

Dimenzovanie prístrojových transformátorov prúdu pre rýchle ochrany

Beláň Anton · Elektrotechnika

30.11.2012



Tento príspevok sa zaoberá stanovením postupu pre určenie vhodných parametrov istiacich, prístrojových transformátorov prúdu pre rýchle, rozdielové resp. distančné ochrany. Pozornosť je venovaná objasneniu fyzikálnej podstaty popisujúcej správanie týchto prvkov elektrizačnej sústavy a následné odvodenie matematického modelu reprezentujúceho chovanie prístrojového transformátora prúdu. Ďalej sa práca zaoberá syténím, respektíve saturáciou prístrojového transformátora prúdu a jeho vplyvu na zariadenia zapojené na sekundárnej strane prístrojového transformátora.

1. Úvod

Prístrojové transformátory prúdu (PTP) napájajú prúdové systémy meracích, istiacich a regulačných prístrojov. Ich primárna strana sa zapojí do série so silnoprúdovým zariadením, ktorého prúd potrebujeme merať. Na sekundárnu stranu PTP sa zapoja potrebné sekundárne prístroje. Vysoké nadprúdové číslo spolu s väčším výkonom PTP výrazne zvyšuje ekonomické náklady na tieto transformátory. V rámci minimalizácie investičných nákladov je potrebné určiť minimálne nároky na parametre prístrojových transformátorov prúdu, zaručujúcich správnu funkciu týchto zariadení.

2. Dimenzovanie PTP pre klasické ochrany

Medzi hlavné úlohy pre projektanta pri dimenzovaní PTP patrí:

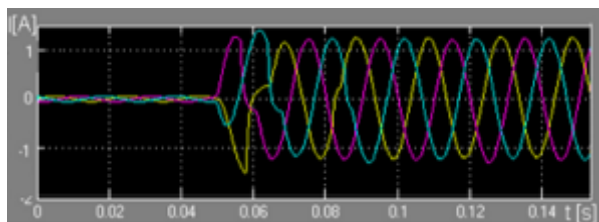
Stanovenie menovitého výkonu a nadprúdového čísla. Zistením maximálneho skratového prúdu a jeho pomer k menovitému. Potrebný výkon PTP určíme zo súčtu príkonov ochrán.

$$\sum_{SN-PTP} > \sum_{ochr.}$$

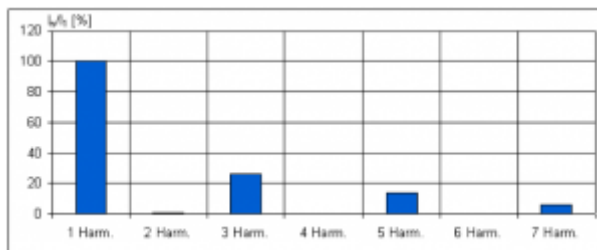
Určenie menovitého vstupného a výstupného prúdu (prevod PTP): I_{n1}/I_{n2} (Prevod PTP sa určí na základe menovitých prúdov objektu a ochrán)

Volba požadovanej presnosti. (Presnejšie PTP sa používajú na účely merania, PTP pre rýchle rozdielové ochrany musia byť presné najmä v nadprúdovej oblasti)

Pri klasickom dimenzovaní sa PTP transformátor počas prechodného deja v ES presýti. To má za následok skreslenie sekundárneho prúdu PTP na čas zvyčajne rádovo jednotiek periód (viď obr. 1.), čo pri rýchlych diferenciálnych ochránach spôsobí nesprávnu funkciu ochrany.



Obr. 1. Prúdy ochrany pri presýtení PTP.



Obr. 2. Harmonické spektrum presýteného prúdu PTP v okamihu maximálneho skreslenia

V harmonickom spektre prúdu presýteného PTP sa v značnej miere nachádza tretia a piata harmonická. Tento poznatok sa využíva ako spôsob detekcie presýtenia PTP a následné blokovanie týchto ochrán. [11] [12] [13] [14]

3. Požiadavky na PTP pre rýchle ochrany

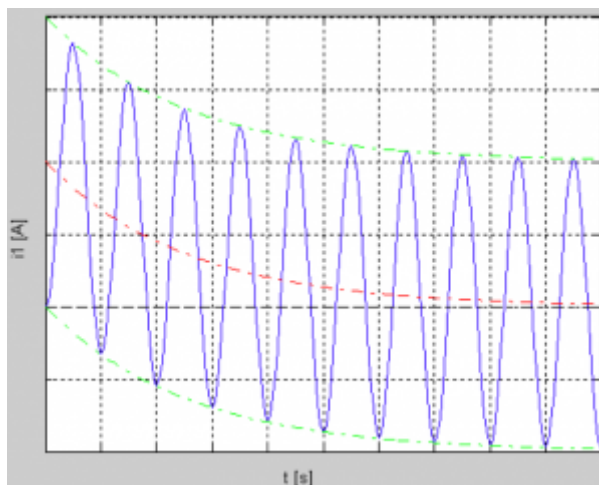
Ako bolo ukázané, klasické dimenzovanie prístrojových transformátorov prúdu je pri rýchlych diferenciálnych resp. dištančných ochránach nepostačujúce. Nasledujúca kapitola bude zameraná na odvodenie požiadaviek pre PTP rýchlych ochrán.

Primárny prúd

Pri každej zmene konštantných veličín v elektrickej sieti s indukčnosťou a odporom (napr. skrat v sieti vvn), vzniká jednosmerná zložka prúdu. Zdroj striedavého napätia pôsobí na obvod s celkovým odporom R a indukčnosťou L :

$$i_1(t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{U \cdot e^{j\varphi}}{R + j\omega L} \left(e^{j\omega t} - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right\} \quad (1)$$

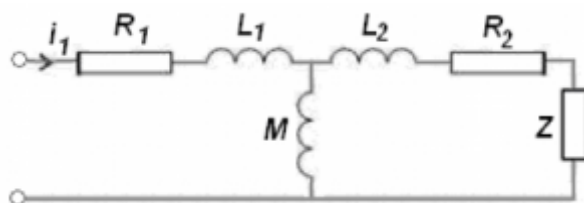
$$i_1(t) = \operatorname{Re} \left\{ I \left(e^{j\omega t} - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right\} \quad (2)$$



Obr. 3. Primárny prúd PTP $i_1(t)$, s časovou konštantou siete T_1

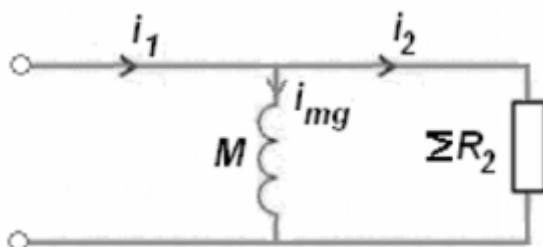
Sekundárny prúd

Prúd $i_1(t)$ sa dostáva k ochrane cez prúdový transformátor podľa schémy na (Obr. 4.) kde R_1 , R_2 predstavujú odpory jednotlivých vinutí, L_1 a L_2 rozptylové indukčnosti, M vzájomnú indukčnosť (L_h), a Z záťaž.



Obr. 4. Náhradná schéma PTP

Pri prístrojových transformátoroch prúdu väčšinou platí že vzájomná indukčnosť je oveľa väčšia ako záťaž ($M \gg Z$). V súčasnosti je tento rozdiel ešte zreteľnejší pretože spotreby moderných ochrán sú ešte menšie. A tak hlavné zaťaženie PTP je v prívodoch od transformátora prúdu k ochrane a v sekundárnom vinutí tohto transformátora.



Obr. 5. Zjednodušená náhradná schéma PTP

Na základe náhradnej schémy z (Obr. 5.) môžeme písať:

$$\sum R_2 i_2 = M \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right) \quad (3)$$

$$i_2 = T_2 \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right) \quad (4)$$

Derivácia primárneho prúdu zo vzťahu (4) je:

$$T_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 = T_2 I \left(j\omega e^{j\omega t} - \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \quad (5)$$

Všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice podľa vzťahu (5.6) je:

$$i_2(t) = A.e^{-\frac{t}{T_2}} + B.e^{j\omega t} + C.e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (6)$$

A,B,C - koeficienty dif. rovnice. Dosadením počiatočnej podmienky a úpravou získavame vzťahy:

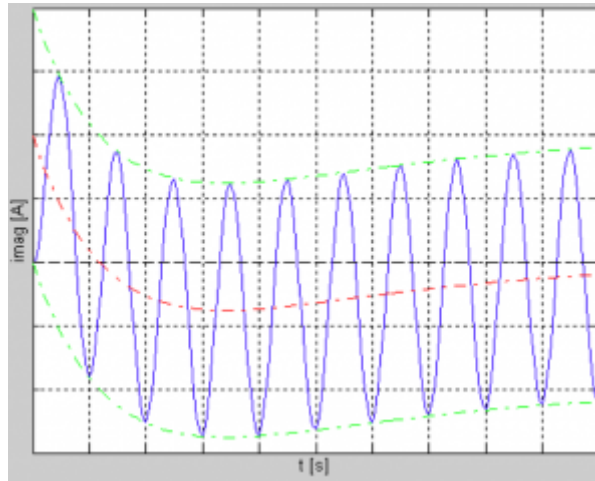
$$A = \frac{-j\omega T_2 I}{1+j\omega T_2} + \frac{T_2 I}{T_1 - T_2} \quad (7)$$

$$B = \frac{j\omega T_2 I}{1+j\omega T_2} \quad (8)$$

$$C = \frac{T_2 I}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

Dosadením koeficientov (7,8,9) do vzťahu (6) dostávame vzťah pre sekundárny prúd PTP:

$$i_2(t) = I \left(\frac{j\omega T_2}{1+j\omega T_2} \cdot e^{j\omega t} - \frac{j\omega T_2}{1+j\omega T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right) \quad (10)$$



Obr. 6. Priebeh sekundárneho prúdu $PTP_{i_2}(t)$

Magnetizačný prúd PTP

Sekundárny prúd PTP (10) z predchádzajúcej kapitoly je odlišný od primárneho o prúd magnetizačný:

$$i_{mg}(t) = i_1(t) - i_2(t) \quad (11)$$

Keďže magnetizačný prúd spôsobuje rozdielnosť medzi primárnym a sekundárnym prúdom (spôsobuje chybu PTP), našou úlohou je obmedzenie tohto prúdu. Dosadením vzťahov (1) a (10) do (11) a následnou úpravou dostávame vzťah pre magnetizačný prúd:

$$i_{mg}(t) = I \left(\frac{1}{1+j\omega T_2} \cdot \left(e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} + e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right) \quad (12)$$

Striedavá zložka magnetizačného prúdu:

$$i_{mg_St}(t) = I \frac{1}{1+j\omega T_2} \cdot e^{j\omega t} \quad (13)$$

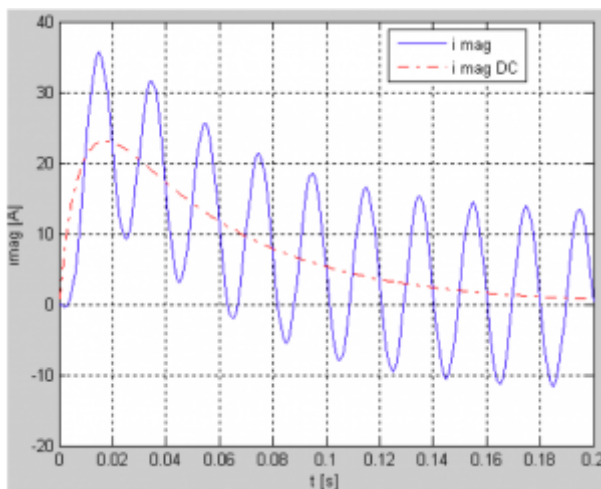
Jednosmerná zložka magnetizačného prúdu:

$$i_{mg_DC}(t) = I \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} + e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (14)$$

Poznámka: Striedavá a jednosmerná zložka magnetizačného prúdu sú odvodené pri

zanedbaní.

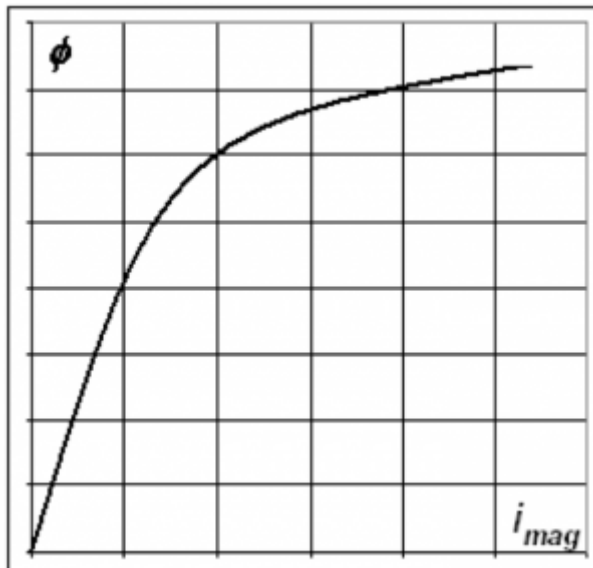
$$\frac{1}{\omega T_2} \ll \frac{T_1}{T_1 - T_2} \omega T_2 \gg 1 \quad (15)$$



Obr. 7. Priebeh magnetizačného prúdu PTP $i_{mg}(t)$

4. Sýtenie PTP

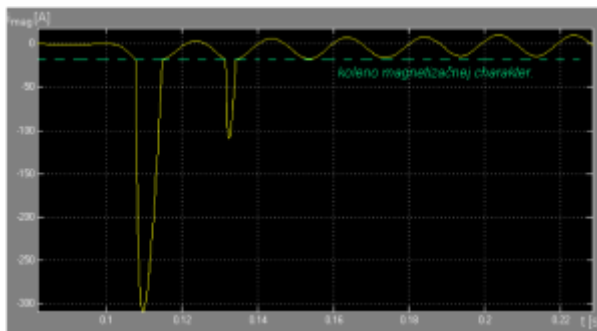
Priebeh magnetizačného prúdu podľa obr. 6 je možný iba pri ideálnom PTP (lineárna magnetizačná charakteristika). V skutočnosti sa pri istej hodnote magnetizačného prúdu, prúdový transformátor nasýti a ďalším zvyšovaním tohto prúdu rastie magnetický tok a teda aj napätie sekundárnej strany iba minimálne.



Obr. 8. Magnetizačná charakteristika reálneho PTP

Priebeh reálneho magnetizačného prúdu zo simulácie prístrojového transformátora prúdu v prostredí Matlab-Simulink s uvažovaním reálnej magnetizačnej charakteristiky je zobrazený na obr. 8. Z daného priebehu je zrejmé, že magnetizačný prúd po prekročení kolena magnetizačnej charakteristiky sa zväčší niekoľkonásobne v porovnaní s minimálnym nárastom magnetického toku. (Vid' obr. 7.) Neúmerný nárast magnetizačného prúdu vyvolá podľa vztahu (11) skreslenie sekundárneho prúdu, spôsobené presýtením PTP. Toto presýtenie síce trvá zväčša iba niekoľko periód ale pri napájaní rýchlych rozdielových resp. distančných spôsobí neselektívne resp. chybné

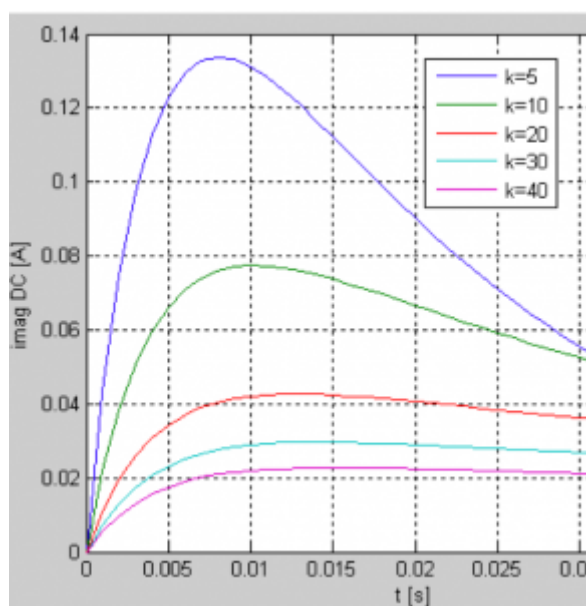
pôsobenie ochrán.



Obr. 9. Priebeh magnetizačného prúdu s uvažovaním sýtenia PTP

5. Dimenzovanie PTP pri rýchlych ochránách

V tejto kapitole sa zameriame na obmedzenie magnetizačného prúdu PTP. Magnetizačný prúd PTP napájajúci rýchle ochrany nikdy nemôže prekročiť koleno magnetizačnej charakteristiky I_{lim} . Podľa vzťahu (14) pri málo zaťaženom PTP bude časová konštanta T_2 väčšia a výraz $IT_1/(T_1-T_2)$ sa zmenší. (So znižujúcim sa $\sum R_2$). Takýmto spôsobom sa obmedzí magnetizačný prúd PTP (jednosmerná zložka) a preto prúdové transformátory pre rýchle diferenciálne ochrany musia byť minimálne zaťažené.



Obr. 10. Závislosť jednosmernej zložky magnetizačného prúdu od pomeru časových konštánt $k=T_2/T_1$

Jednosmerná zložka magnetizačného prúdu dosiahne maximum v čase:

$$\frac{d}{dt} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} + e^{-\frac{t}{T_2}} \right) = 0$$

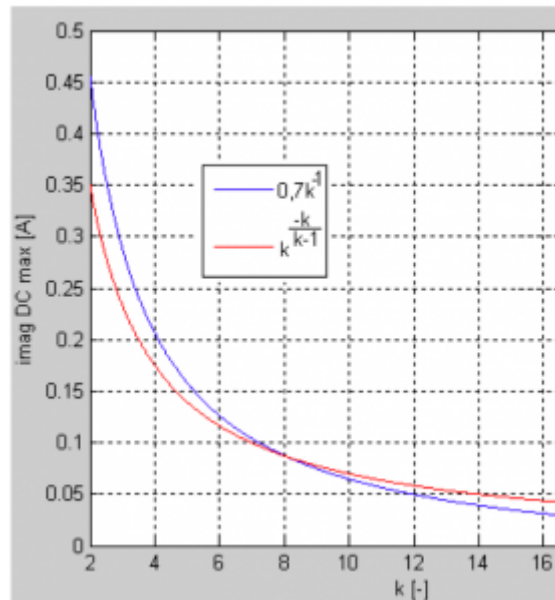
$$t_{max} = \frac{kT_1}{k-1} \cdot \ln k \quad \text{pričom } k = T_2/T_1 \quad (16)$$

Po dosadení času (t_{max}) do vzťahu (14) dostávame vzťah pre maximálny magnetizačný prúd:

$$\dot{i}_{mg_DC_MAX} = Ik^{-\frac{k}{k-1}} \quad (17)$$

Pri málo zaťaženom transformátore platí, že $k \gg 1$. Vzťah (17) je ťažko využitelný, a tak ho aproximujeme pomocou:

$$\dot{i}_{mg_DC_MAX} = 0.7Ik^{-1} \quad (18)$$



Obr. 11. Závislosť maximálneho magnetizačného prúdu od pomeru časových konštánt

Tento maximálny jednosmerný magnetizačný prúd musí byť vždy menší ako hodnota magnetizačného prúdu kolena magnetizačnej charakteristiky PTP (I_{lim}) a teda platí:

$$\omega MI_{lim} > 0.7I \frac{X}{R} \sum R_2 \quad (19)$$

Pričom:

$$k = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\omega M / \sum R_2}{X/R} \quad (20)$$

$U_{lim} = \omega MI_{lim}$ je sekundárne napätie PTP v kolene magnetizačnej charakteristiky, ktoré je definované ako efektívna hodnota napätia sekundárnej strany transformátora, ktorú je treba zvýšiť o 10 percent aby sa príslušný magnetizačný prúd zvýšil o 5 percent.

$$U_{lim} > 0.7I \frac{X}{R} \sum R_2 \quad (21)$$

Prevažná časť výrobcov prístrojových transformátorov prúdu zvyčajne neudáva parameter napätia kolena magnetizačnej charakteristiky (U_{lim}), ale namiesto tohto parametra sa zvykne udávať nominálny výkon a nadprúdové číslo (S_n, n). Pričom platí:

$$m = \frac{U_{lim}}{U_n} = \frac{U_{lim}}{\left(\frac{S_n}{I_{n2}} + R_2 I_{n2}\right)} \quad (22)$$

Vzťahy (21) a (22) majú zásadný význam pri dimenzovaní transformátorov prúdu

napájajúcich rýchle ochrany. Keďže tieto ochrany nesmú pôsobiť pri prechádzajúcich poruchách nesmú sa ani na okamih presýtiť. Presýtený transformátor totiž prenáša na sekundárnu stranu skreslený priebeh primárneho prúdu. Táto odmlka pri diferenciálnych ochránach spôsobí chybný resp. neselektívny nábeh ochrany.

6. Zhrnutie dosiahnutých výsledkov

Úloha projektanta pri dimenzovaní prístrojových transformátorov prúdu pre rýchle diferenciálne ochrany:

Určenie minimálnej hodnoty napätia kolena magnetizačnej charakteristiky (U_{lim})

$$U_{lim} > 0.7 I_{bmax} \frac{X}{R} \sum R_2$$

Stanovenie menovitého výkonu a nadprúdového čísla (S_n , n). (Zistením maximálneho skratového prúdu a jeho pomer k menovitému s uvažovaním prechodného deja). Potrebný výkon PTP určíme zo súčtu príkonov ochrán.

$$\sum S_{N-PTP} > \sum S_{Ochr.} \quad (21)$$

Určenie menovitého vstupného a výstupného prúdu, prevod PTP: I_{n1}/I_{n2} (Prevod PTP sa určí na základe menovitých prúdov objektu a ochrán)

Volba požadovanej presnosti. (presnejšie PTP sa používajú na účely merania, PTP pre rýchle diferenciálne ochrany musia byť presné najmä v nadprúdovej oblasti)

7. Záver

V tomto príspevku je ukázaný postup správneho dimenzovania prístrojových transformátorov prúdu určených pre napájanie rýchlych (rozdielových resp. dištančných) ochrán. Dôraz sa kladie na matematické objasnenie vzniku presýtenia prístrojových transformátorov prúdu ako aj popisu jednotlivých zjednodušení, potrebných pre vyvodenie praktických poznatkov a na správne určenie konkrétnych parametrov prístrojových transformátorov prúdu. Ďalej sa príspevok venuje spôsobom detekcie a obmedzenia presýtenia prístrojových transformátorov prúdu.

8. Odkazy na literatúru

1. JANÍČEK, F., CHLADNÝ, V., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž.,: Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave, STU Bratislava 2004.
2. TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P.,: Prechodné jevy 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. IEC 60044-1. Instrument transformers, Part 1: Current transformers.
 12. Katalógy počítačových ochrán firmy Siemens.
 13. Katalógy ochrán ABB ASEA Brown Boveri.
 14. Katalógy počítačových ochrán firmy SEL.
 15. Katalógy počítačových ochrán firmy Beckwith Electric Co. Inc.
-

Spoluautormi článku sú Pavol Heretík, Matúš Kováč, Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská republika
