

na povrchu izolačních systémů točivých strojů. Tento problém se objevuje obecně u strojů provozovaných na větší hladině napětí. Avšak při napájení stroje s rychle se opakujícími napěťovými pulzy (např. měniče frekvence) je minimální kritická hodnota zapalovacího napětí výbojů značně menší. Potlačováním klouzavých výbojů se zabývají jak výrobci generátorů, tak výrobci motorů větších výkonů. Možnosti omezení negativního působení zvýšené intenzity elektrického pole v některém místě izolačního systému točivého stroje jsou různé. Ochranné laky, které se běžně používají pro rozložení elektrického pole tak, aby k výbojům nedošlo, mají omezenou životnost a tepelnou odolnost (obr. 4). Maximální tepelná odolnost může být negativní vlastností stále více používaných polovodivých pásek, které se používají namísto ochranných laků. V článku představená možnost omezení výbojové činnosti pomocí stínící vložky má oproti těmto řešením výhodu v podstatě neomezené tepelné odolnosti. Větší výrobní náročnost může však hovořit proti ní.

Další možností, která byla představena např. v [4], je použití speciálního řešení *Stress Grading System*. To je založeno na obecně známých principech postupně se snižujícího zatížení izolačního systému a vhodně upraveno pro dané účely. Tato logická možnost omezení namáhání exponovaného místa elektroizolačního systému však přináší technologické komplikace, a proto se jen těžko bude zavádět do sériové výroby.

#### Poděkování:

Práce vznikla v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice – řešeného na pracovišti autorů.

#### Literatura:

- [1] MENTLÍK, V. a kol.: *Spolehlivost pohonů s elektrickými motory napájenými pulzním napětím*. Závěrečná zpráva grantu GAČR 102/00/362, ZČU, Plzeň, 2002.
- [2] TRNKA, P.: *Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním*

*namáhání*. In: *ElectroScope*, 2008, roč. 2008, č. 1, s. 1–4, ISSN 1802-4564.

- [3] VOGELSSANG, R. – WEIERS, T. – FRÖHLICH, K. – BRÜTSCH, X.: *Electrical breakdown of high-voltage winding insulations of different manufacturing qualities*. IEEE DEIS Magazine, květen/červen 2006, roč. 22, č. 3.
- [4] WHEELER, J. C. G. – GULLY, A. M. – BAKER, A. E. – PERROT, F. A.: *Novel stress grading system for converter-fed motors*. IEEE DEIS Magazine, leden/únor 2007, roč. 23, č. 1.
- [5] ESPINO-CORTES, F. P. – CHERNEY, E. A. – JAYARAM, S. H.: *Impact of inverter Drives Employing Fast-Switching Devices on Form-Wound AC Machine Stator Coil stress Grading*. IEEE Electrical Insulation Magazine, leden/únor 2007, roč. 23, č. 1, s. 16–28.
- [6] TRNKA, P.: *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*. In: *ElectroScope*, roč. 2007, č. 1, s. 1–7, ISSN 1802-4564.
- [7] MENTLÍK, V. – PIHERA, J. – POLANSKÝ, R. – PROSR, P. – TRNKA, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd., Praha, BEN – technická literatura, s. 439, ISBN 978-80-7300-232-92008.

# Posouzení jištění transformátoru proti nadproudům

Ing. Bernard Lukáš, specialista silnoproudé elektrotechniky

## 1. Blokové schéma zapojení, jištění a parametry transformátoru

Na obr. je blokové schéma zapojení. Popis jištění a parametry transformátoru jsou uvedeny v tab.

## 2. Výpočet zkratových proudů

### 2.1 Primární zkratový proud při zkratu na výstupu obou sekundárních vinutí

$$P_n = 2\,380 \text{ kV}\cdot\text{A}, U_n = 22 \text{ kV}, I_n = 62,5 \text{ A}, u_K = 8,4 \%$$

#### 2.1.1 Výpočet složek impedance zkratového obvodu

a) jmenovitá impedance transformátoru:

$$Z_{nT} = \frac{U_f}{I_n} = \frac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 62,5} = 203,227 \Omega$$

b) impedance transformátoru nakrátko:

$$Z_{KT} = u_K \cdot Z_{nT} = 0,084 \times 203,233 = 17,072 \Omega$$

c) činný odpor a reaktance transformátoru nakrátko za podmínky, že:

$$u_{KX}/u_{KR} = \tan \varphi = 4,4 \Rightarrow \cos \varphi = 0,222 \text{ a } \sin \varphi = 0,975:$$

$$\square \text{ činný odpor: } R_{KT} = Z_{KT} \cdot \cos \varphi = 17,072 \times 0,222 = 3,79 \Omega$$

$$\square \text{ reaktance: } X_{KT} = Z_{KT} \cdot \sin \varphi = 17,072 \times 0,975 = 16,645 \Omega$$

d) pro vedení AXEKCY 3 × 1 × 70, 250 m platí:

$$R_K = 0,128 \Omega$$

$$X_K = 0,073 \Omega$$

e) celková impedance obvodu:

$$Z = \sqrt{(R_{KT} + R_X)^2 + (X_{KT} + X_X)^2} = \sqrt{(3,790 + 0,128)^2 + (16,645 + 0,073)^2} = 17,171 \Omega$$

f) ustálený třífázový zkratový proud:

$$I_{K3} = \frac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 17,171} = 740 \text{ A}$$

g) ustálený dvoufázový zkratový proud:

$$I_{K2} = \frac{22\,000}{2 \cdot 17,171} = 641 \text{ A}$$

S přihlédnutím na útlum venkovní napájecí sítě 22 kV budou skutečné zkratové poměry:

h) ustálený třífázový zkratový proud skutečný:

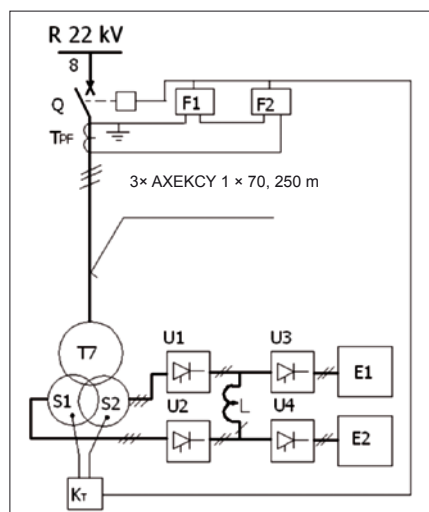
$$I_{K3s} = 0,95 I_{K3} = 0,95 \times 740 = 703 \text{ A}$$

i) ustálený dvoufázový zkratový proud skutečný:

$$I_{K2s} = 0,8 I_{K2} = 0,8 \times 641 = 513 \text{ A}$$

### 2.2 Primární zkratový proud při zkratu na výstupu jednoho sekundárního vinutí

$$P_n = 1\,190 \text{ kV}\cdot\text{A}, U_n = 22 \text{ kV}, I_n = 31,25 \text{ A}, u_K = 7,3 \%$$



Blokové schéma transformátoru F7 a výkonové elektroniky kelímkové pece

Tabulka s údaji k blokovému schématu

Označení	Popis
F1	nadproudová ochrana AT31X, 5 A nastavení: - 5 A (primární proud 75 A), 0,5 s
F2	nadproudová ochrana A32, 25 A nastavení: - 30 A (primární proud 450 A), - 50 ms
T <sub>PF</sub>	měřicí transformátor proudu 75/5 A
Q	výkonový vakuový vypínač
T7	transformátor DTTHDG 2500/20, č. 204246, 22/2× 0,79 kV, F, IP00 parametry: - U <sub>p</sub> : 23 100, 22 000, 20 900 V, - I <sub>p</sub> : 62,5 A, - U <sub>s</sub> : S1 - 1 190 kV·A, 790 V, 870 A, Dy11, - U <sub>s</sub> : S2 - 1 190 kV·A, 790 V, 870 A, Dd0, - U <sub>max</sub> : 24/1,1/1,1 kV, - u <sub>k</sub> : 8,4/7,3/7,3 %, - I <sub>K3</sub> ustálený: 0,74 kA, - P <sub>n</sub> : 2 380 kV·A, - trvání zkratu: max. 2 s
U1 až U4	výkonová elektronika
E1, E2	kelímkové tavicí pece
L	vyrovnávací tlumivka stejnosměrného obvodu
K <sub>T</sub>	relé (vypíná T7 při překročení teploty vinutí)

### 2.2.1 Výpočet složek impedance zkratového obvodu

a) jmenovitá impedance transformátoru:

$$Z_{nT} = \frac{U_f}{I_n} = \frac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 31,25} = 406,455 \, \Omega$$

b) impedance transformátoru nakrátko:

$$Z_{KT} = u_K \cdot Z_{nT} = 0,073 \times 406,455 = 29,671 \, \Omega$$

c) činný odpor:

$$R_{KT} = Z_{KT} \cdot \cos \varphi = 29,671 \times 0,222 = 6,590 \, \Omega$$

d) reaktance

$$X_{KT} = Z_{KT} \cdot \sin \varphi = 29,671 \times 0,975 = 28,930 \, \Omega$$

e) pro vedení AXEKCY 3× 1× 70, 250 m platí:

$$R_K = 0,128 \, \Omega, X_K = 0,073 \, \Omega$$

f) celková impedance obvodu:

$$Z = \sqrt{(R_{KT} + R_X)^2 + (X_{KT} + X_X)^2} =$$

$$= \sqrt{(6,590 + 0,128)^2 + (28,930 + 0,073)^2} = 29,770 \, \Omega$$

g) ustálený třífázový zkratový proud:

$$I_{K3} = \frac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 29,770} = 427 \, \text{A}$$

h) ustálený dvoufázový zkratový proud:

$$I_{K2} = \frac{22\,000}{2 \cdot 29,770} = 369 \, \text{A}$$

S přihlédnutím na útlum venkovní napájecí sítě 22 kV budou skutečné zkratové poměry:

i) ustálený třífázový zkratový proud skutečný:

$$I_{K3s} = 0,95 I_{K3} = 0,95 \times 427 = 406 \, \text{A}$$

j) ustálený dvoufázový zkratový proud skutečný:

$$I_{K2s} = 0,8 I_{K2} = 0,8 \times 369 = 295 \, \text{A}$$

Pozn.:

Při výpočtu zkratových poměrů byly zanedbány příspěvky točivých strojů, které jsou zanedbatelné. Útlum nadřazené napájecí sítě 22 kV stanovený pro třífázový zkrat byl zohledněn činitelem 0,95 a pro dvoufázový zkrat činitelem 0,8.

## 3. Posouzení jištění transformátoru T7

### 3.1 Jištění proti zkratu

#### 3.1.1 Nadproudová ochrana F1, AT31X

Tato ochrana ( $I_n = 5 \, \text{A}$ , 24 V DC) je nastavena na vypínací hodnotu proudu  $I_r = 1 \times 5 \times 75/5 = 75 \, \text{A}$  a vypínací doba 0,5 s. Ochrana jistí napájecí kabel 22 kV a transformátor proti dvoufázovému i třífázovému zkratu vzniklému na trase kabelu, vstupu primárního vinutí nebo výstupu jednoho nebo obou sekundárních vinutí transformátoru.

#### 3.1.2 Nadproudová ochrana F2, A32

Tato ochrana ( $I_n = 25 \, \text{A}$ ) s vypínáním bez časového zpoždění s původním nastavením na vypínací hodnotu proudu  $I_r = 0,8 \times 25 \times 75/5 = 300 \, \text{A}$  a mžiková vypínací doba 50 ms byla z důvodu chybných, tj. nežádoucích vypínání (rázovým přechodo-

vým proudem při zapínání transformátoru) přestavena na vypínací hodnotu  $I_r = 1,2 \times 25 \times 75/5 = 450 \, \text{A}$  při nezměněné vypínací době 50 ms. Ochrana jistí napájecí kabel a transformátor proti dvoufázovým i třífázovým zkratům, vzniklým na trase kabelu a vstupu prim. vinutí. Na sekundární straně pouze v případě obou paralelně propojených vinutí přes plně otevřené řízení výkonové usměrňovače. Vypínání je mžikové (doba zpoždění 50 ms).

## 3.2 Jištění proti přetížení

Z blokového schématu je zřejmé, že sekundární výstup obou vinutí není jištěn proudovými ochranami proti přetížení. Dodavatel technologie řešil problém vestavěnými zapojenými termistory, které prostřednictvím vyhodnocovacího relé dávají popud k vypínání transformátoru při překročení dovolené teploty vinutí. Podle vyjádření vedoucího elektrodržby je funkce vypínacího obvodu ověřována rozpojením obvodu ve lhůtě minimálně jednou ročně. Proti tepelnému přetížení vinutí je transformátor jištěn kvalitativně vyšší tepelnou ochranou prostřednictvím vestavěných pozitivních termistorů a vyhodnocovacího relé, dávající popud k vypínání.

## 4. Závěr

Podle štítkových údajů transformátoru je přípustný zkratový proud na straně 22 kV, 740 A po dobu 2 s. Zkratové proudy nedosahují uvedené hodnoty a jsou vypínány v podstatně kratších časových intervalech, a to proudy nad 450 A za 50 ms, proudy 75 až 450 A za 0,5 s.

Proti tepelnému přetížení je jištění instalováno podle odst. 2, navíc je teplota komory transformátoru trvale sledována obsluhou. Jištění transformátoru vyhovuje bezpečnostním požadavkům provozu a čl. 8, tab. 9, normy ČSN 33 3051 (Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení) platné v době instalace transformátoru.

S přihlédnutím na technickou zastaralost elektromechanických proudových ochran a nutnosti jejich pravidelného zkoušení lze doporučit jejich výměnu za moderní typ (např. SPAM 150C), který obsahuje výstup samočinné kontroly, má vícestupňové nadproudové moduly proti zkratům, přetížení, zemnímu spojení, varovný alarm začátku přetížení a komunikační port. ☒