

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
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 – ZKRÁCENÁ VERZE
DOCTORAL THESIS – SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. TOMÁŠ BAJÁNEK

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

ING. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ, Ph.D.

OPONENTI
OPPONENTS

DATUM OBHAJOBY
DATE OF DEFENSE

BRNO 2017

KLÚČOVÉ SLOVÁ

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

KEY WORDS

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

MIESTO ULOŽENIA PRÁCE

Práca je dostupná v Areálovej knižnici FEKT, Technická 12, 616 00 Brno

© Tomáš Bajánek, Vysoké učení technické v Brně, 2017

ISBN 80-214-xxxx

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	6
3 POPIS OCHRANNÝCH FUNKCIÍ	7
3.1 NADPRÚDOVÁ OCHRANA	7
3.2 SMEROVÝ ČLEN	8
3.3 LOGICKÁ OCHRANA PRÍPOJNÍC	8
3.4 OCHRANA PRI NESYMETRII	9
3.5 DIFERENCIÁLNA OCHRANA	9
3.5.1 VPLYV PRÚDOVÝCH SENZOROV NA CHARAKTERISTIKU ROZDIELOVEJ OCHRANY	9
4 MODEL CENTRÁLNEJ OCHRANY V LABVIEW	10
4.1 TESTOVANIE MODELU CENTRÁLNEJ OCHRANY	10
4.1.1 TESTOVANIE POMOCO U OMICRON 256PLUS	11
4.1.2 TESTOVANIE POMOCO U VYVINUTÉHO HARDWARE	11
4.1.3 TESTOVANIE POMOCO U SOFTWARE VÝROBÝCH NÁSTROJOV	13
4.1.4 VÝSLEDKY TESTOVANIA OCHRANNÝCH ALGORITMOV	14
MŽIKOVÁ NADPRÚDOVÁ OCHRANA	14
4.1.5 NEISTOTY NAVRHNUTÝCH ALGORITMOV OCHRANNÝCH FUNKCIÍ	17
4.2 TESTY KOMPATIBILITY MU	19
4.3 TEST KAPACITY ETHERNETU PRE IEC 61850-9-2 SV	19
5 ZHODNOTENIE PRÍNOSU CENTRÁLNEJ OCHRANY	20
6 ZÁVER.....	22
6.1 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	23
6.2 NÁVRH ĎALŠIEHO POSTUPU	24
POUŽITÁ LITERATÚRA	25
CURRICULUM VITAE	28
ABSTRACT	30

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 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 prípojnic,
 - 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.

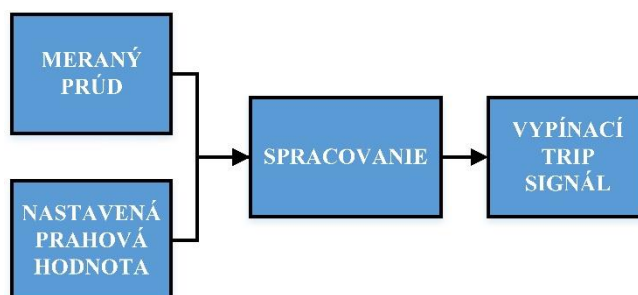
3 POPIS OCHRANNÝCH FUNKCIÍ

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 prípojnic
4. Ochrana pri nesymetrii
5. Diferenciálna ochrana

3.1 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, meráciu charakteristiku a charakteristiku časového oneskorenia. Na základe tohto štandardu boli navrhnuté algoritmy nadprúdovej ochrany. Základný blokový diagram nadprúdovej ochrany je uvedený na Obr. 1.



Obr. 1 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 preťaženíach a jej rovnica vyjadruje závislosť doby pôsobenia t na prúde I

$$F(I, I_p, t) = 0, \quad (1)$$

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

Nadprúdové ochrany sú klasifikované podľa vypínacieho času do troch kategórií – mžiková, časovo závislá a časovo nezávislá nadprúdová ochrana – tak, aby reagovala rôzne na odlišné typy nadprúdov

3.2 SMEROVÝ ČLEN

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

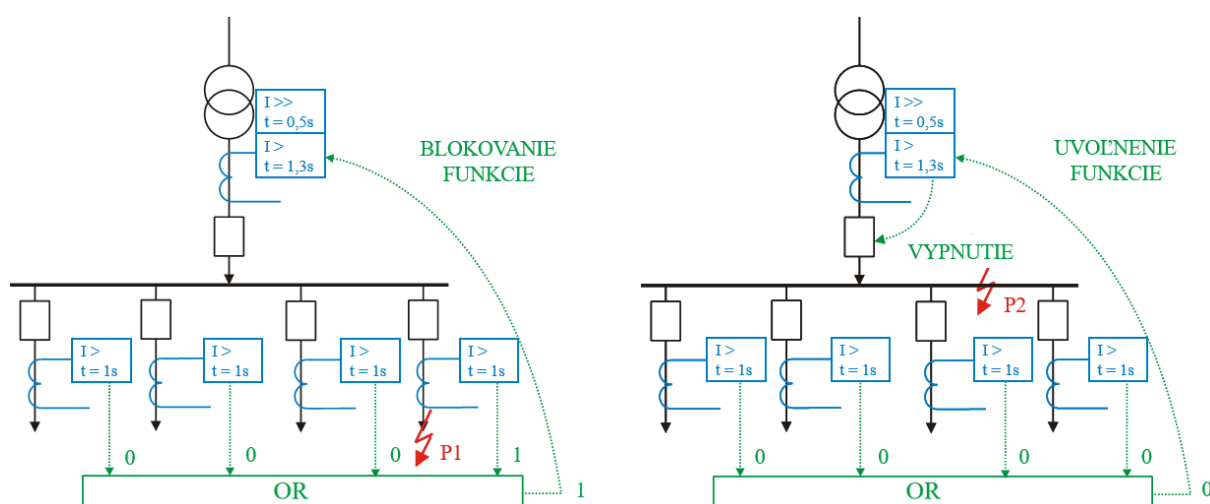
- polarizácia podľa združených napätí,
- polarizácia podľa fázových napätí,
- polarizácia podľa spätnej zložky napätí,
- polarizácia podľa súslednej zložky napätí.

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.

3.3 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 prípojnic patrí medzi najdôležitejšie ochrany v rozvodni a musí byť preto ochranou rýchlou, spoľahlivou a selektívnou. Voľba ochrany závisí na usporiadaní, schéme a konštrukčnom riešení prípojnic [24].

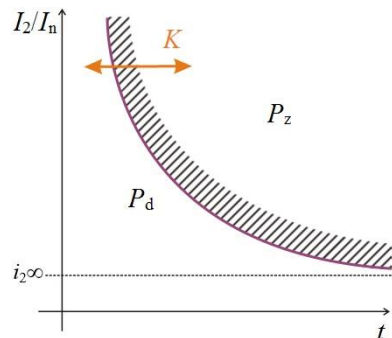
Jednou z možností chránenia prípojnic je logická ochrana prípojnic, ktorá pracuje na princípe vzájomnej komunikácie nadprúdových ochrán v rozvodni. Jedná sa o blokovanie nadprúdovej ochrany v prívodnom poli rozvodne. Logická ochrana prípojnic sa používa väčšinou v distribučných rozvodniach. Princíp blokovania nadprúdovej ochrany je uvedený na Obr. 2. [24]



Obr. 2 Bloková schéma funkcie logickej ochrany prípojnic

3.4 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. 3 .



Obr. 3 Charakteristika ochrany pri nesymetrii

Ochrana pri nesymetrii je charakterizovaná rovnicou

$$K = \int_0^{T_{\text{nesym}}} i^{(2)2} dt, \quad (2)$$

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.

3.5 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.

3.5.1 Vplyv prúdových senzorov na charakteristiku rozdielovej ochrany

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 redukcii chýb pri meraní – vedie to k vyššej presnosti detekcie porúch. [27]

4 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.

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 prípojnic,
- ochrana pri nesymetrii,
- diferenciálna ochrana.

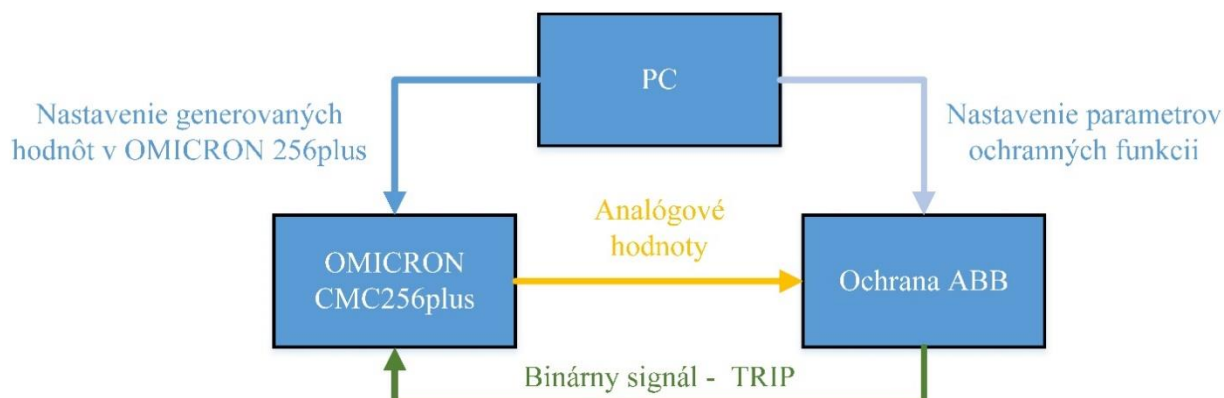
V prípade vyhodnotenia poruchy model posiela GOOSE správu prostredníctvom Ethernetu. Pre správnu funkciu modelu centrálnej ochrany sú potrebné softwarové nástroje, vyvinuté na Vysokom Učení Technickom – Sampled Value Analyser, Sampled Value Generator a knižnica SVRLIB.

4.1 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.

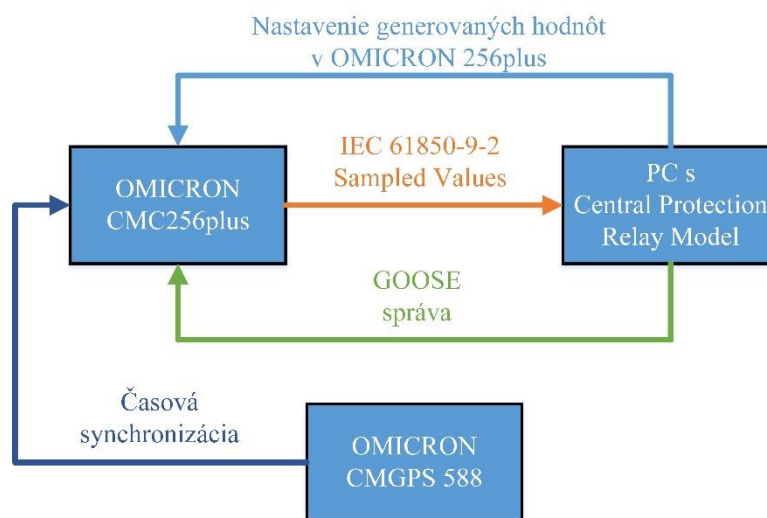
Testovanie referenčných ochrán ABB bolo vykonané v zapojení podľa blokovej schémy na Obr. 4.



Obr. 4 Bloková schéma zapojenia pre testovanie referenčných ochrán firmy ABB

4.1.1 Testovanie pomocou OMICRON 256plus

Testovanie centrálnej ochrany prebieha pomocou testovacieho zariadenia od firmy OMICRON – 256plus. Bloková schéma zapojenia PC s aplikáciou Central Protection Relay Model a testovacieho zdroja OMICRON je uvedená na Obr. 5.

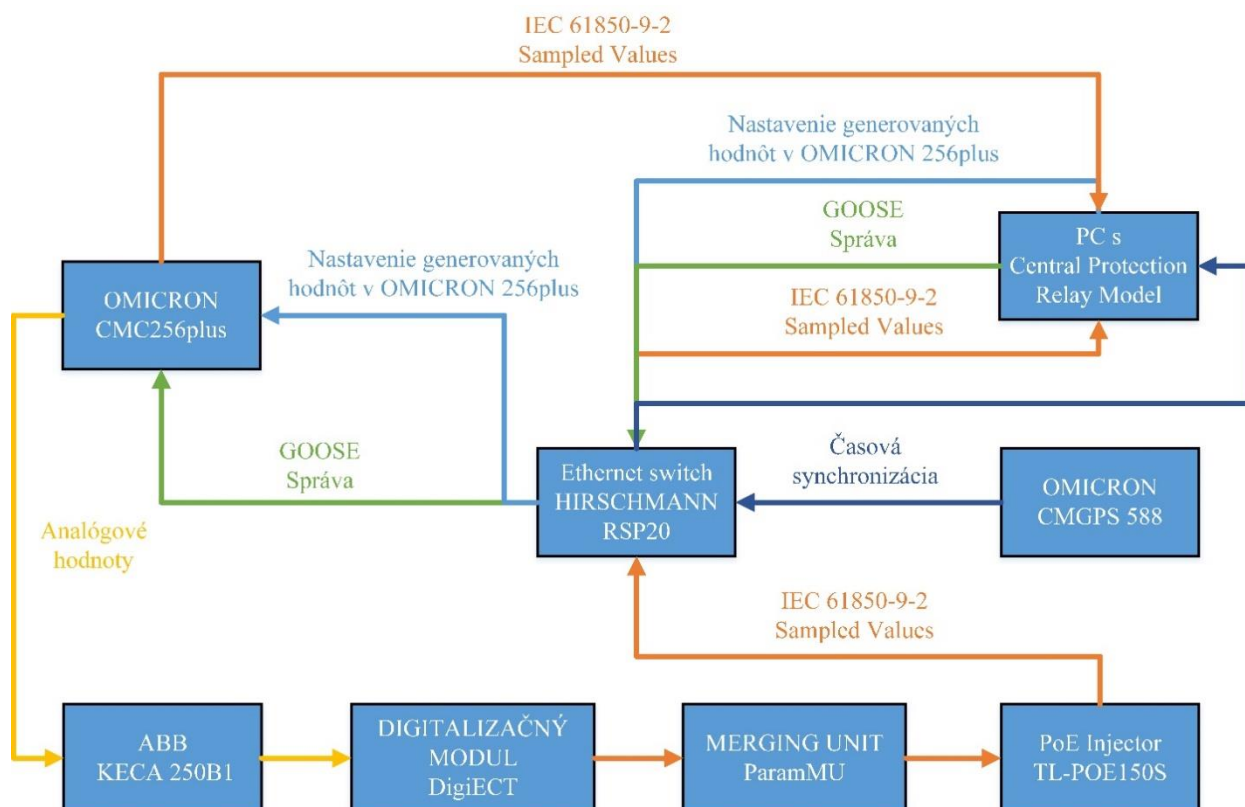


Obr. 5 Bloková schéma zapojenia pre testovanie Central Protection Relay Model

4.1.2 Testovanie pomocou vyvinutého hardware

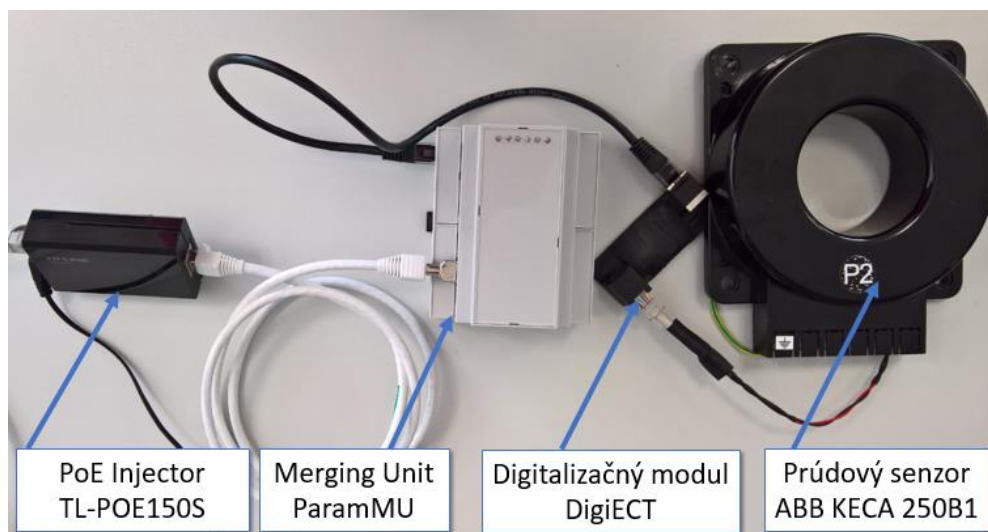
Vyvinutý hardware pre digitalizáciu výstupného analógového signálu zo senzora v spolupráci s vyvinutou MU bol použitý k overeniu navrhnutých ochranných algoritmov implementovaných v modele centrálnej ochrany. Zapojenie zariadení zodpovedá blokovej schéme podľa Obr. 6. V prípade ak nie je testovaná diferenciálna ochrana z testovacieho zariadenia OMICRON 256plus je generovaný len analógový signál do prúdového senzoru ABB KECA 250 B1

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

Na Obr. 7 je zobrazený vyvinutý hardware – MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT – v zapojení s prúdovým senzorom ABB KECA 250B1 a napájanie prostredníctvom PoE Injector TL-POE150S.

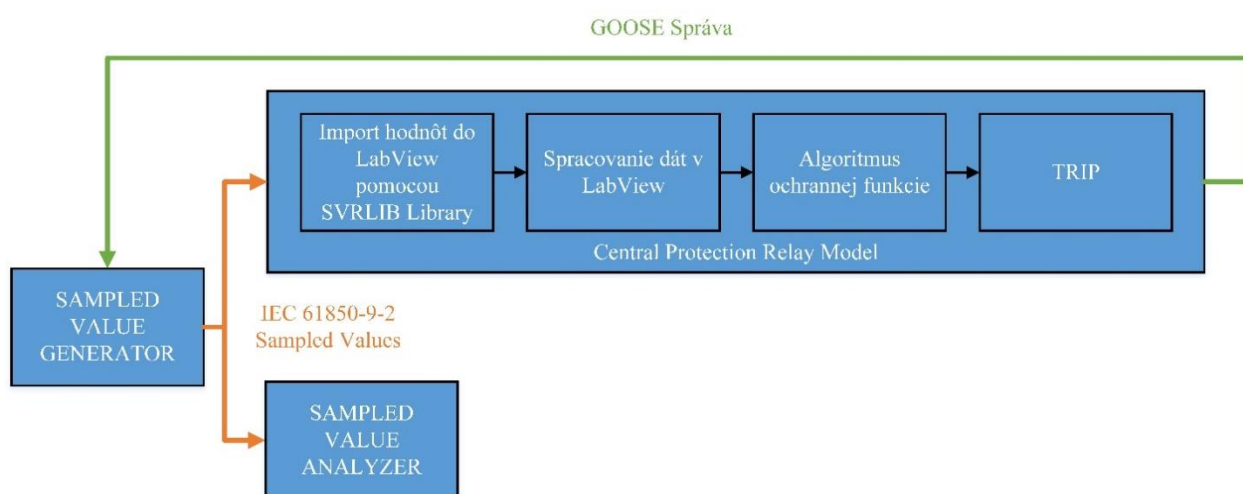


Obr. 7 MU ParamMU, digitalizačný modul DigiECT, prúdový senzor ABB KECA 250B1

4.1.3 Testovanie pomocou softwarových nástrojov

Alternatívnou možnosť testovania navrhnutých ochranných algoritmov je testovanie pomocou vyvinutých softwarových nástrojov v rámci projektu TAČR - TA03010444 –Sampled Value Analyser, Sampled Value Generator a knižnica SVRLIB. 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. 8.



Obr. 8 Bloková schéma testovania Central Protection Relay Model s vyvinutými softwarovými nástrojmi

4.1.4 Výsledky testovania ochranných algoritmov

U kapitole sú uvedené výsledky z testovania navrhnutých ochranných algoritmov.

Mžiková nadprúdová ochrana

Pre testovanie mžikovej nadprúdovej ochrany je použité zapojenie podľa kapitoly 4.1.2. Testovanie prebieha pomocou aplikácie StateSequencer, kde je definovaný poruchový a bezporuchový stav.

Počas testovania mžikovej nadprúdovej ochrany bola overená korektná funkcia naprogramovaného algoritmu v rámci dvoch testov s rozdielnym nastavením, pre každý test prebehlo 10 opakovaní. 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 senzoru ABB KECA 250B1 použitého pri testovaní algoritmu.

Časovo nezávislá nadprúdová ochrana

Overenie funkcie algoritmu časovo nezávislej nadprúdovej ochrany prebieha pomocou zapojenia podľa kapitoly 4.1.2. Testovanie prebieha pomocou aplikácie StateSequencer, kde je definovaný poruchový a bezporuchový stav.

Počas testovania časovo nezávislej nadprúdovej ochrany bola overená korektná funkcia naprogramovaného algoritmu v rámci dvoch testov s rozdielnym nastavením, pre každý test prebehlo 10 opakovaní. 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. 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 senzoru 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.

Časovo závislá nadprúdová ochrana

Overenie funkcie algoritmu časovo závislej nadprúdovej ochrany prebieha pomocou zapojenia podľa kapitoly 4.1.2. Pre nastavenie časovo závislej nadprúdovej ochrany bola zvolená charakteristika Standard Inverse.

Počas testovania časovo závislej nadprúdovej ochrany bola overená korektná funkcia naprogramovaného algoritmu. Test prebehol pre desať rôznych nadprúdov, čím bola nastavená charakteristika overená v celom rozsahu. Vybavovací čas algoritmu Central Protection Relay Model dosiahol najvyššiu kladnú odchýlku od teoretického času pre RMS generovaného signálu 4 A to 0,11 %. Najvyššia kladná odchýlka vybavovacieho času ochrany ABB REJ 525 bola pre RMS generovaného signálu 3 A to 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.

Smerové relé pre časovo závislú/nezavislú nadprúdovú ochranu

Funkcia smerového relé je možné použiť pre časovo závislú a časovo nezávislú nadprúdovú ochranu. Overenie funkcie prebieha pomocou zapojenia podľa kapitoly 4.1.1, 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. 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.

Logická ochrana prípojnic

Logická ochrana prípojnic bola otestovaná pomocou testovacieho zariadenia OMICRON 256plus podľa zapojenia popísaného v kapitole 4.1.1. V module State Sequencer boli definované tri stavy – pred poruchou, poruchový stav, po odznení poruchy. Výsledky testovania boli porovnané s testovaním ochrán ABB REF543.

Testovanie overilo správnu funkciu navrhnutého algoritmu logickej ochrany prípojnic. 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.

Ochrana pri nesymetrii

Testovanie ochrany pri nesymetrii bolo uskutočnené pomocou zapojenia popísaného v kapitole 4.1.1. 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.

Testovaním bola overená korektná funkcia navrhnutého algoritmu ochrany pri nesymetrii pre 2 nastavenia parametrov ochrannej funkcie. Vybavovacie časy Central Protection Relay Model a ochrany ABB REM 543 boli porovnané s teoretickými hodnotami 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. Vypínacie charakteristiky modelu centrálnej ochrany a ochrany ABB REM543 sú porovnateľné s teoreticky vypočítanými hodnotami.

Výsledky testovania algoritmu pri nesymetrii potvrdzujú spoľahlivosť navrhnutého algoritmu.

Diferenciálna ochrana

Pri testovaní diferenciálnej ochrany boli zariadenia zapojené podľa popisu v kapitole 4.1.2. Výsledky testovania navrhnutého algoritmu sú porovnané s výsledkami testovania ochrany ABB SPAD 346C.

Pre testovanie ochrany ABB SPAD 346C bolo použité zapojenie podľa Obr. 4. Testovanie algoritmu diferenciálnej ochrany implementovanej v Central Protection Relay Model prebiehalo podľa zapojenia na Obr. 6.

Pre testovanie bola zvolená štandardná charakteristika diferenciálnej ochrany bez uvažovania vplyvu prúdových senzorov uvedeného v kapitole 3.5.1.

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. Na základe výsledkov testovania navrhnutého algoritmu diferenciálnej ochrany 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. 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 %.

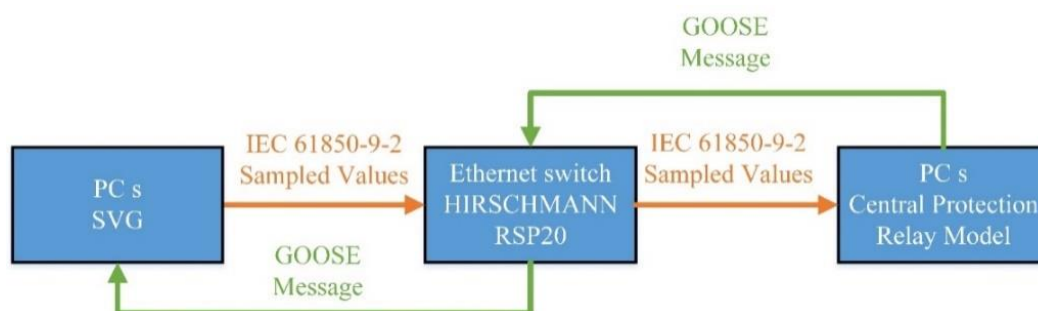
Vzniknutá odchýlka bola spôsobená krokom zvyšovania prúdu – 10mA a taktiež možnou nepresnosťou, ktorá vznikla pri meraní primárneho prúdu prúdovým senzorom ABB KECA 250B1. Testovaním bola overená korektná funkcia navrhnutého algoritmu.

4.1.5 Neistoty navrhnutých algoritmov ochranných funkcií

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

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. 9 Bloková schéma pre testovanie neistoty navrhnutých ochranných algoritmov

Mžiková nadprúdová ochrana

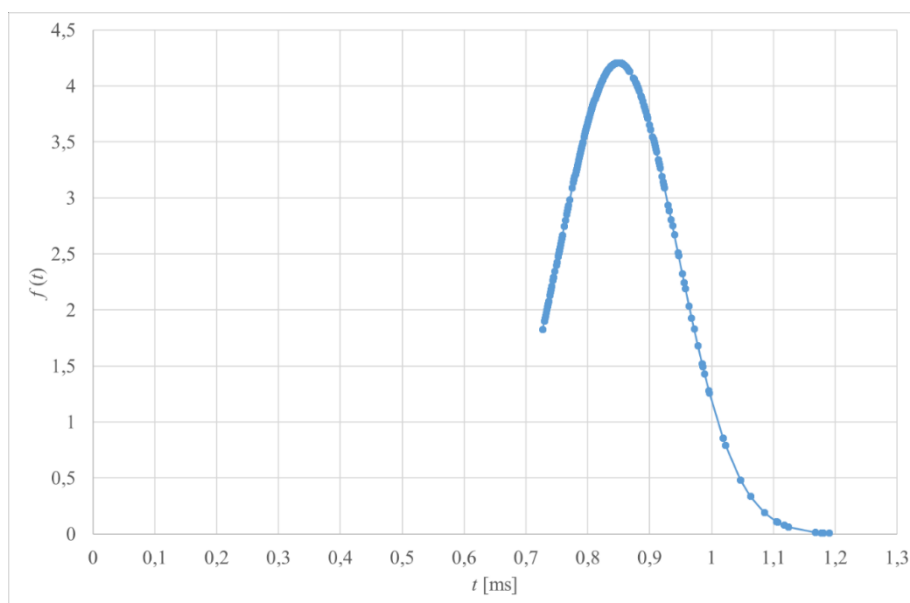
Pre algoritmus mžikovej nadprúdovej ochrany bolo vykonaných 1000 meraní vypínacieho času. Po spracovaní nameraných hodnôt vypínacích časov bol zostavený graf hustoty Gaussovho rozdelenia pravdepodobnosti pre vypínacie časy mžikovej nadprúdovej ochrany – Obr. 10.

Z nameraných hodnôt bola vypočítaná stredná hodnota Gaussovho rozdelenia a smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia – Tab. 1.. Tieto hodnoty 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. 1 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – mžiková nadprúdová ochrana

Číslo testu	Stredná hodnota Gaussovho rozdelenia	Smerodajná odchýlka Gaussovho rozdelenia
[-]	μ [ms]	σ [ms]
1	0,8496	0,0948



Obr. 10 Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti – mžiková nadprúdová ochrana

Zhodným spôsobom sú určené neistoty ostatných algoritmov v dizertačnej práci.

4.2 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 4.1.2) s využitím programu Sampled Value Analyser bolo určené oneskorenie 500 μ s $\rightarrow$ 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 zameraná réžia prenosu od Ethernetového switcha do aplikácie SVA, ktorá predstavuje hodnotu približne 40 μ s. 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.

4.3 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

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

Pre korektnú funkciu a zvyšovanie počtu vysielateľov IEC 61850-9-2 SV je odporúčané použiť sieť s kapacitou 1 Gb/s, kedy sa 10 násobne zvýši počet možných vysielateľov IEC 61850-9-2 SV v sieti.

5 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 možné vysielat' 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 napät'ovom 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 Ethernetovom 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 posilať 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.

6 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. senzorocho. 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 prípojnic 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 hodnoty 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 vysieláčov 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.

6.1 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 prípojnic, 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 funkcií prinášajú jednoduchý spôsob ako je možné algoritmus efektívne otestovať a vyhodnotiť nielen jeho spoľahlivú funkciu ale aj odchýlku vypínacieho času od teoretických hodnôt.

6.2 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%20K15_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. Power Del.* [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 jištění 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: *Proceeding 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

CURRICULUM VITAE

Osobné údaje

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



Vzdelanie

- **2013 – 2017** – Vysoké učení technické v Brně, fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Silnoproudová elektrotechnika a energetika – doktorské štúdium
 - Téma dizertační práce: *Systém chránění s využitím výstupu z elektronického senzorického systému měření proudu a napětí*
- **2008 – 2013** – Vysoké učení technické v Brně, fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Elektroenergetika,
 - Téma diplomové práce: *Optimalizace částečných výbojů UG 500R a UG 550 pro napěťovou hladinu 17,5kV*
- **2008 – 2011** – Vysoké učení technické v Brně, fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Silnoproudová elektrotechnika a energetika,
 - Téma bakalářské práce: *Monitoring částečných výbojů a jejich minimalizace v rozváděči UG ZSI*
- **2000 – 2008** – Gymnázium Varšavská cesta 1, zaměření 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 ZSI*“
- **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

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, current unbalance 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 the protection of 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.