/under current protection*, First edition. Geneva: Switzerland International Electrotechnical Commission, 2009-08.

[19] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení.* Brno, 2015. s. 179.

[20] ALMAS, Muhammad Shoaib, LEELARUJI, Rujiroj a VANFRETTI, Luigi, Over-current relay model implementation for real time simulation & Hardware-in-the-Loop (HIL) validation, *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* [online], vol. 4789, no. 4796, pp. 25-28, Oct. 2012. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6389585

[21] CAMPOS David, MORENO Edgar a TORRES Domingo, Test and Evaluation Time-Inverse Over-Current Protection Algorithm Using SIMULINK, *Proceeding of the 7th WSEAS International Conference on SIGNAL PROCESSING (SIP´08)* [online], Istanbul, 2008, s. 69-74. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.wseas.us/e-library/conferences/2008/istanbul/sip-wave/12-587-311.pdf

[22] ABB, *615 series Technical manual.* ABB, Vaasa, 2011, 992 s. 1MRS756887 K

[23] SEDLÁČEK, Jiří, VALSA, Juraj, *ELEKTROTECHNIKA II*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 186 s.

[24] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Elektrické stanice a vedení.* Brno, 2017.

[25] JANÍČEK, František, *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. 1. Vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2004. Edícia vysokoškolských učebníc.

[26] HALUZÍK, Evžen. *Ochrany a jištení energetických zařízení*. Skriptum edičné stredisko VUT Brno, Brno, 2003.

[27] PROKOP Lukáš a Václav PROKOP, Impact of MV sensors on differential protection performance, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY* [online]. 2013, 89(11/2013), s. 4. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://pe.org.pl/articles/2013/11/22.pdf

[28] SUMEC, Stanislav, *Sampled Value Analyser – Příručka uživatele* [online]., rev.1, 2013. [cit. 2017-05-03].

Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/homes/sumec/sva/Download/Manual.pdf

[29] SUMEC, Stanislav, Software tool for verification of sampled values transmitted via IEC 61850-9- 2 protocol, In: *Procceding of 2014 15th International Scientific Conference on Electrical Power Engineering.* Brno, 2014. s. 113-117. ISBN: 978-1-4799-3806.

[30] INTERNATIONAL STANDARD IEC 61850-9-2, *Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication System Mapping (SCSM) – SV over ISO/IEC 8802-3*, Second edition. Geneva: Switzerland International Electrotechnical Commission.

[31] JURA, Pavel a Michal POLANSKÝ. *Signály a systémy, elektronické skriptum,* s. 248. Brno: 2003.

[32] SABIN, William E. 2008. *Discrete-signal analysis and design*. 1. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

[33] ABB, *KECA 250 B1 Indoor current sensor*, ABB, 08/2011, 1VLC000584 Rev.2- en.

[34] ABB, *KECA 250 B1 Current Sensor Instructions for installation, use and maintenance*, Brno, 02/2012, 1VLM000591 Rev.2- en.

[35] OMICRON, *CMC 256plus – The High Precision Relay Test Set and Universal Calibrator*. OMICRON, 6 s.

[36] OMICRON, *CMC 256plus*. OMICRON, 1 s.

[37] OMICRON, *CMGPS 588*. OMICRON, 1 s.

[38] TP-LINK, *PoE Injector TL-POE150S*, TP-LINK, 2 s.

[39] HIRSCHMANN, *User Manual Installation Industrial Ethernet Rail Switch Power RSP 20/25/30/35*, 039792001020312000, Release 02, 03/2012.

[40] ZAPLETAL, Josef. *Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky*. Skriptum edičné stredisko VUT Brno, Brno, 1995.

[41] IEC 61850-8-1. *Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3,* Second edition. Geneva: Switzerland International Electrotechnical Commission

PUBLIKÁCIE AUTORA

[A] BAJÁNEK, Tomáš a Stanislav SUMEC, Development of Negative Sequence Relay Model Processing IEC 61850-9- 2 SV. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),* 2016, Praha: 2016, s. 234-238, ISBN: 978-1-5090-0907- 7.

[B] BAJÁNEK, Tomáš a Stanislav SUMEC, Software Tools for Processing of SV Transmitted via IEC 61850-9- 2 Protocol in LabView. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),* 2016, Praha: 2016, s. 230-233. ISBN: 978-1-5090-0907- 7.

[C] DABOUL, Mayada, WASSERBAUER, Vojtěch; BAJÁNEK, Tomáš a Jaroslava ORSÁGOVÁ, Testing Protection Relays Based on IEC 61850 in Substation Automation Systems. In *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),* 2015, s. 335-340, ISBN: 978-1-4673-6787- 5.

[D] WASSERBAUER, Vojtěch, BAJÁNEK, Tomáš, ORSÁGOVÁ Jaroslava a David TOPOLÁNEK, Ground faults simulation model in comparison with performed experiments. In *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),* 2015, s. 88-93, ISBN: 978-1-4673-6787- 5.

[E] BAJÁNEK, Tomáš, KALINA, Emil, PERNICA, Roman a Drahomír TŮMA, Experience with Pressure Rise Calculation in Medium Voltage Switchgear. In *Proceedings of 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering,* 2015, s. 359-363, ISBN: 978-1-4673-6787- 5.

[F] WASSERBAUER, Vojtěch a Tomáš BAJÁNEK, *Elektrárny a teplárny - Sbírka úloh.* Brno: FEKT VUT v Brně, 2015.

[G] BAJÁNEK, Tomáš, Instantaneous and Definite Time Overcurrent Protection Algorithms. In *Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015.* první. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2015, s. 590-594, ISBN: 978-80-214-5148- 3.

[H] WASSERBAUER, Vojtěch a Tomáš BAJÁNEK, *Elektrárny a teplárny - sbírka úloh do laboratorních cvičení.* Brno: FEKT VUT v Brně, 2015.

[I] BAJÁNEK, Tomáš, Development of Overcurrent Protection Relay Model Using IEC 61850-9- 2 SV. In *Proceedings of the 20th Conference Student EEICT 2014 - Papers written by doctoral students.* 2014. BRNO: LITERA, 2014. s. 78-82. ISBN: 978-80-214-4922- 0.

[J] BAJÁNEK, Tomáš, Overcurrent Protection Relay Model Using IEC 61850-9- 2 SV. In *Proceedings of 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering.* 2014. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 101-106. ISBN: 978-1-4799-3806- 3.

PRODUKTY AUTORA

[a] BAJÁNEK, Tomáš, SUMEC, Stanislav a ORSÁGOVÁ, Jaroslava, Central Protection Relay Model; *Central Protection Relay Model*. Tomáš Bajánek, Technická 12, 616 00 Brno. URL: http://www.stud.feec.vutbr.cz/~xbajan00/. (software)

CURRICULUM VITAE

Osobné dáta

Meno a priezvisko: Tomáš Bajánek
Dátum narodenia: 4.6.1990
Bydlisko: Pittsburgská 2970/8, 010 08 Žilina
Telefón: +420 732 903 720
E-mail: tbajanek@chello.sk

Vzdelanie

- **2013 – 2017 –** Vysoké učení technické v Brne, fakulta Elektrotechniky a komunikačných technológií obor Silnoprúdová elektrotechnika a energetika – doktorské štúdium
    - Téma dizertačnej práce: *Systém chránění s využitím výstupu z elektronického senzorického systému měření proudu a napětí*
- **2008 – 2013** – Vysoké učení technické v Brne, fakulta Elektrotechniky a komunikačných technológií obor Elektroenergetika,
    - Téma diplomovej práce: *Optimalizace částečných výbojů UG 500R a UG 550 pro napěťovou hladinu 17,5kV*
- **2008 – 2011** – Vysoké učení technické v Brne, fakulta Elektrotechniky a komunikačných technológií obor Silnoprúdová elektrotechnika a energetika,
    - Téma bakalárskej práce: *Monitoring částečných výbojů a jejich minimalizace v rozváděči UG ZS1*
- **2000 – 2008** – Gymnázium Varšavská cesta 1, zameranie Matematika – Fyzika,

Prax

- **od 7/2013** – R&D Designer, ABB Brno, divízia Electrification Products Medium Voltage, oddelenie Technology centre,
- **9/2011-7/2013** – technická podpora oddelenia kvality, ABB Brno, divízia Power Products Medium Voltage

Projekty

- **2014 – 2016 –** Nové technologie pro udržitelnou elektroenergetiku, Označenie projektu: FEKT-S-14-2520, spoluriešiteľ
- **2013 – 2016 –** Systém chránění sítě VN s využitím senzorů proudu a napětí se standardizovaným digitálním výstupem IEC 61850-9-2, Označenie projektu: TA03010444, vývojár

Pedagogická činnosť

- **2013 – 2017 –** vedenie cvičení odborných základov v kurze Elektrárny a teplárny (MELE/LELE), participácia na laboratórnej výuke v kurzoch Elektrárny a teplárny (MELE/LELE) a Rozvodná zařízení (BRZB)

Jazykové znalosti

- Angličtina
- Nemčina

Ostatné

- **2014** – Výhra v súťaži „EEICT 2014“ v kategórii Silnoprúdová elektrotechnika a energetika,
- **2012** – 3.miesto v súťaži „EBEC 2012“ kategória Team Design
- **2012** – 2.miesto v súťaži „EBEC 2012 ABB Challenge“ kategória Team Design
- **2011** – Cena dekanky FEKT za bakalársku prácu s témou „*Monitoring částečných výbojů a jejich minimalizace v rozváděči UG ZS1“*
- **2011** – Účasť na stredoeurópskom kole súťaže „CEBEC 2011“ v kategórii Team Design
- **2011** – Výhra v súťaži „Ing.Race 2011“ kategória Team Design
- **2011 –** Výhra v súťaži „ABB Ing.Race 2011“ kategória Team Design,

Brno, 1.8.2017