

# METODIKA OVEROVANIA ÚČINKOV SKRATOVÝCH PRÚDOV NA VINUTIACH VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTOROV

## THE VERIFICATION METHODICS OF THE EFFECTS OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN WINDINGS OF THE POWER TRANSFORMERS

Miroslav Gutten, Ján Michalík

Katedra teoretickej a aplikovanej elektrotechniky, Elektrotechnická fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline, Veľký diel, 010 26 Žilina

**Abstrakt** Vinutia výkonových transformátorov musia byť navrhnuté tak, aby pri pôsobení skratových prúdov, ktoré sa môžu v prevádzke vyskytnúť, nevzniklo na nich poškodenie alebo deformácia mechanického či tepelného charakteru. Okrem trvalo deformačných následkov účinkov skratového prúdu dochádza aj pri správnom dimenzovaní elektrického zariadenia k postupnému starnutiu, ktoré môže zhoršiť jeho mechanické vlastnosti. V článku je prezentovaná diagnostická metóda, ktorá umožňuje predvídať takýto stav.

**Summary** The windings of power transformers must be designed so, that the effect of short-circuits currents, which can emerge in an operation, will not start up on them the destruction or the deformation of the mechanical or thermal character. Except for permanently deformation results of the effects of short-circuit current come to also by correct dimensioning of electric equipment to progressive ageing, which can make worse his mechanical properties. The article deals with the diagnostic method, which enables to anticipate such state.

### 1. ÚVOD

Pri veľmi vysokých prúdoch sa vinutie transformátorov môže tepelným a mechanickým účinkom skratových prúdov trvalo poškodiť. Predovšetkým pri transformátoroch s prirodzeným chladením z hliníkového vinutia je nutné zamedziť nepredvídanej poruche počas prevádzky. Je preto potrebné zvoliť vhodnú diagnostiku, ktorá by predvídala takýto stav.

V súčasnosti nie je vytvorená metodika experimentálneho merania a diagnostikovania samotných účinkov skratových prúdov. Jestvujúca diagnostika sa zaoberá len všeobecným stavom degradácie izolačných hladín transformátora.

V tomto článku je prezentovaný opis metodiky experimentálneho diagnostikovania účinkov skratových prúdov. Metóda podľa [5] je založená na spojení viacerých meraní, aby bolo možné určiť najdôveryhodnejší obraz o účinkoch skratových prúdov na vinutiach transformátora počas prevádzkového stavu:

- sledovanie kvality izolácie na jednotlivých fázach vinutí a ich porovnávanie,
- sledovanie časovej zmeny napätia nakrátko,
- meranie odporov vinutí.

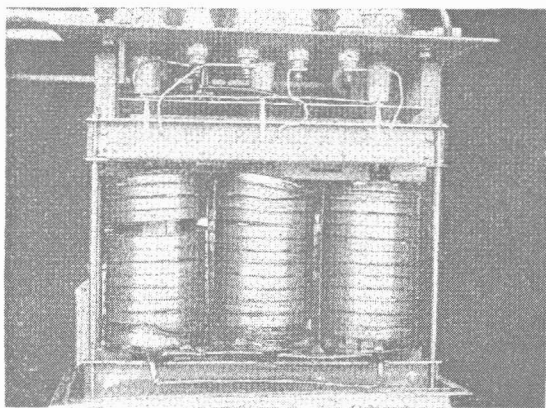
Odpor vinutia sa zisťuje za účelom posúdenia zhodnosti vyhotovenia jednotlivých fáz a neporušenosti obvodu.

### 2. SLEDOVANIE KVALITY IZOLÁCIE NA JEDNOTLIVÝCH FÁZACH VINUTÍ A ICH POROVNÁVANIE

#### 2.1 Teória pôsobenia skratového prúdu na jednotlivých vinutiach transformátora

Rozdielnosť stavu izolácie vinutí medzi fázami je dôležitým znakom, že na zhoršovaní izolačnej kvality sa podieľajú predovšetkým účinky skratových prúdov počas prevádzky.

Tento poznatok vychádza zo značnej nesymetrie výskytu skratového prúdu. Podľa [1] je relatívna pravdepodobnosť výskytu jednopólového skratu u vn sústavy 65 % a u vvn sústavy až 91 %. Dokonca pri pôsobení trojfázového skratového prúdu sú rozdielne hodnoty jednosmernej zložky skratového prúdu na jednotlivých fázach.

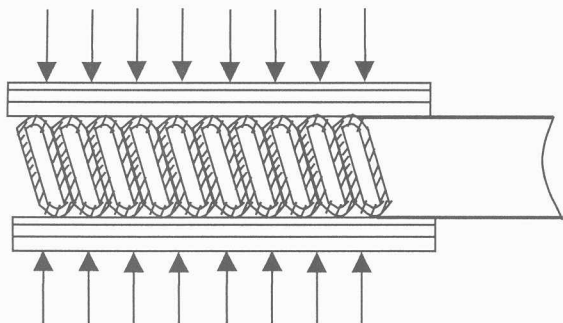


Obr. 1. Pohľad na poškodené hliníkové vinutia transformátora spôsobené účinkami skratových prúdov

Fig. 1. A view for damaged aluminium windings of transformer as a result effects of short-circuit currents

Podľa [2] vzniká navyše značná nesymetria aj pri pôsobení nerovnomerného rozloženia axiálnych síl vplyvom účinkov skratových prúdov. Meraniami sa ukázalo, že namáhania strednej fázy prevyšujú priemerne o 13 až 15 % namáhania krajných fáz.

Je potrebné poznamenať, že pôsobenie axiálnych síl má podľa [3] značný vplyv na kvalitu izolácie jednotlivých fáz (obr. 2).



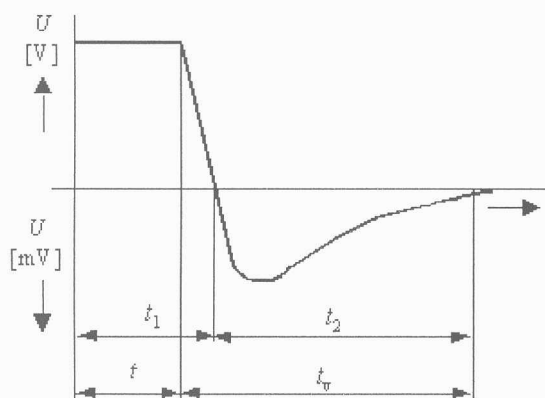
Obr. 2 Klopenie vodičov cievky pôsobením nadmerných osových síl (vplyv na stláčanie izolácie).

Fig 2. Pitching of coil conductors by action of the excessive axial strengths (effect to insulation compression)

## 2.2 Metóda sledovania izolačnej kvality vinutí

Značne citlivou metódou založenou na posúdení kvalitatívnych zmien materiálu v dôsledku prevádzkového starnutia je snímanie samovybíjajúcich napätí ([5]).

Po definovanej ukončenej doby nabitia medzizávitovej kapacity sa transformátor odpojí od jednosmerného zdroja a sníma sa proces vybíjania izolácie vinutia cez jej zvodový odpor. Nižšia hodnota izolačného odporu spôsobí rýchlejší pokles samovybíjacieho napätia. Proces vybíjania je tiež ovplyvňovaný stupňom nevratnej degradácie materiálu.



Obr. 3. Vybíjací proces transformátora po vypnutí od jednosmerného zdroja

Fig. 3. The discharge process of transformer after disconnection from DC supply

Časové priebehy napätia na medzizávitovej kapacite transformátora po odpojení zobrazuje obr. 3. S rastúcou kvalitou izolácie vinutia sa predlžuje doba vybíjania  $t_v$ .

Pri tomto meraní môžeme sledovať rozdielne hodnoty vybíjacieho času  $t_2$  pre jednotlivé fázy transformátora. Tieto rozdiely medzi fázami sú dôležitým znakom, že na zhoršovaní stavu izolácie vinutí sa podieľa predovšetkým účinky skratových prúdov počas prevádzky.

## 3. SLEDOVANIE ČASOVEJ ZMENY NAPÄTIA NAKRÁTKO

Stav zmeny percentuálneho napätia nakrátko  $u_k$  obrazom geometrického posuvu vinutí a ich konštrukcie transformátora. Tento stav sa môže meniť v závislosti od pôsobenia tepelných a mechanických účinkov skratových prúdov.

Aby sme lepšie pochopili súvis medzi zmenou napätia nakrátko a možným poškodením vplyvom skratových prúdov, musíme sa sústrediť na pôsobenie mechanických síl na vinutiach transformátora počas skratu.

### 3.1 Teória pôsobenia mechanických síl na vinutiach transformátora počas skratu

Priamou príčinou vzniku síl pôsobiacich na vinutiach je pôsobenie magnetického poľa na vodiče pretekajúce prúdom. V prípade vinutí transformátora je to po rozptylového toku.

Pri normálnom chode, keď prúdy v transformátore neprekračujú menovitú hodnotu, sú sily pôsobiace na vinutiach všeobecne malé. Naproti tomu pri skratoch, keď prúdy dosahujú veľkosti mnohonásobku menovitej hodnôt, môžu sa tieto sily stať nebezpečnými vinutiach upevňujúcej konštrukcii.

Sily pôsobiace na vinutiach môžeme rozdeliť podľa [3] na dve skupiny:

- radiálne (pričné),
- axiálne (pozdĺžne).

#### 3.1.1 Pôsobenie radiálnych síl na vinutiach:

Radiálne sily  $F_q$  sú výsledkom pôsobenia tzv. pozdĺžneho poľa, rovnobežného s osou vinutia transformátora. Tieto sily rozťahujú vonkajšie a stláčajú vnútorné vinutiach, čím sa zväčšujú vzduchové medzery medzi nimi.

Siločiary magnetického rozptylového toku prebiehajú paralelne s osou vinutia a na každú cievku pôsobí rovnaká radiálna sila. Súčet radiálnych síl, ktorý označíme  $F$  smeruje ku zväčšeniu medzery medzi vinutiach  $\delta$  (obr. 4).

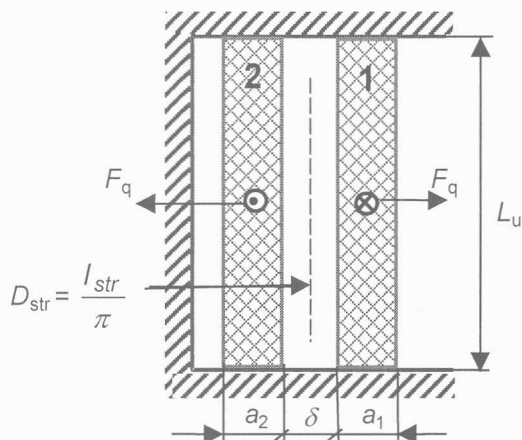
Nekonečne malému zväčšeniu medzery  $\partial\delta$  odpovedá nekonečne malá zmena energie magnetického poľa:

$$\partial w = F_{\delta} \cdot \partial\delta, \text{ odkiaľ } F_{\delta} = \frac{\partial w}{\partial\delta} \quad (1)$$

Energia magnetického poľa:

$$w = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f} \cdot X_z \quad (2)$$

kde  $i$  je okamžitá hodnota prúdu vo vinutiach,  $X_z$  je rozptylová reaktancia nakrátko uvažovaných vinutí,  $f$  je kmitočet.



Obr. 4. Pôsobenie radiálnych síl  $F_q$  na vinutiach transformátora

Fig. 4. The radial strength action  $F_q$  in transformer windings

Po úpravách radiálnu silu udáva vzťah:

$$F_\delta = \frac{\partial w}{\partial \delta} = 2\pi \cdot (iz)^2 \cdot \frac{I_{str}}{L_u} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (3)$$

kde  $(iz)$  je ampérvávitý cievky v (Az);

$I_{str}$  je stredná dĺžka závitov v (m),

$L_u$  je výška vinutia v (m).

### 3.1.2 Pôsobenie axiálnych síl na vinutia:

Axiálne sily sú nebezpečné v prípade nesymetrie vinutí. Už malým posunutím oboch cievok vzniknú sily, ktoré sa usilujú toto posunutie zvyšovať. Takéto posunutie môže vzniknúť pri výrobe tým, že obidve cievky nie sú celkom rovnaké. Nesymetria vzniká aj tým, keď cievka vyššieho napätia obsahuje relatívne viac izolácie ako vinutie nižšieho. Ale aj pri celkom rovnakých cievkach môže časom nastať zmrštenie niektorej strany. Toto zmrštenie môže byť zapríčinené vysychaním.

Podľa [2] je potrebné venovať zvýšenú pozornosť zachyteniu krajných závitov. V prípade uvoľneného závitov môžu axiálne sily zapríčiniť posunutie krajných závitov do vertikálnych strán (obr. 1).

### 3.2 Matematické vzťahy pre výpočet napätia nakrátko z rozmerových parametrov vinutí:

$$\text{Napätie nakrátko: } u_k = \sqrt{x_\sigma^2 + r^2} \quad (4)$$

$$\text{Pomerná rozptylová reaktancia: } x_\sigma = \frac{X_\sigma}{Z_N} \cdot 100 \quad (5)$$

Reaktancie  $X_{1\sigma}$  a  $X'_{2\sigma}$  z obr. 5 sa určia podľa [4] približne:

$$X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma} \approx \frac{X_k}{2}, \quad (6)$$

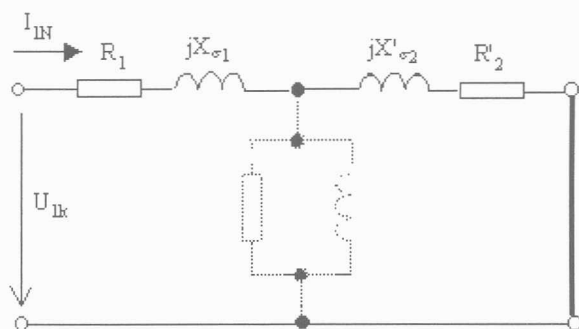
pričom reaktancia  $X_k$  sa vypočíta podľa druhu konštrukcie vinutí podľa vzťahu:

$$X_k = \frac{7,9 \cdot f \cdot N^2 \pi \cdot D_{str}}{L_{u\sigma}} \cdot \left( \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (\Omega) \quad (7)$$

pričom

$$L_{u\sigma} = L_u + \frac{\delta + a_1 + a_2}{\pi} \quad (\text{m}) \quad (8)$$

kde  $\delta$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $D_{str}$  sú rozmerové parametre podľa obr. 4.



Obr. 5. Náhradná schéma transformátora pri meraní nakrátko

Fig. 5. The equivalent transformer diagram at short measurement

### 3.3 Príklad výpočtu zmeny napätia nakrátko pri pôsobení mechanických síl:

Výkonový transformátor má tieto parametre:

$f = 50$  Hz,  $u_k = 4,11$  %;  $r = 2,62$  %;  $Z_n = 19,0$   $\Omega$ ;  $N_1 = 120$ ;  $D_{str} = 0,4$  m;  $L_u = 0,6$  m;  $\delta = 0,03$  m;  $a_1 = 0,03$  m;  $a_2 = 0,04$  m.

a) Pôsobenie radiálnych síl: Určíme zväčšenie pomerného napätia nakrátko  $u_k$  pri zväčšení medzery medzi vinutiami o  $\Delta\delta = 0,01$  m.

b) Pôsobenie axiálnych síl: Určíme zmenšenie pomerného napätia nakrátko  $u_k$  pri zväčšení výšky vinutí posunutím krajných závitov o  $\Delta L_u = 0,05$  m.

Podľa vzťahu:

$$L_{u\sigma} = 0,6 + \frac{0,03 + 0,03 + 0,04}{\pi} = 0,632 \text{ m.} \quad (8)$$

Potom podľa vzťahu:

$$X_k = \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 120^2 \pi \cdot 0,4}{0,632} \cdot \left( 0,03 + \frac{0,03 + 0,04}{3} \right) \cdot 10^{-6} = 0,6 \Omega. \quad (7)$$

a) Pri zväčšení medzery medzi vinutiami v dôsledku radiálnych síl dostaneme:

$$L_{u\sigma} = 0,635 \text{ m a } X_k^* = 0,7125 \Omega.$$

Keďže platí približný vzťah (6), potom pomerná rozptylová reaktancia:  $x_{\sigma}^* = \frac{0,7125}{19,0} \cdot 100 = 3,75 \%$

a pomerné napätie nakrátko podľa vzťahu (4):

$$u_k^* = \sqrt{3,75^2 + 2,62^2} = 4,57 \%$$

Pôsobením radiálnych síl by zväčšením vzduchovej medzery medzi vinutiami o 1 cm vzrástlo pomerné napätie nakrátko z hodnoty 4,11 na 4,57 %.

b) Pri zväčšení výšky vinutí posunutím krajných závitov o  $\Delta L_u = 0,05 \text{ m}$  v dôsledku axiálnych síl dostaneme:

$$L_{u\sigma} = 0,66 \text{ m a } X_k^* = 0,57 \Omega.$$

Keďže platí približný vzťah (6), potom pomerná rozptylová reaktancia:  $x_{\sigma}^* = \frac{0,57}{19,0} \cdot 100 = 3,0 \%$

a pomerné napätie nakrátko podľa vzťahu (4):

$$u_k^* = \sqrt{3,0^2 + 2,62^2} = 3,98 \%$$

Pôsobením axiálnych síl by posunutím krajných závitov o 5 cm kleslo pomerné napätie nakrátko z hodnoty 4,11 na 3,98 %.

#### 4. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

V opravovni transformátorov sme preverili 22 náhodne vybraných vzoriek prevádzkovo použitých distribučných transformátorov s výkonom od 30 do 1 000 kVA a zisťovali sme podľa [6] ich veľkosti napätia nakrátko pomocou systému z [7]. Keďže vinutia sa pred skúškou nevymieňali, výsledky meraní boli čiastočným obrazom skratových namáhání transformátorov počas prevádzky. Z výsledného grafu náhodne vybraných transformátorov podľa [5] bol zrejmý štatistický zistený priemer poklesu napätia nakrátko oproti štítkovému údaju o 2,56 %.

Na meranie sa vybralo ďalších 9 transformátorov (30 - 1000 kVA), u ktorých sme zisťovali pomocou kompletnej metodiky overovania stav vinutí. Výsledky meraní zobrazujú tabuľky 1 a 2.

Tabuľka 1. Výsledky z merania napätia nakrátko  
Table 1. Results from short voltage measurement

	Typ	S (kVA)	Rok výroby	$u_k$ (%)		$\Delta u_k, 100$ (%)
				štítkový	meraný	
1	kTO 253/22	30	1958	4,96	4,50	9,27
2	aTO 294/22	100	1975	4,10	3,91	4,63
3	aTO 294/22	100	1981	3,92	3,84	2,04
4	aTO 294/22	100	1983	3,95	3,89	1,52
5	aTO 334/22	250	1979	3,92	3,85	1,79
6	aTO 334/22	400	1974	6,28	6,30	-0,32
7	aTO 374/22	630	1986	6,01	5,96	0,83
8	aTO 374/22	1000	1972	5,94	5,89	0,84
9	kTO 350/22	400	1990	5,84	5,84	0,00

Pozn.: Kladné hodnoty  $\Delta u_k, 100$  udávajú pokles napätia nakrátko.

V tabuľke 2 sú hodnoty získané meraním samovybíjacieho napätia na vinutiach vn. Porovnaním jednotlivých fáz je pozorovať značnú nesymetriu kvality izolácie ( $\Delta t_v, 100$  20 %) u transformátorov 1 a 4.

Tabuľka 2. Výsledky z merania doby vybíjania  
Tab. 2. Results from duration of discharge measurement

	Typ	S (kVA)	$t_v$ (s)			$\Delta t_v, 100$ (%)
			A - B	A - C	B - C	
1	kTO 253/22	30	48	34	48	21,54
2	aTO 294/22	100	98	82	96	10,87
3	aTO 294/22	100	114	98	103	8,57
4	aTO 294/22	100	103	131	156	20,77
5	aTO 334/22	250	152	131	159	11,09
6	aTO 334/22	400	68	71	69	2,40
7	aTO 374/22	630	135	107	123	12,05
8	aTO 374/22	1000	76	60	63	14,57
9	kTO 350/22	400	165	165	171	2,40

#### 5. ZÁVER

Podľa štatistického vyhodnotenia 22 náhodne vybraných transformátorov je možné pozorovať z mierneho poklesu napätia nakrátko (priemerne 2,56 %) značný vplyv axiálnych síl. Podľa [5] radiálne sily vplyvom skratových prúdov ovplyvnili nárast napätia nakrátko len u niektorých transformátorov.

Toto hodnotenie potvrdzujú aj tabuľky 1 a 2 u transformátorov 1 až 4 (do 100 kVA), kde sa potvrdil súvis medzi pôsobením axiálnych síl a ich pôsobením na kvalitu izolačnej vrstvy (tabuľka 2 - pokles doby vybíjania  $t_v$ ).

Záverom je potrebné poznamenať, že uvedeno metodikou overovania účinkov skratových prúdov sme schopní zhodnotiť pôsobenie mechanických síl na vinutiach transformátora počas predchádzajúceho

prevádzky. Taktiež je možné vyšpecifikovať fázu vnutia, ktorá bola najviac zasiahnutá vplyvom účinkov skratových prúdov.

Avšak základným problémom metodiky zostáva určenie jednotných hraníc, ktoré by stanovili dobu a podmienky ďalšej bezporuchovej prevádzky transformátora.

#### LITERATÚRA

- [1] REISS, L., - MALÝ, K. - PAVLÍČEK, Z.: *Teoretická elektroenergetika II*, ALFA Bratislava, 1971
- [2] JAROUŠEK, J. - PLENCNER, R.: *Transformátory*, SVTL Bratislava, 1961
- [3] JEZIEFSKI, E: *Transformátory. Teoretické základy*, Academia Praha, 1973
- [4] PETROV, G. N.: *Elektrické stroje 1. II. Transformátory*, Academia Praha, 1980
- [5] GUTTEN, M.: *Dimenzovanie elektrických zariadení v trakčnej transformovni vzhľadom na účinky skratových prúdov*, Dizertačná práca, ŽU v Žiline 2002
- [6] STN IEC 76-1, 2, 3: Súhrn požiadaviek a meraní na transformátoroch, 1993
- [7] MICHALÍK, J. - GUTTEN, M. - BEŇOVÁ, M. - ZAHORANSKÝ, R.: *Diagnostický systém transformátorov*, Časopis EE, 6, 2000, č. 5, str. 11 - 13