

Róbert Štefko, Zsolt Čonka, Marek Bobček, Daniel Kurpaš, Michal Kolcun

Parametrizácia systému chránenia pre malú vodnú elektrárňu

Konfigurácia digitálnych ochrán presne rešpektuje požiadavky siete. Článok sa zaoberá nakonfigurovaním jednotlivých ochranných parametrov pre malú vodnú elektrárňu. Rovnako zahŕňa určenie hlavného miesta rozpojenia (HRM). Všetky nastavenia sú robené v súlade s konkrétnymi normami a požiadavkou prevádzkovateľa distribučnej sústavy VSD. Práca zohľadňuje časové intervaly a špecifické hodnoty rozbehových parametrov závisiacich na meracích transformátoroch a ich reprezentácii nameraných hodnôt. Pre správne zadefinovanie jednotlivých hodnôt je nevyhnutné realizovať výpočet, ktorého výstupmi sú prúdy tečúce do miesta skratu a následne na to rozbehové prúdy potrebné pre jednotlivé ochranné funkcie digitálnej ochrany.

Kľúčové slová: systém chránenia, digitálne ochrany, systémy chránenia, distribuované zdroje

The configuration of the digital protections precisely respects the requirements of the network. The article deals with the configuration of the individual protection parameters for a small hydropower plant. It also includes the determination of the main disconnection point (HRM). All the settings are done in accordance with the specific standards and requirements of the distribution system operator VSD. The work considers the time intervals and specific values of the start-up parameters depending on the metering transformers and their representation of the measured values. For the correct definition of the individual values, it is necessary to carry out a calculation whose outputs are the currents flowing to the short-circuit point and, consequently, the inrush currents required for the individual protection functions of digital protection. **(Parameterization of the protection system for a small hydropower plant)**

Keywords: protection system, digital protection, protection systems, distributed resources

I. ÚVOD

Článok sa zaoberá konkrétnym nastavením elektrických ochrán od firmy SEL (Schweitzer Engineering Laboratories) pre ochranu malej vodnej elektrárne s výkonom 650 kVA pripojenej do 22 kV siete pomocou blokového transformátora. Riešenie sa prakticky realizuje dvoma spôsobmi: pomocou poistiek na nízkonapäťovej strane transformátora alebo pomocou digitálnej elektrickej ochrany. Výhoda riešenia pomocou ochrán spočíva v určení HRM – hlavného miesta rozpojenia, kde prioritne dochádza k odpojeniu od vonkajšej siete v prípade akýchkoľvek nepriaznivých javov. Malé vodné elektrárne sa v súčasnosti využívajú na výrobu špičkového požadovaného výkonu. Preto je dôležité, aby boli tieto elektrárne plne automatizované a pripravené v ktoromkoľvek čase dodať do siete požadovaný výkon pre udržanie kvalitatívnych ukazovateľov elektrickej energie v povolených medziach. Počet malých vodných elektrární v prevádzke na území Slovenskej republiky je 217, ich inštalovaný výkon 82 MW zabezpečuje dodanie približne 280 GWh elektrickej energie ročne [1].

II. OCHRANNÉ FUNKCIE PRE CHRÁNENIE GENERÁTORA

Ochranné funkcie odporúčané pre vypínač QM1 závisia od faktu, že sa jedná o hydroalternátor s inštalovaným výkonom, ktorý je menší ako 1 MVA, a tiež od toho, že stroj pracuje do siete nízkeho napätia (nn), a preto ako taký musí spĺňať požiadavky kladené danou normou a distribučnou sústavou, do ktorej je pripojený. Zhrnutie požiadaviek

teda pozostáva z noriem STN 33 3051, STN 33 2000 – 4 – 41 a z Technických podmienok prevádzkovateľa distribučnej sústavy – VSD [2], [3], [4].

Norma STN 33 3051 určuje povinné ochrany pre hydroalternátory s inštalovaným výkonom do 1 MVA podľa Tab. 2 – [3]:

- Nadprúdová
- Preťaženie statora (norma odporúča)
- Napäťová
- Spätná wattová

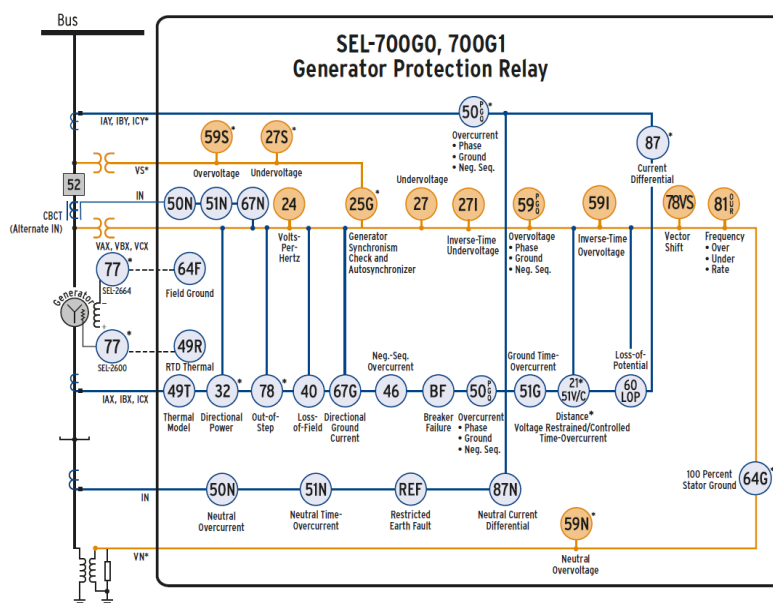
Podľa normy STN 33 3051 6.2 Ochrany hydroalternátorov musí byť inštalovaná aj ochrana proti tepelnému preťaženiu [3].

Norma STN 33 2000 – 4 – 41 určuje maximálny vypínací čas nadprúdovej ochrany pre zdroj s menovitým striedavým napätím od 230 V do 400 V. Ochranu je tiež potrebné zabezpečiť proti poruche nadprúdovými ochrannými prvkami. Ochranná funkcia vyplývajúca z tejto normy je [4]:

- Prúdová nesymetria pri zaťažení alternátora

Podľa Technických podmienok prevádzkovateľa distribučnej sústavy spoločnosti VSD (s účinnosťou od 1.4.2019), s odvolaním sa na jednotlivé typy zdrojov podľa komisie č. 2016/631, sú pre generátor potrebné nasledovné ochrany [2]:

- Napäťová v dvojstupňovom vyhotovení
- Podpäťová v dvojstupňovom vyhotovení
- Nad-frekvenčná a pod-frekvenčná



Obr. 1 Dostupné ochranné funkcie v ochrane SEL-700G [5]

Ochranné funkcie generátorovej ochrany SEL – 700G sú volené podľa veľkosti chráneného prvku, jeho dôležitosti v elektrizačnej sústave a rovnako tak výraznú úlohu zohráva ekonomický aspekt celkovej inštalácie. Ochranné funkcie sa preto volia pre konkrétnu situáciu individuálne, avšak pre označenie sa s touto ochranou je dôležité poznať jednotlivé funkcie a ich reakcie na poruchové stavy [3], [7].

III. OCHRANNÉ FUNKCIE PRE CHRÁNENIE TRANSFORMÁTORA

Poruchy transformátora sa klasifikujú ako poruchy vnútorné a poruchy priechné, resp. tie, ktoré nastávajú vplyvom pripojených zariadení k transformátoru. Pri podrobnejšom delení možno vnútorné poruchy rozdeliť na poruchy detegované okamžite a poruchy s postupným rozvíjaním. Poruchy s okamžitou detekciou delíme na [8], [9]:

1. Skraty na svorkách
2. Skraty na vinutí
3. Skraty medzi vinutiami
4. Zemné poruchy, prípadne závitové skraty terciárnych vinutí

Poruchy vznikajúce postupne možno roztriediť nasledovne [10]:

1. Nekvalitné galvanické spojenie spôsobujúce oblúky v nádobe transformátora
2. Poruchy chladenia
3. Nesprávna regulácia

Za detekciu priechných porúch zodpovedá ochrana proti preťaženiu a nadprúdová ochrana. Naopak vnútorné poruchy sú odhalené rozdielovými, nádobovými, nadprúdovými, porovnávacími, smerovými distančnými a plynovými relé. Poruchy vznikajúce postupne môže zachytiť jedine plynové relé alebo ochrana pri preťažení [7], [11].

Podľa STN 33 3051 sú odporúčané ochranné funkcie pre blokovej transformátor s výkonom $S < 1,7$ MVA podľa Tab. 7 – Blokovej transformátory nasledovne [12]:

- Nadprúdová skratová ochrana

- Plynová ochrana – je pripájaná za predpokladu, že tvorí súčasť konštrukčného vyhotovenia transformátora;
- Rozdielová ochrana – táto ochrana sa normou odporúča, nie je však nutná.

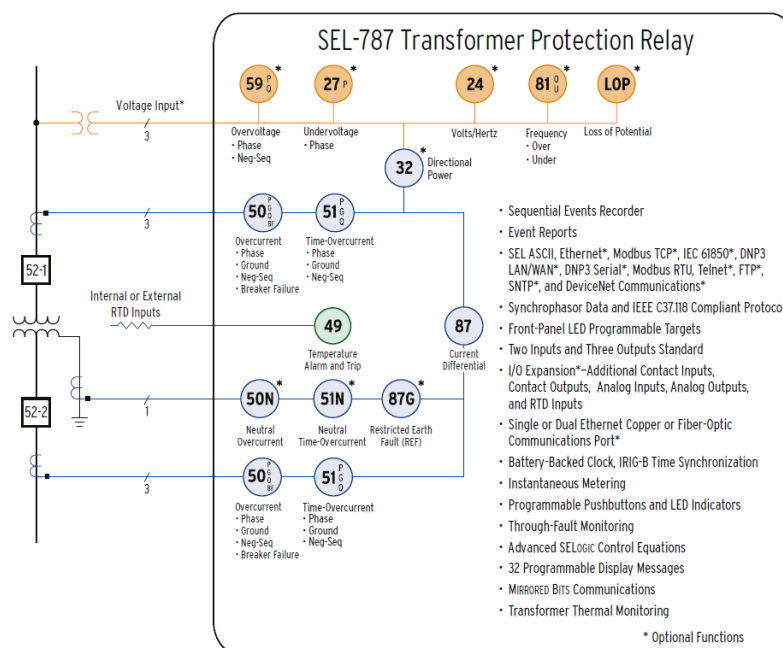
Podľa Technických podmienok prevádzkovateľa distribučnej sústavy spoločnosti VSD (s účinnosťou od 1.4.2019), s odvolaním sa na jednotlivé typy zdrojov podľa komisie č. 2016/601, sú pre transformátor T potrebné nasledovné ochrany [2]:

- Nadpätie (prepätie) 1. stupeň
- Nadpätie (prepätie) 2. stupeň
- Podpätie 1. stupeň
- Podpätie 2. stupeň
- Nadfrekvencia
- Podfrekvencia

Pri trojfázových transformátoroch je dôležité zohľadňovať zapojenie transformátora. V prípade zapojenia hviezda – trojuholník sú prúdy v primárnom vinutí posunuté o 30° oproti prúdom v sekundárnom vinutí, čo spôsobuje trvalý rozdielový prúd, pretože prístrojové transformátory sú zapojené v prívodoch a nie vo vinutiach trojuholníka. Následne musí byť zvolenie správneho zapojenia prúdových transformátorov, ktoré závisí od zapojenia chráneného transformátora [8], [9], [11].

V článku uvažujeme s transformátorom Dy1. Transformátor je zapojený na strane vyššieho napätia do trojuholníka a na strane nižšieho napätia do hviezdy s uzemneným neutrálnym uzlom. Výstupné napätie sa oneskoruje za vstupným o 30° (hodinový uhol rovnajúci sa jednej hodine). Prístrojové transformátory prúdu na strane vyššieho napätia musia byť zapojené do hviezdy a PTP na strane nižšieho napätia do trojuholníka.

SEL-787 má tri závislé diferenciálne prvky. Tieto prvky sú používané na operácie s prúdmi, ktoré vstupujú do vinutia. Je možné nastavenie diferenciálnych prvkov s jedným alebo dvoma sklonmi zakrivenia charakteristiky, ktorá vyjadruje percentuálny pomer bilančného (stabilizačného) a diferenciálneho (rozdielového) prúdu.

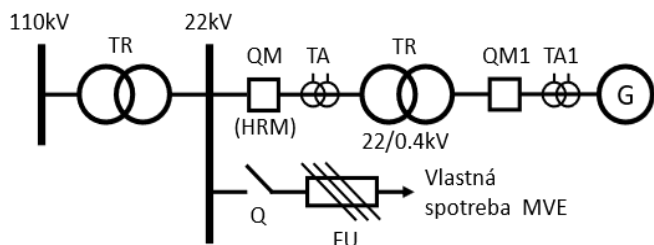


Obr. 2 Dostupné ochranné funkcie v ochrane SEL-787 [6]

IV. PARAMETRIZÁCIA SEL-700G A SEL-787

Požiadavky pre nastavenie ochrán – odpojenie zdrojov typu B od DS, vrátane zdrojov s činným inštalovaným výkonom od 100 kW do 5 MW: Podpätie 1.st. ($U <$) $0.9 \times U_f / U_n$ pri maximálnom čase vypínania (t_{max}) 0.5 s, Podpätie 2.st. ($U <$) $0.7 \times U_f / U_n$ pri maximálnom čase vypínania (t_{max}) 0.1 s, Nadpätie 1.st. ($U >$) $1.1 \times U_n$ pre t_{max} 0.5 s, Nadpätie 2.st. ($U >>$) $1.2 \times U_n$ pre t_{max} 0.1 s, Podfrekvencia ($f <$) 47.5 Hz pri t_{max} 0.1 s a Nadfrekvencia ($f >$) 51.5 Hz pri t_{max} 0.1 s.

Nastavenie nadprúdovej funkcie sa realizuje podľa rozsahu vypočítaného minimálneho skratového prúdu a maximálnej novej výroby. Ďalšou dôležitou funkciou je meranie teploty generátora a transformátora. Výrazná zmena teploty naznačuje preťažovanie alebo indikuje degradáciu izolácie vznikajúcou nadmerným teplom. V prípade opakovaného pôsobenia zvýšenia teploty nastáva umelé starnutie izolácie, čo môže viesť k výbojom v statorovom vinutí, zemným spojeniam a vnútorným skratom.



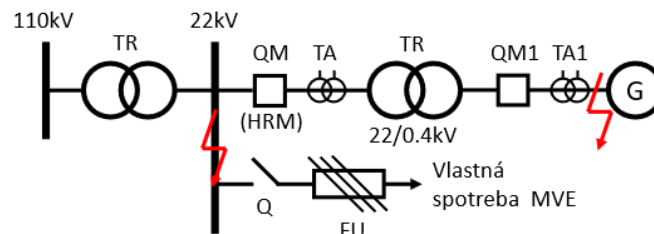
Obr. 3 Uvažovaná schéma zapojenia malej vodnej elektrárne

Parametre jednotlivých častí sú nasledovné:

Sieť: 110 kV; $S_{k3} = 1297$ MVA; $S_{k1} = 903$ MVA. Transformátor 110/22 kV: 40 MVA; $uk = 11.3$ %. Prepojovacie vedenie VN linky: $3 \times 70 \text{AlFe5}$; $l = 12.95$ km. Káblové vedenie odbočky AXEKVC

$3 \times 1 \times 240$; $l = 865$ m. Prístrojový transformátor prúdu TA: 20/5/5 A 10 VA 5P 10 a 0.5 FS5. Káblové prepojovacie vedenie od QM (HRM): $3 \times 1 \times 22$ AXEKCE 35; $l = 50$ m. Transformátor 22/04 kV: 1000 kVA; $uk = 5.8$ %; Dy1. Prístrojový transformátor prúdu TA1: 9000/5/5 A 90 VA 5P 10. Generátor: 550 kVA; $I_n = 942$ A; 50 Hz; $\cos \phi_i = 0.8$.

Výpočet skratových prúdov bol realizovaný podľa normy STN EN 60909. Podľa obr. 4 sme uvažovali pre dve miesta skratu a to pre prípojnicu 22 kV a na svorkách generátora.



Obr. 4 Uvažované miesta skratu pre parametrizáciu ochrany MVE

Pre miesto skratu na prípojnici 22 kV podľa Obr. 4 bol realizovaný výpočet skratového prúdu v súlade s normy STN EN 60909-0. Vypočítaný trojfázový rázový skratový prúd má hodnotu 19,908 kA, dvojfázový rázový skratový prúd má hodnotu 17,241 kA a jednofázový rázový skratový prúd má hodnotu 7,248 kA.

Podľa Obr. 4 je možné rozdeliť tieto prúdy podľa vetiev, z ktorých prichádzajú do miesta poruchy na prípojnici 22 kV. Príspevok trojfázového rázového skratového prúdu zo strany siete je 8,036 kA, dvojfázový rázový skratový prúd zo strany siete je 6,959 kA a jednofázový rázový skratový prúd zo strany siete je 7,15 kA. Príspevok trojfázového rázového skratového prúdu zo strany generátora je 107,1 A, dvojfázový rázový skratový prúd zo strany generátora je 92,7 A a jednofázový rázový skratový prúd zo strany generátora je 143,1 A.

Druhé uvažované miesto skratu je na svorkách generátora aj pre toto miesto skratu sa vyskytujú dve vetvy. Vypočítaný trojfázový rázový skratový prúd má hodnotu 25,378 kA, dvojfázový rázový skratový prúd má hodnotu 21,978 kA a jednofázový rázový skratový prúd má hodnotu 37,984 kA. Príspevok trojfázového rázového skratového prúdu zo strany siete je 23,579 kA, dvojfázový rázový skratový prúd zo strany siete je 20,42 kA a jednofázový rázový skratový prúd zo strany siete je 24,349 kA. Príspevok trojfázového rázového skratového prúdu zo strany generátora je 6,284 kA, dvojfázový rázový skratový prúd zo strany generátora je 5,442 kA a jednofázový rázový skratový prúd zo strany generátora je 9,213 kA.

V. VÝPOČET ROZBEHOVÝCH HODNÔT PRE OCHRANY SEL-700G A SEL-787

Digitálna ochrana SEL-700G ovláda výkonový vypínač QM1 z toho dôvodu sú pre výpočet rozbehových prúdov tejto ochrany zahrnuté hodnoty prevodu prístrojového transformátora TA1, pomocou, ktorého je realizované meranie. Hodnota prevodu prístrojového transformátora TA1 je vyjadrená podielom 1000/5 A.

Pri výpočte rozbehových prúdov pre digitálnu ochranu SEL-700G je dôležité brať do úvahy hlavne skratový prúd tečúci zo strany generátora práve v súvislosti s pôsobením na výkonový vypínač. Pri výpočte rozbehových prúdov sme uvažovali s dvojfázovým rázovým skratovým prúdom, ktorého veľkosť bol najmenšia. Rozbehový prúd vychádza po započítaní prevodu na hodnotu 10,884 A, čo predstavuje maximálnu sekundárnu hodnotu poruchového prúdu. Hodnota záťažového prúdu generátora je 923,16 A, pričom po započítaní prevodu rozbehová hodnota vychádza na hodnotu 5,181 A. Z týchto dvoch vypočítaných rozbehových hodnôt sú určené limity v ktorých sa môže vyskytovať nastavenie pre prvý stupeň preťaženia a druhý stupeň pre skraty. Prvý stupeň nadprúdovej funkcie je nastavený na hodnotu 5.5 A. Druhý stupeň nadprúdovej funkcie je nastavený na 8 A. Časové oneskorenie preťaženia prvého stupňa je 0.25 s a pre skraty druhého stupňa je 0.1 s.

Digitálna ochrana SEL-787 ovláda výkonové vypínače QM a QM1 z toho dôvodu sú pre výpočet rozbehových prúdov tejto ochrany zahrnuté hodnoty prevodu prístrojového transformátora TA a TA1, pomocou, ktorého je realizované meranie. Hodnota prevodu prístrojového transformátora TA je vyjadrená podielom 1000/5 A a hodnota TA1 je vyjadrená podielom 20/5 A. Pri určených rozbehových prúdov pre digitálnu ochranu SEL-787 je dôležité brať do úvahy hlavne nastavenie rozbehových hodnôt pre správne selektívne nastavenie vypínania poruchového prúdu. Pri výpočte rozbehových prúdov sme uvažovali s dvojfázovým rázovým skratovým prúdom. Rozbehový prúd vychádza po započítaní prevodu na hodnotu 15,452 A, čo predstavuje maximálnu sekundárnu hodnotu poruchového prúdu. Hodnota záťažového prúdu transformátora je 25,718 A, pričom po započítaní prevodu rozbehová hodnota vychádza na hodnotu 7,367 A. Z týchto dvoch vypočítaných rozbehových hodnôt sú určené limity v ktorých sa môže vyskytovať nastavenie pre prvý stupeň preťaženia a druhý stupeň pre skraty, ktorý ale musí zohľadňovať selektivitu s nastavením digitálnej ochrany SEL-700G.

Podľa dostupných parametrov pre transformátor TR boli určené nasledovné nastavenie rozdielovej ochrany: O87P je 0.867 A. Strmost' stúpania prvého stupňa SLP1 je nastavená na 30%. Strmost' druhého stupňa je nastavená na 60%. U87P je nastavené na 10A a IRS1 na hodnotu 1.5 A. Prvý stupeň nadprúdovej funkcie je nastavený na hodnotu 7.5 A. Druhý stupeň nadprúdovej funkcie je nastavený na 13

A. Časové oneskorenie preťaženia prvého stupňa je 0.5 s a pre skraty druhého stupňa je 0.2 s.

Nastavenie napäťovej ochrany je nasledovné podľa požiadaviek prevádzkovateľa distribučnej sústavy VSD: podpäťová funkcia prvý stupeň je nastavená na 90 V s časovým oneskorením 0.5 s. Druhý podpäťový stupeň je nastavený na 70 V s časovým oneskorením 0.1 s. Nadpäťová funkcia prvý stupeň je nastavený na 110 V s časovým oneskorením 0.5 s. Druhý stupeň nadpäťová funkcie je nastavený na 120 V s časovým oneskorením 0.1 s.

Nastavenie napäťovej ochrany je nasledovné podľa požiadaviek prevádzkovateľa distribučnej sústavy VSD: nad frekvenčná funkcia je nastavená na hodnote 51.5 Hz s časovým oneskorením 0.1 s. pod frekvenčná funkcia je nastavená na hodnote 47.7 Hz s časovým oneskorením 0.1 s.

VI. ZÁVER

Cieľom príspevku bolo poukázať na problematiku parametrizácie ochranných relé pre obnoviteľné zdroje energie, kde sme riešili parametrizáciu malej vodnej elektrárne. Výpočet skratových pomerov je realizovaný pre konkrétne zapojenie v prípade, že sa nepočíta s vlastnou spotrebou malej vodnej elektrárne. Ochrany SEL-787 a SEL-700G vyhovujú inštalácii podľa uvedenej schémy a sú z elektrotechnického hľadiska vhodné pre chránenie objektu malej vodnej elektrárne. Vďaka ich aplikácii možno splniť aj podmienky prevádzkovateľa distribučnej sústavy, a tak je možné získať spoľahlivo chránený zdroj elektrickej energie. Z pohľadu vývoja tejto tematiky je zaujímavé riešiť chránenie objektu voči sústave v prípade, že je sústava nejakým spôsobom narušená, a tým je znížená kvalita elektrickej energie a parametrov, ktoré ju definujú. Preto by bolo potrebné riešiť ochrany z pohľadu ostrovnej prevádzky, skratových pomerov, ktoré by tam následne vznikli, a celkovej stability takejto sústavy, kedy jeden lokálny zdroj napája lokálnu sieť, ktorá vznikne rozpadom elektrizačnej sústavy. Z tohto dôvodu je potrebný ďalší vývoj a úprava parametrov nastavenia digitálnych ochrán pri vytváraní mikrosietí a inteligentných sietí, kde zmeny v nastavení budú nevyhnutné pričom sa bude meniť aj samotný postup výpočtov pre nastavenie rozbehových hodnôt.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0576 a APVV-21-0312 a Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied (VEGA) v rámci projektu č. 1/0757/21.

LITERATÚRA

- [1] J. Trnavský, "Malé vodné elektrárne na území Slovenska," [Online], [Dátum: 13.9.2023] Dostupné na internete: <<https://www.energie21.cz/male-vodne-elektrarne-na-uzemi-slovenska/>>.
- [2] VSD, a.s., "Technické podmienky prevádzkovateľa distribučnej sústavy – Východoslovenská distribučná, a.s.," VSD a.s., Košice, 2019, pp. 86.
- [3] STN 33 3051: 1992, "Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení," pp. 21.
- [4] STN 33 2000-4-43: 2004. "Elektrické inštalácie budov – časť 4: Zariadenie bezpečnosti – kapitola 43: Ochrana pred nadprúdom," 1997.
- [5] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., "SEL-700G Family od Generator and Intertie Protection Relays," Data Sheet, 2019, pp. 24.
- [6] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., "SEL-787 Transformer Protection Relay," Data Sheet, 2019, pp. 24.
- [7] V. Chladný, F. Janiček, A. Belán, "Digitálne ochrany v elektrizačných sústavách," Mercury – Smékal, Košice, 2003, pp. 205. ISBN 80-89061-73-7.

- [8] P. Dohnálek, "Provoz a údržba ochran v energetice," STNL, Praha 1989, pp. 308.
- [9] F. Janiček, V. Chladný, A. Belán, Ž. Eleschová, "Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave," Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004, pp. 360, ISBN 80-227-2135-2.
- [10] P. Dohnálek, "Ochrany pro průmysl a energetiku," STNL/ALFA, Praha, 1991.
- [11] P. Dohnálek, "Technika ochrán," STNL/ALFA Praha, 1978, pp. 141.
- [12] STN 33 3051: 1992, Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení, pp. 21.
- Zsolt Čonka, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, zsolt.conka@tuke.sk
- Marek Bobček, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, marek.bobcek@tuke.sk
- Daniel Kurpaš, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, daniel.kurpas@student.tuke.sk

ADRESY AUTOROV

Róbert Štefko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, robert.stefko@tuke.sk

Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, michal.kolcun@tuke.sk