

## Rozdielová ochrana transformátora a analýza jej činnosti pri abnormálnych dejoch v elektrizačnej sústave

Heretík Pavol · Elektrotechnika

23.01.2013



Tento príspevok sa zaoberá činnosťou rozdielových resp. diferenciálnych ochrán transformátorov pri prechodných a poruchových dejoch v elektrizačnej sústave. Pozornosť je hlavne venovaná definovaniu základných princípov týchto prvkov elektrizačnej sústavy a opisu charakteristík popisujúcich ich správanie.

Ďalej sa práca zaoberá analýzou vplyvu výkonových transformátorov na rozdielové ochrany a objasnenie príčin vzniku udalostí spôsobujúcich chybné, neselektívne pôsobenie týchto ochrán pri abnormálnych dejoch v elektrizačnej sústave. V rámci tohto príspevku boli uvedené aj opatrenia minimalizácie a postupy zamedzenia vzniku negatívnych vplyvov, ktoré môžu spôsobiť chybnú činnosť týchto ochrán.

### 1. Rozdielová ochrana

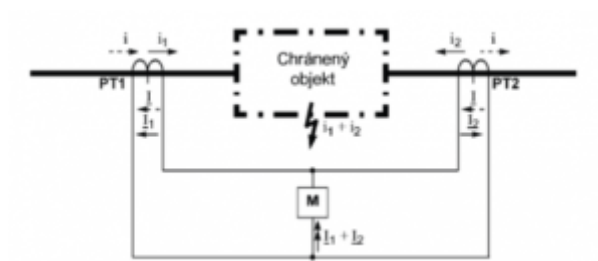
Elektrická ochrana je jednou zo súčastí systému chránenia. Úlohou elektrickej ochrany je na základe vstupných informácií a nastavených parametroch rozhodnúť, či ide o poruchový alebo dovolený prevádzkový stav. Na základe identifikácie poruchového stavu vo vnútri chráneného objektu musí dať elektrická ochrana povel na vypnutie, resp. musí signalizovať abnormálny prevádzkový stav obsluhu. Od elektrických ochrán sa žiada, aby presne pôsobili vo vymedzených zónach tak, aby bezporuchové časti elektrizačnej sústavy zostali vždy v prevádzke, resp., aby následky porúch boli eliminované na čo najmenšiu mieru.

Rozdielová ochrana reprezentuje hlavnú ochranu zariadenia. Je založená na prúdovom porovnaní a je vhodná pre chránenie transformátorov, generátorov, motorov, tlmiviek, krátkych vedení (aj s odbočkami) a (pri dodržaní dostupného počtu analógových prúdových vstupov) prípojnic. Možno chrániť aj bloky generátor-transformátor.

### 2. Základné princípy rozdielovej ochrany

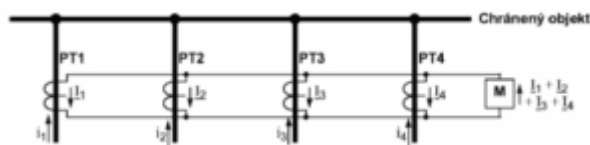
Rozdielová ochrana je založená na porovnaní prúdu. Využíva tú skutočnosť, že chránený objekt (obr. 1.) pri bezporuchovej prevádzke prenáša vždy rovnaký prúd i (čiarkovaný) na oboch svojich stranách. Tento prúd vteká do jednej strany príslušnej zóny a opúšťa ju na druhej strane. Rozdiel v znamienkach prúdov je jasnou indikáciou poruchy v tejto zóne. Ak sú skutočné prevody prúdových transformátorov rovnaké,

sekundárne vinutia prúdových transformátorov PT1 a PT2 na stranách chráneného objektu možno zapojiť tak, aby vytvorili uzavretý elektrický obvod so sekundárnym prúdom  $I$ ; merací článok M, ktorý je zapojený v bode elektrického vyrovnania (rovnováhy) ostáva za bezporuchovej prevádzky na nulovom prúde.



Obr. 1. Princíp rozdielovej ochrany

Keď sa v chránenej zóne ohraničenej prúdovými transformátormi objaví porucha, do meracieho článku tečie prúd  $I_1 + I_2$ , ktorý je úmerný poruchovému prúdom  $i_1 + i_2$  tečúcim z oboch strán. Výsledkom je, že jednoduchý obvod zobrazený na (obr. 1.) zaisťuje spoľahlivé vypnutie ochranou, ak je prúd tečúci počas poruchy do chránenej zóny dostatočne vysoký pre nabehnutie meracieho článku M. Pri chránených objektoch s tromi alebo viacerými stranami alebo pri prípojniciach sa princíp rozdielovej ochrany rozšíri v tom, že súčet všetkých prúdov vtekajúcich do chráneného objektu je počas bezporuchovej prevádzky nulový, zatiaľ čo v prípade poruchy sa súčet rovná poruchovému prúdu.



Obr. 2. Princíp rozdielovej ochrany pre štyri vývody (jednofázové zobrazenie)

## Prúdové blokovanie

Keď externé poruchy spôsobujú vysoké prúdové toky cez chránenú zónu, rozdiely v magnetizačných charakteristikách prúdových transformátorov PT1 a PT2 (obr. 2.) v stave presýtenia môžu spôsobiť tok nezanedbateľného prúdu cez merací článok M. Ak veľkosť tohto prúdu leží nad prahom pôsobenia, ochrana vydá vypínací signál aj keď porucha nie je v chránenej zóne. Takémuto chybnému pôsobeniu sa predchádza prúdovým blokováním (prúdovou stabilizáciou).

V systémoch rozdielových ochrán pre chránené objekty s dvomi koncami sa blokujúca veličina zvyčajne odvodzuje z prúdového rozdielu alebo z aritmetického súčtu. Obidve metódy sú rovnocenné v relevantných rozsahoch stabilizačných charakteristík. V systémoch rozdielových ochrán pre chránené objekty s tromi alebo viacerými koncami, napr. viacvinutové transformátory alebo prípojnice, je možné iba blokovanie aritmetickým súčtom. Pre štyri meracie miesta platia nasledujúce definície. Rozdielový alebo diferenciálny prúd:

$$I_{dif} = |I_1 + I_2 + I_3 + I_4| \quad (1)$$

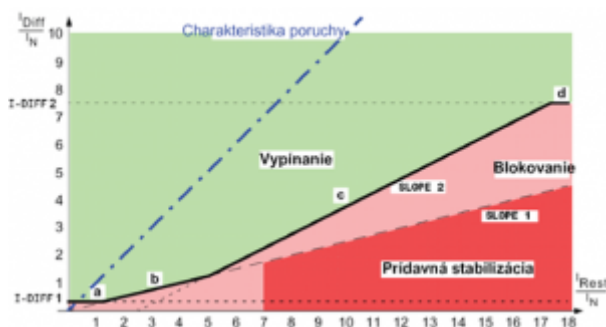
Stabilizačný alebo blokujúci prúd:

$$I_{rest} = |I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4| \quad (2)$$

$I_{Dif}$  sa počíta zo základnej harmonickej meraných prúdov a vytvára vypínaciu veličinu,  $I_{rest}$  pôsobí proti nej.

### Vypínacia charakteristika

Rozdielová ochrana porovnáva veličiny  $I_{Dif}$  a  $I_{Rest}$  s pracovnou charakteristikou podľa (Obr. 3.) Ak je výsledkom týchto veličín miesto vo vypínacej oblasti, dôjde k vydaniu vypínacieho signálu.



Obr. 3. Vypínacia charakteristika rozdielovej ochrany

Obr. 3. ilustruje kompletnú vypínaciu charakteristiku rozdielovej ochrany. Úsek a reprezentuje prah citlivosti rozdielovej ochrany (nastavenie I-DIF 1) a zohľadňuje konštantnú prúdovú chybu, napr. magnetizačné prúdy. Úsek b zohľadňuje prúdovo úmerné chyby, ktoré môžu vyplývať z transformačných chýb hlavných PT, vstupných prúdových transformátorov ochrany alebo z prúdovej chyby spôsobenej pozíciou prepínača odbočiek napätového regulátora.

V rozsahu vysokých prúdov, ktoré môžu vyvolať presýtenie prúdových transformátorov, sa uplatňuje úsek c so silnejšou stabilizáciou. Rozdielové prúdy nad úsekom d spôsobia okamžité vypnutie bez ohľadu na veľkosť blokovania a obsah vyšších harmonických (nastavenie I-DIF 2). Je to oblasť „rýchleho neblokovaného vypnutia pri poruchách s vysokými prúdmi“.

### 3. Rozdielová ochrana pri abnormálnych stavoch ES

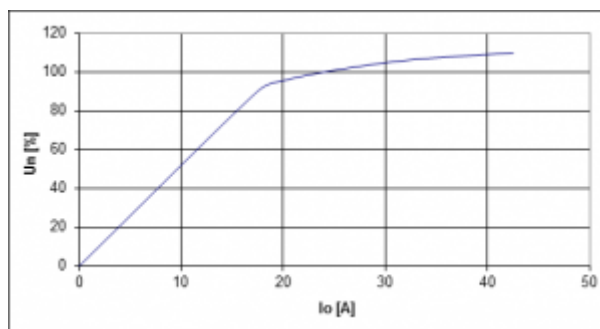
Opísaná rozdielová ochrana rešpektuje popísané malé hodnoty rozdielového prúdu, ktoré vznikajú počas normálneho zaťaženia alebo počas vonkajších porúch, pri správne nastavených parametroch ochrany. Avšak pri prevádzke transformátora vznikajú niektoré ďalšie javy, ktoré spôsobujú značné rozdielové prúdy. Tieto falošné rozdielové prúdy zvyčajne postačujú na chybné pôsobenie ochrany, ak nie sú použité isté opatrenia popísané v nasledujúcej kapitole. Ďalej v nasledujúcom texte budú popísané účinky vybraných javov (magnetizačný prúd pri zapnutí transformátora, prebudení transformátor a prechod skratových prúdov pri vonkajších poruchách) na činnosť rozdielovej ochrany.

#### 3.1 Magnetizačný prúd pri zapnutí transformátora

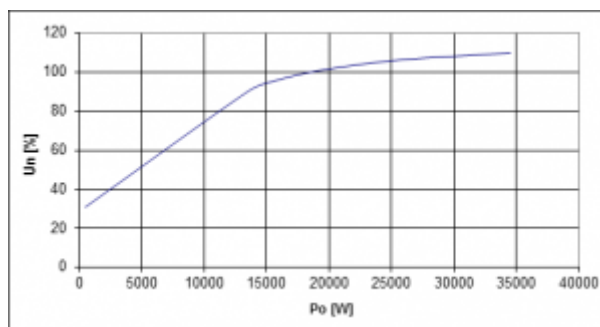
Uvažujme transformátor ETD, ER35M-0 s nasledovnými parametrami:

- $S_n = 63 \text{ MVA}$
- $U_{n1}/U_{n2}/U_{n3} = 110 \pm 8 \times 25 \text{ kV} / 35 \text{ kV} / (6,3) \text{ kV} - 6,3 \text{ kV}$  je vyrovnávací vinutie, ktoré nie je vyvedené
- Zapojenie YNyn0/(d)
- $i_0 = 0,06\%$
- $P_o = 23,3 \text{ kW}$
- $P_k = 202 \text{ kW}$

Z merania naprázdno sme získali magnetizačnú charakteristiku daného transformátora:

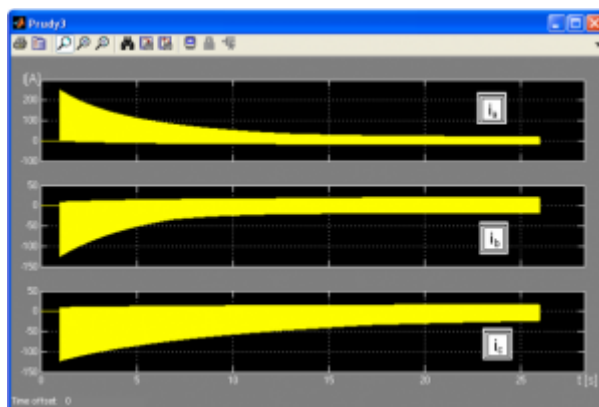


Obr. 4. Magnetizačná charakteristika transformátora  $U=f(I_0)$  ETD: ER35M-O



Obr. 5. Magnetizačná charakteristika transformátora  $U=f(P_o)$  ETD: ER35M-O

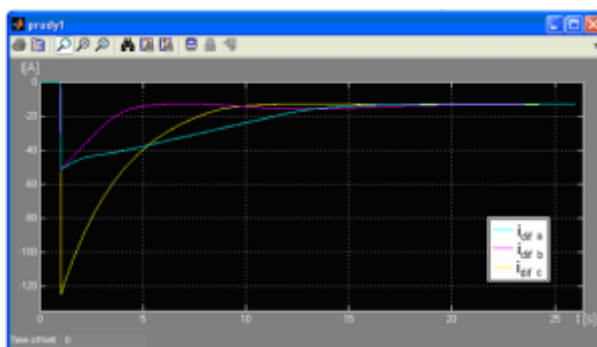
Simulujme daný transformátor v stave naprázdno, pri zapnutí na nominálne napätie z primárnej strany v čase  $t = 1 \text{ sek}$ . Poznámka: Neuvažujeme remanentný magnetizmus respektíve počiatkový magnetický tok  $\phi_A = \phi_B = \phi_C = 0$ .



Obr. 6. Priebeh primárnych prúdov pri zapnutí transformátora ETD: ER35M-O

Magnetizačný náraz pri zapnutí môže trvať pri moderných typoch transformátorov aj niekoľko sekúnd ako to je vidno na obr. 6. (ustálenie až po cca. 20 sekundách), pričom prúdy môžu v určitých prípadoch dosiahnuť až takmer nominálnych hodnôt. Prúdy pri

zapínacom náraze transformátora sú rozdielové prúdy ochrany ( $I_{dif}$ ), keďže tečú len v primárnom vinutí transformátora. (Transformátor sa uvádza do prevádzky takmer výlučne v stave naprázdno). Ako je vidieť na obr. 7. je zrejme že tento rozdielový prúd pri zapnutí transformátora v stave naprázdno bude mnohonásobne prevyšovať nastavenie ochrany, odvodené od ustáleného rozdielového prúdu ochrany ( $I_{dif}$ ):

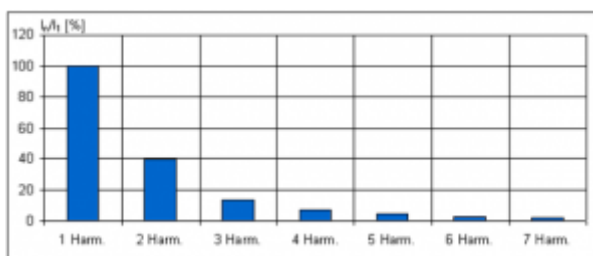


Obr. 7. Priebeh rozdielového prúdu ochrany pri zapnutí transformátora (Efektívna hodnota primárnych prúdov transformátora)

Všetky moderné, digitálne, rozdielové ochrany predchádzajú nežiadúcemu pôsobeniu pri zapínacom náraze transformátora využitím toho, že nárazový prúd je bohatý na harmonické zložky (viď Obr. 8.), zatiaľ čo poruchový prúd obsahuje len základnú harmonickú a klesajúcu jednosmernú zložku.

#### Harmonické spektrum prúdu pri zapnutí transformátora.

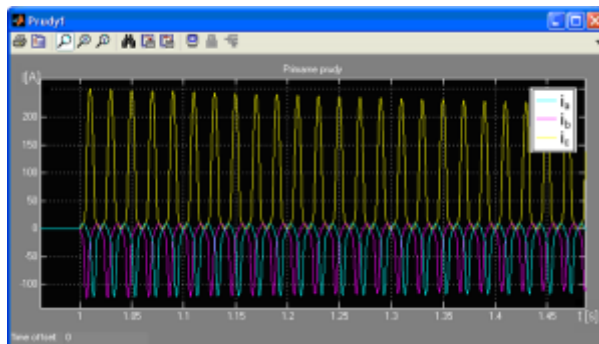
Vyššia harmonická (n)	1 Harm.	2 Harm.	3 Harm.	4 Harm.	5 Harm.	6 Harm.	7 Harm.
$I_n/I_1$ [%]	100.00	40.00	12.98	7.37	4.62	2.78	2.27



Obr. 8. Harmonické spektrum prúdov z Obr. 9.

Poznámka: Keďže v tejto simulácii ide o prechodný dej, tak pri zobrazení harmonického spektra zapínacieho prúdu uvažujeme maximálne, okamžité dosiahnuté hodnoty vyšších harmonických.

Zapínací prúd môže dosahovať násobky menovitého prúdu a je charakteristický značným obsahom 2. harmonickej (viď nasledujúci obr. 9.), ktorá prakticky chýba v prípade skratu. Ak obsah 2. harmonickej prekročí nastaviteľný prah, rozdielová ochrana sa zablokuje. Okrem druhej harmonickej možno pre blokovanie zvoliť aj inú harmonickú. Ale väčšinou sa používa druhá pretože tretia a piata sú vhodné na detekovanie prebudenia výkonového transformátora (viď nasledujúca podkapitola) a vyššie (7., 9., .11., ..) sú citlivé na rušenie vplyvom ES.



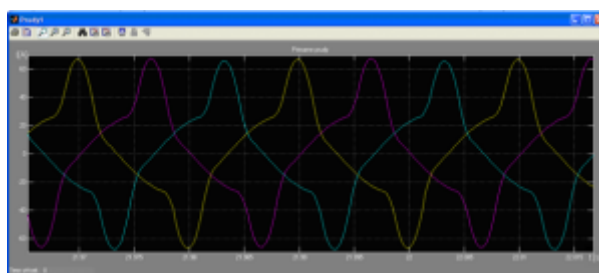
Obr. 9. Detail zapínacieho prúdu z Obr. 6

### 3.2 Prebudenie transformátora

Jeden z javov, ktorý môže spôsobovať chybné pôsobenie ochrany je prebudenie transformátora. Tento jav je spojený s vlastnosťami transformátorových plechov, respektíve s nelinearitou magnetického obvodu transformátora a vytvára negatívny vplyv na pôsobenie rozdielovej ochrany. Prebudenie výkonového transformátora je dej súvisiaci so stavom v sústave, keď napätie dosahuje maximálnych hodnôt, keďže pre magnetický tok (primárneho resp. sekundárneho vinutia) transformátora platí vzťah:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{1}{N_1} \int u_{i1} dt + K_1 \\ \phi_2 &= \frac{1}{N_2} \int u_{i2} dt + K_2\end{aligned}\quad (3)$$

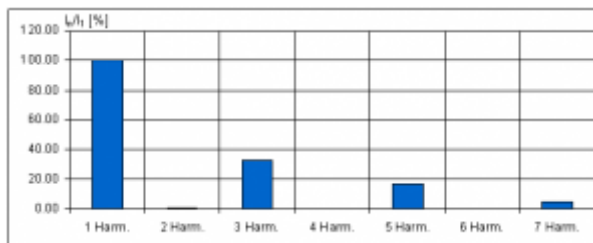
Takéto stavy vznikajú v elektrickej sústave v krajných prípadoch, keď je sústava enormne odľahčená a napäťové regulátory (generátora) nezareagovali alebo pri javoch súvisiacich s prepätiami (ferorezonancia, zemné spojenia). Simulujme transformátor z predchádzajúcej podkapitoly v stave naprázdno, ktorý je napájaný harmonickým napätím 121kV:



Obr. 10. Priebeh prúdov prebudeného výkonového transformátora

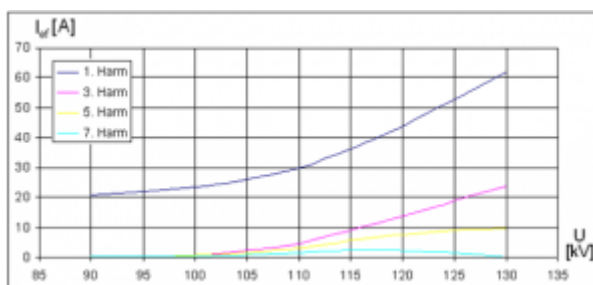
Harmonické spektrum prúdu prebudeného výkonového transformátora.

Vyššia harmonická (n)	1 Harm.	2 Harm.	3 Harm.	4 Harm.	5 Harm.	6 Harm.	7 Harm.
$I_n/I_1$ [%]	100.00	0.50	32.45	0.25	17.23	0.14	4.84

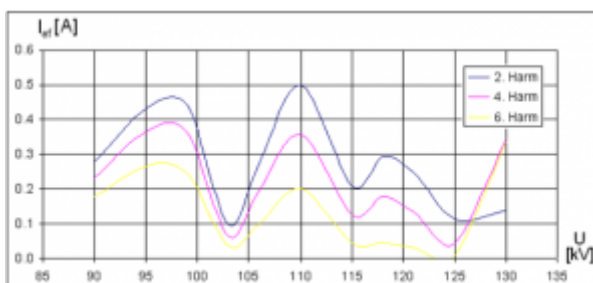


Obr. 11. Harmonické spektrum prúdov z obr. 10.

Magnetický obvod transformátora má nelineárne vlastnosti, inak povedané jeho priečna admitancia je nelineárna závislosť podľa (obr. 4.). A tak pri hodnotách magnetického toku blížiacim sa kolenu magnetizačnej charakteristiky sa stáva akoby generátorom vyšším harmonických prúdov (3., 5., 7., ... viď obr. 11.) Tento účinok je ešte zreteľnejší pri ostrejšom zakrivení magnetizačnej charakteristiky pri moderných transformátorových plechoch, rovnako ako aj pri vyšších hodnotách magnetického toku:

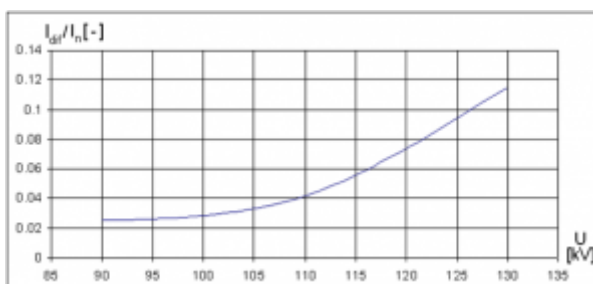


Obr. 12. Vplyv magnetického toku transformátora na harmonické spektrum prúdu.  
(Nepárne harmonické)



Obr. 13. Vplyv magnetického toku transformátora na harmonické spektrum prúdu.  
(Párne harmonické)

Keďže rozdielová ochrana pracuje s exaktnou hodnotou prvej harmonickej, tak takýto skreslený priebeh prúdu má negatívny vplyv na jej pôsobenie, ako to možno vidieť na nasledujúcom obr. 14.:



Obr. 14. Vplyv magnetického toku transformátora na rozdielový prúd ochrany

Z toho dôvodu musí byť rozdielová ochrana chránená pred prebudením

transformátora. Ako to už bolo vysvetlené v úvode kapitoly, na detekciu a následné blokovanie ochrany sa používa obsah piatej harmonickej prúdu, zreteľný z harmonického spektra prúdu prebudeného transformátora na (obr. 11 resp. obr. 12.). (Tretia harmonická sa nepoužíva z dôvodu absencie pri trojuholníkových zapojeniach transformátora).

### 3.3 Prechod skratových prúdov pri vonkajších poruchách

Pri niektorých vnútorných a vonkajších poruchách, keď pretekajú veľké prúdy vinutiami transformátora, je veľká pravdepodobnosť, že dôjde k saturácii prúdových transformátorov. To znamená, že prúdy v sekundárnych vinutiach PTP obsahujú značné množstvo harmonických, pričom prevláda tretia harmonická podobne ako pri prebudení výkonových transformátorov. Musíme si uvedomiť, že rozdielové ochrany pracujú s exaktnou hodnotou efektívnej hodnoty striedavého prúdu. Potom aj malá chyba, spôsobená presýtením, môže spôsobiť chybnú funkciu ochrany. Toto treba brať do úvahy pri nastavovaní blokovania ochrany proti účinkom presýtenia pri využití tretej harmonickej, aby ochrana chybne nepôsobila počas vonkajších porúch.

## 4. Záver

Cieľom tohto príspevku bolo zameranie sa na problematiku chránenia výkonových transformátorov rozdielovými ochranami, vytvorenie a analýza simulácií vplyvu výkonových a prístrojových transformátorov na tieto ochrany. V úvode je uvedená teória, ktorá popisuje základné princípy najpoužívanejších rozdielových ochrán z oblasti výkonovej energetiky a následne boli uvedené parametre konkrétneho transformátora potrebného pre nasledujúcu analýzu rozdielových ochrán.

Následne boli vyhotovené simulácie vplyvu parametrov výkonových transformátorov na činnosť týchto ochrán za normálnej prevádzky ale hlavne boli odsimulované niektoré javy spôsobujúce neselektívnu činnosť týchto ochrán pri abnormálnej prevádzke pričom výsledkom boli sformulované závery a opatrenia pre zabezpečenie správnej funkcie týchto ochrán. Analýza vplyvu výkonových a prístrojových transformátorov na rozdielové ochrany je výbornou spätnou väzbou pre objasnenie príčin vzniku udalostí spôsobujúcich chybné, neselektívne pôsobenie týchto ochrán. Avšak, iba vypracovanie takejto analýzy nestačí. V rámci tohto príspevku boli uvedené aj opatrenia a postupy zamedzenia vzniku negatívnych vplyvov, ktoré môžu spôsobiť chybnú činnosť týchto ochrán.

## Literatúra

1. JANÍČEK, F., CHLADNÝ, V., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž.,: Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave, STU Bratislava 2004.
2. TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P.,: Přechnodné jvy v elektrizačných soustavách, SNTL/ALFA Praha 1987.
3. JANÍČEK, F., ARNOLD, A., GORTA, Z.: Elektrické Stanice, STU Bratislava, 2001.
4. HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M., HUDÁK, P.,: Meranie a modelovanie elektrických strojov, ŽU Žilina 2009.
5. HERETÍK, P.,: Vplyv parametrov výkonových a prístrojových transformátorov na činnosť diferenciálnych ochrán. Diplomová práca. Fei. STU Bratislava 2012.



- 
6. HÜTTNER, L., KLUG, L.,: Elektrické stroje, STU Bratislava 2005.
  7. BERMANN, J.,: Transformátory proudu pro rychlé ochrany, Měření a regulace, 1970, č. 2.
  8. BAŠTA, J., CHLÁDEK, J., MAYER, I.,: Teorie elektrických strojů, SNTL/ALFA Praha 1968.
  9. HRUŠKOVIC, L.,: Elektrické stroje, STU Bratislava 1999.
  10. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL/ALFA Praha 1978.
  11. Katalógy počítačových ochrán firmy Siemens.
  12. Katalogy ochrán ABB ASEA Brown Boveri.
  13. Katalógy počítačových ochrán firmy SEL.
  14. Katalógy počítačových ochrán firmy Beckwith Electric Co. Inc.
- 

Spoluautorom článku je Ing. Matúš Kováč

---