

Jozef Balogh, Jaroslav Džmura, Jaroslav Petraš

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Analýza sond toroidného a lineárneho typu z fyzikálneho hľadiska

Abstrakt. Predkladaná práca poukazuje na princíp lineárnych a toroidných sond z fyzikálneho hľadiska a aplikáciou uvedených teoretických poznatkov speje, že sú splnené všetky podmienky pre meranie malých prípadne impulzných prúdov a tým upozorňuje na nový-progresívny spôsob snímania signálov vyvolaných čiastkovými výbojmi, ktoré spôsobujú degradáciu izolačného systému.

Abstract. This paper point out the principle of linear and toroidal sensors from the physical point of view with the application of described theoretical knowledge. All the conditions for small or pulse currents are fulfilled. Therefore we can poitn out a new approach to partial discharge signal measurement, generated by partial discharges that deteriorate the insulation system.

Kľúčové slová: toroidná sonda, koeficient transformácie, lineárna sonda, prúdový impulz

Keywords: toroidal sensor, coefficient of transformation, linear sensor, current pulse.

Úvod

Meranie výbojovej aktivity v izolačných systémoch patrí v súčasnej dobe k najmodernejším metódam pre diagnostiku izolačných systémov. Každé špičkové diagnostické pracovisko má už dnes vo svojom súbore meracích diagnostických metód zavedenú niektorú z metód merania čiastkových výbojov.

Pre monitorovanie výskytu čiastkových výbojov v izolačných systémoch zariadení vysokého a veľmi vysokého napätia boli nami vyvinuté indukčné sondy lineárneho typu [1] a sondy toroidné [2] a [3].

Z ekonomického dôvodu je výhodnejšie použitie lineárnych sond. Ich výhoda voči toroidným spočíva v tom, že nie je nutné meraný obvod prerušiť za účelom nasadenia indukčnej sondy toroidného tvaru.

Lineárne snímače boli s veľkým úspechom aplikované pri revíziách vysokonapäťových strojov, najmä izolácie statorových vinutí trakčných strojov, hydro a turbogenerátorov a 6kV strojov točivých.

V širšom rozsahu boli aplikované na detekciu čiastkových výbojov v káblových sieťach, v prístrojových transformátoroch napätia a prúdu v suchom prevedení ako aj v distribučných "suchých" 22kV transformátoroch.

Indukčné snímače toroidné sa používajú na meranie zvodového prúdu pri frekvencií 50 Hz a sú zapojené do pracovného uzemnenia objektu. Majú funkciu prúdového meniča. Signál z vinutia snímača na toroidnom feromagnetickom jadre je ďalej spracovaný a vyhodnocovaný elektronicky a PC technikou.

Princíp toroidných sond z fyzikálneho hľadiska

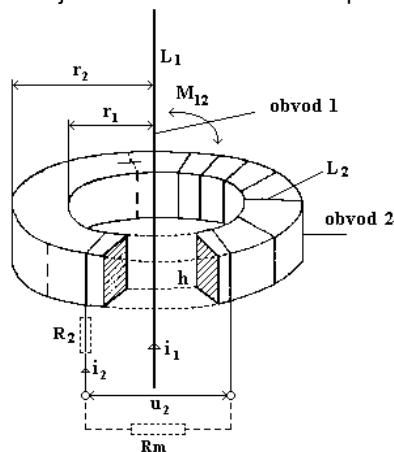
Indukčná sonda toroidného tvaru je navrhnutá tak, aby bola zohľadnená jej poloha, geometria a spôsob uloženia v obvode pracovného uzemnenia meraného objektu. Vychádzame z dvoch prúdových obvodov elektromagneticky navzájom previazaných (obr.1). V ideálnom prípade pre napätie na výstupe toroidného vinutia dostávame rovnicu

$$(1) \quad u_2 = -i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt}$$

kde parametre R_2 a L_2 predstavujú merateľné hodnoty činného odporu a vlastnej indukčnosti cievky a M_{12} predstavuje vzájomnú indukčnosť medzi obvodmi 1 a 2.

Vychádzajúc z reálnych podmienok je zrejme, že meranie prúdu i_1 tečúceho prúdovodičom sa dá realizovať prostredníctvom merania napätia u_2 na svorkách vinutia s

počtom závitov N_2 (sekundárne vinutie) a na vstupnom odpore R_m zosilňovača ($u_2 = R_m i_2$). Kvôli exaktnosti merania je nutné, aby závitky boli rovnomerne rozložené na prstenci, ktorý má tvar toroidu s pravouhlým prierezom. Vodič, ktorým tečie primárny prúd o neznámej veľkosti i_1 , prechádza v ľubovoľnej ploche cez otvor prstenca. Prúd i_1 indukuje v sekundárnom vinutí napätie u_2 :



Obr.1. Indukčná sonda toroidného tvaru.

$$(2) \quad u_2 = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

ktoré v uzavretom sekundárnom vinutí vyvoláva prúd i_2 . Poznávame, že $M_{12} = M_{21}$. Napätie u_2 sa rovná súčtu spádu napätia $i_2 R_2$ na odpore R_2 a na indukčnosti L_2 , čo je možné zapísať takto:

$$(3) \quad -M_{21} \frac{di_1}{dt} = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Hodnota úbytku napätia na odpore ($i_2 R_2$) najmä pri vyšších frekvenciách je voči napätíu vznikajúcejmu samoindukciou v sekundárnom obvode zanedbateľná. Môžeme preto napísať:

$$(4) \quad -M_{21} \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Integrovaním tejto rovnice, ak si uvedomíme, že pre $i_1=0$ je aj $i_2=0$, dostávame

$$(5) \quad i_2 = -\frac{M_{21}}{L_2} i_1 = -k i_1$$

kde k - je koeficient transformácie. Ak ho teda chceme vypočítať, musíme poznať koeficient vzájomnej indukcie

M_{12} , ktorý vyjadruje induktívne pôsobenie prvého prúdového obvodu na druhý. Koeficient M_{21} je definovaný vzťahom[6]:

$$(6) \quad M_{21} = \frac{\Psi_{2M}}{i_1}$$

Kvôli vypočítaniu koeficientu vzájomnej indukcie M_{21} priamo podľa vyššie uvedeného vzťahu sa musí najprv určiť celkový tok Ψ_{2M} , ktorý prechádza cez druhý obvod za podmienky, že v prvom obvode tečie prúd i_1 . Avšak zložitý tvar primárneho okruhu bezprostredné počítanie toku Ψ_{2M} vylučuje.

V tomto prípade nám veľmi dobre poslouží rovnosť $M_{21}=M_{12}$. Určenie koeficientu M_{12} bude vyplývať zo vzťahu:

$$(7) \quad M_{12} = \frac{\Psi_{1M}}{i_2}$$

Pri jeho počítaní predpokladáme, že prúd je len v sekundárnom okruhu a hľadáme týmto prúdom budený celkový indukčný tok Ψ_{1M} , prechádzajúci cez plochu ohraničenú primárnym okruhom. Ak je sekundárny okruh vinutý rovnomerne a pomerne tesne na prstenci, každá indukčná čiara toku Φ budeného prúdom i_2 prechádza cez všetky závitov sekundárneho vinutia. Každá indukčná čiara tohoto toku obopína teda raz vodič primárneho prúdu, nech je tvar vodiča akokoľvek zložitý.

V takomto prípade bude $\Psi_{1M}=\Phi$. Ako uvádza Kalantarov-Nejman [5], pre toroid o rozmeroch na obr.1 bude:

$$(8) \quad \Psi_{1M} = \Phi = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} N_2 i_2 h \ln \frac{r_2}{r_1}$$

- kde μ_0 - permeabilita vákua (1,256.10-6 H.m-1)
 μ_r - relatívna permeabilita magnetického jadra
 N_2 - počet závitov sekundárneho vinutia
 h - výška toroidu
 r_1, r_2 - vnútorné a vonkajšie polomery toroidu.

Pre koeficient vzájomnej indukcie platí [4]:

$$(9) \quad M_{12} = M_{21} = \frac{\Psi_{1M}}{i_2} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} N_2 h \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Koeficient samoindukcie L_2 pre toroidné vinutie bude:

$$(10) \quad L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} N_2^2 h \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Koeficient transformácie k je teda možné vyjadriť nasledovne:

$$(11) \quad k = \frac{M_{21}}{L_2} = \frac{1}{N_2}$$

Vo všeobecnosti, ak vodič primárneho prúdu prechádza N_1 -krát cez otvor prstenca, bude koeficient transformácie:

$$(12) \quad k = \frac{N_1}{N_2}$$

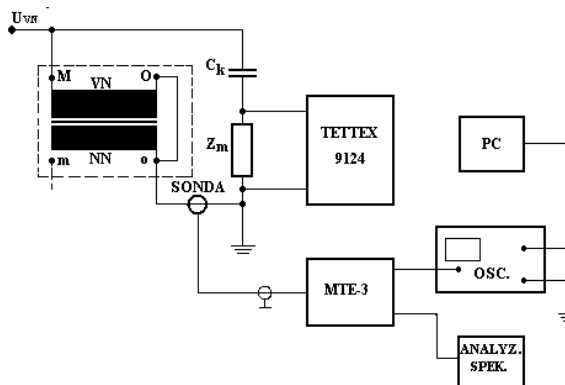
Význačnou vlastnosťou tohoto usporiadania je to, že jeho transformačný koeficient vôbec nezávisí od tvaru vodiča primárneho prúdu.

Aplikáciou vyššie uvedených teoretických poznatkov dospejeme k záveru, že sú splnené všetky podmienky pre meranie malých striedavých prípadne impulzných prúdov. Induktívnu sondu pripojíme do obvodu sekundárneho vinutia a táto sonda je pripojená k elektronickému obvodu s vysokou vstupnou impedanciou (obr.2).

Nízky počet závitov zabezpečuje vysokú odolnosť voči vonkajšiemu rušeniu a vlastné meranie sa upravuje na meranie extrémne malých prúdov. Takže za vyššie uvedených podmienok platí:

$$(13) \quad i_2 = \frac{N_1}{N_2} i_1$$

Ak $N_1=1$, potom i_2 predstavuje N_2 -tý diel meraného prúdu i_1 .

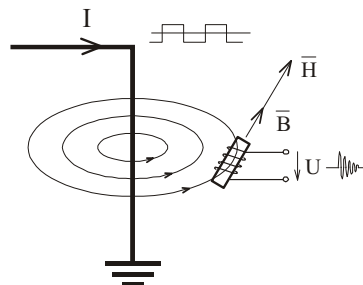


Obr.2: Detekčný obvod s induktívnou sondou

Pre prevádzku v striedavých elektrických poliach, prípadne v dynamických režimoch, sú vhodné magneticky mäkké materiály s koerčívnuou silou $H_c \sim 800 Am^{-1}$. Určené sú pre aplikáciu v oblasti najslabších magnetických polí. Vyznačujú sa schopnosťou ľahko sa zmagnetizovať a odmagnetizovať. Majú úzku hystereznú slučku, vysokú hodnotu počiatočnej a maximálnej permeability (80 až 100 tisíc) a malé merné straty.

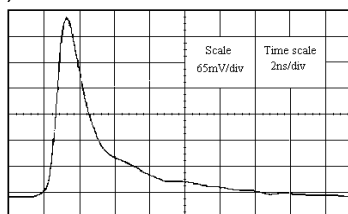
Princíp lineárnych sond z fyzikálneho hľadiska

Lineárny snímač sa musí umiestniť do elektromagnetického poľa vyžarovaného signálu tak, aby vektor magnetickej indukcie B a intenzity magnetickeho poľa H bol orientovaný do osi snímača. Z literárnych prameňov vieme, že výboje vznikajúce v dutinách dielektrika majú impulzný charakter, pričom tvar, doba trvania impulzov a ich amplitúda sú závislé od mnohých faktorov. Signál emitovaný z izolačného systému za predpokladu, že nebude absorbovaný okolitým prostredím môže byť zachytený rezonančným obodom.



Obr.3. Induktívna sonda lineárneho tvaru.

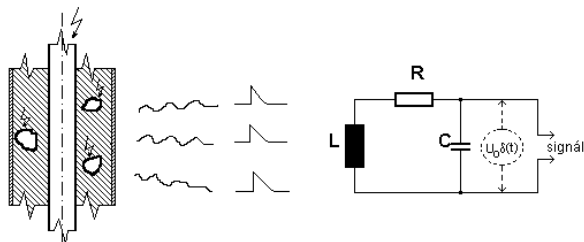
Na základe fyzikálnych pochodov už predtým popísaných, [6] v plynom vyplnenej dutine izolácie vzniká v dôsledku výboja v elektrickom poli prúdový impulz (obr. 4).



Obr.4. Prúdový impulz strímrového výboja (podľa [7]).

Priebeh výboja je veľmi závislý od druhu defektu izolácie, aj od celkového usporiadania izolačného systému. Priebeh impulzu je za istých podmienok obrazom fyzikálnych procesov pri výboji v defekte a môže byť

zachytený rezonančným obvodom, ktorý je znázornený na obr.5.



Obr.5. Vysielač a prijímač signálov vyžarovaných z miesta čiastkových výbojov

Matematicko - fyzikálne riešenie tejto úlohy spočíva v riešení modelového obvodu. Vychádza sa pritom z Diracovej funkcie, ktorá je definovaná ako $\delta(t)$.

Zo schémy na obr. 5 vidíme, že emitovaný signál je zdrojom rušenia. Nahradíme ho jednosmerným zdrojom, krátkodobo pripojeným ku kondenzátoru C. V čase $t=0$ pripojíme zdroj o napätí U_0 , pričom predpokladáme, že predtým sú v obvode podmienky dané týmito hodnotami prúdu: $i(0)=0$ a náboja na kondenzátore $Q(0)=0$.

Budeme riešiť prúd v obvode v čase $t > 0$. Napätie má tvar $U_0\delta(t)$. Rovnica zostavená pre obvod (obr.5) bude mať tvar :

$$(14) \quad L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = U_0 \delta(t)$$

$$Lp\bar{i} + R\bar{i} + \frac{1}{Cp}\bar{i} = U_0 \cdot 1$$

$$\left(Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} \right) \bar{i} = U_0 p$$

$$\bar{i} = \frac{U_0 p}{L(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC})} = \frac{U_0}{L} \frac{p}{(p + \frac{R}{2L})^2 + \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

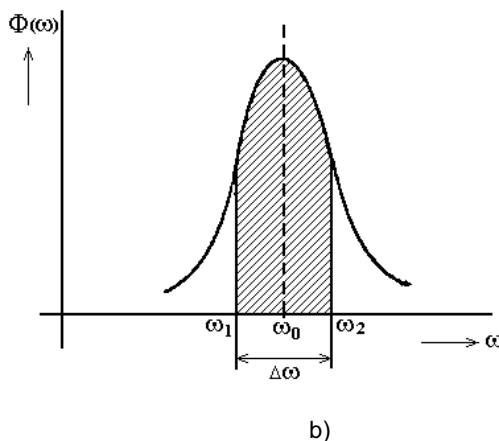
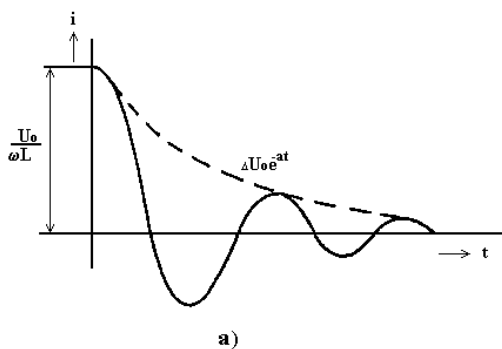
Predpokladajme, že

$$\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} = \omega^2 \quad \frac{R}{2L} = a$$

$$\bar{i} = \frac{U_0}{\omega L} \frac{p+a-a}{(p+a)^2 + \omega^2} = \frac{U_0}{\omega L} \left[\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2} - \frac{1}{\omega} \frac{a\omega}{(p+a)^2 + \omega^2} \right]$$

$$i = \frac{U_0}{\omega L} \left(e^{-at} \cos(\omega t) - \frac{a}{\omega} e^{-at} \sin(\omega t) \right)$$

Z výsledku vyplýva, že sa jedná o tlmený priebeh prúdu s obálkou funkcie e^{-at} , ako je to znázornené na obr.6a.



Obr.6 Priebeh prúdu v rezonančnom obvode (a) a spektrum signálu (b)

Prúd i vyvolá na vstupe zosilňovača úbytok napätia ΔU s analogickým priebehom (obr.6). Keďže spravidla je splnená podmienka, že $R^2/4L^2 \gg 1/LC$, môžeme písať, že uhlový kmitočet $\omega \approx 1/\sqrt{LC}$.

Ovodenie platí opäť pre jeden impulz. V prípade veľkého počtu impulzov rezonančný snímací obvod spracuje každý typ súčasne a vyhodnotí ho v úzkopásmovom zosilňovači.

Záver

Na základe získaných poznatkov predkladaná práca poukazuje na progresívny spôsob snímania signálov vyvolaných čiastkovými výbojmi. Induktívnou metódou upravuje doterajšiu priamu (galvanickú) metódu predovšetkým tým, že vylučuje meraciu impedanciu a väzobný kondenzátor. Umožňuje merať skúmaný objekt za prevádzky, dá sa elektronicky, prípadne použitím svetelných káblov (optoelektronicky) prepojiť prostredníctvom prevodníka na počítač a vyhodnocovací systém.

Literatúra

[1] MARTON, K. a kol.: Autorské osvedčenie č. 202 129, Úrad pro vynálezy a objezy, Praha, 1976.
 [2] MARTON, K. a kol.: Výskumná správa GAV č.1/990345/92, EF TU Košice, 1992.
 [3] MARTON, K., BALOGH, J.: Elektrofyzikálna analýza odozvy čiastkových výbojov modelovaných Diracovym impulzom. Zborník, Diagnostika 93, ZČU Plzeň, 1993.
 [4] MARTON, K. a kol.: Závěrečná práce rezortného výskumu R 02- 125- 050, TU Košice, 1990.
 [5] NEJMAN, L. R., KALANTAROV, P. L.: Teoretické základy elektrotechniky, Bratislava, 1951.
 [6] MARTON, K.: Teoretická analýza induktívneho snímania čiastkových výbojov. KTVN, EF TU v Košiciach.
 [7] MORSHIUS, P.H.F.: Partial Discharge Mechanisms, Proefschrift, Delft, 1993.

Autori článku vyslovujú poďakovanie za účinnú podporu grantovej agentúry MŠ SR a SAV v rámci výskumu na úlohu 1/0368/09.

Autori: Jozef Balogh, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jozef.balogh@tuke.sk
 Jaroslav Džmura, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.dzmura@tuke.sk.
 Jaroslav Petráš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.petras@tuke.sk.