

Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním namáhání

P. Trnka

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,

Univerzita 26, Plzeň

E-mail : pavel@ket.zcu.cz

Anotace:

Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů jsou během provozu vystaveny značnému namáhání. Musí odolávat účinkům provozního prostředí i mechanickým namáháním. Dále zde působí tepelné a v neposlední řadě i elektrické degradační faktory. Stroje středních a větších výkonů pracující na vyšších hladinách provozního napětí jsou vystaveny mimo jiné také účinkům výbojové činnosti. Výbojová činnost probíhá na různých částech izolačního systému. K částečným výbojům dochází uvnitř izolačních materiálů v mikrodutinách jejich struktury. Další výbojová činnost se vyskytuje v místech, kde izolované tyče vinutí točivého stroje procházejí drážkou magnetického obvodu stroje – jedná se o drážkové výboje. Zvláštním případem jsou výboje, které vznikají na výstupu izolovaných tyčí vinutí z drážky. Svou podstatou se jedná o výboje klouzavé. Pro jejich potlačení se aplikují na povrch izolačního systému ochranné vrstvy různého typu. Tento příspěvek se zabývá problematikou degradace ochranných vrstev v případě jejich interakce s pulzním namáháním.

ÚVOD

Vysokonapěťové izolační systémy elektrických točivých strojů využívají ochranné vrstvy na površích exponovaných míst elektrické izolace vinutí. Ty mají zabezpečit zmírnění skokové změny intenzity elektrického pole na výstupech vodičů vinutí z drážek. Na těchto místech dochází ke zvýšení aktivity výbojové činnosti a tím ke značné degradaci izolačního systému. Proto je třeba přijmout vhodná opatření k zamezení vzniku výbojů. V praxi se převážně používají ochranné laky nebo pásy. Exponované místo izolačního systému je při použití ochranné pásky ovinuto částečně vodivou páskou. Ochranná páska má vhodnou takovou rezistivitu aby zmírnila ostrý přechod okolí (magnetický obvod/vzduch) v místě, kde izolovaná tyč vinutí opouští drážku stroje v čele vinutí. Tím se zamezí vzniku klouzavých výbojů v tomto místě. Okolím izolovaného vodiče v drážce je magnetický obvod, tedy vodič. V čele vinutí je v bezprostředním okolí vodiče vzduch. Příklad použití ochranných laků pro omezení výbojové činnosti na výstupu statorového vinutí točivého stroje z drážky je uvedeno na (obr. 1). Na obrázku jsou patrné jednotlivé vrstvy ochranného laku, které zamezují výbojové činnosti. Vrstvy laků mají postupně se snižující rezistivitu. Tím je zabezpečeno rovnoměrnější rozložení elektrického pole a tedy i namáhání tohoto místa izolace vinutí výbojovou činností. V případě změny tvaru a frekvence napětí (z 50 Hz sin při napájení ze sítě na vysokofrekvenční pulzní napětí při napájení z měniče kmitočtu) přivedeného na svorky točivého stroje a tím i na vinutí točivého stroje, je třeba věnovat pozornost zda ochranné vrstvy i nadále plní svoji funkci.

EXPERIMENT

Pro ověření funkce ochranných laků při pulzním namáhání byl proveden následující experiment. Vzorke izolačního systému opatřené „polovodivými“ ochranami byly vystaveny expozici pulzním napětím různých hladin a frekvenci 10 kHz. Pro srovnání byla část vzorků exponována různými hladinami střídavých napětí 50 Hz.

Jako vhodný parametr pro sledování degradace ochranných laků bylo zvoleno měření kapacity vzorků. Dále byl stav ochranných laků sledován vizuální kontrolou. Dalším sledovaným parametrem byl ztrátový činitel, parametr, vypovídající o stavu izolačního materiálu během testů.

Kapacita

Měření kapacit vzorků vychází ze znalostí o degradaci ochranných vrstev. Ochranné laky se vlivem elektrického pole „odprašují“ z povrchu izolace [4]. Po určité době na exponovaných místech mizí zcela a jejich ochranný vliv na izolační systém tím zaniká. V tomto okamžiku nastává degradace samotného izolačního systému.

Ochranné vrstvy tvořily v tomto experimentu (při měření kapacit) měřicí elektrodu. Degradaci „polovodivé“ vrstvy (laku) dochází k jejímu „odprašování“ a tím změně plochy ($S(m^2)$) elektrody. Takto měřená kapacita je přímo úměrná ploše elektrody. Závislost lze popsat známou relací (1).

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, (F; F \cdot m^{-1}, m^2, m), \quad (1)$$

kde d je tloušťka izolačního materiálu.

Kapacita vzorků během stárnutí roste, což je vysvětlováno aktivitou částečných výbojů viz. např. [1]. Mírné zvýšení kapacity izolačního materiálu během degradace elektrickým polem může být

vysvětleno narůstáním vodivých drah uvnitř izolačního materiálu. Vodivé nebo částečně vodivé dráhy uvnitř izolačního materiálu snižují efektivní tloušťku izolace d . Kapacita je nepřímo úměrná tloušťce izolace (vzorku) (1). Naměřená změna kapacity odpovídá změně velikosti elektrody tj. degradaci polovodivého laku a růstu velikosti kapacity vzorků díky degradaci.

Výsledná míra degradace je tedy úměrná změně kapacity ΔC (2).

$$\Delta C \approx \Delta C_{DEIM} - \Delta C_{PO} = K_{CDIM} \frac{1}{d - \Delta d} - K_{CPO} S - \Delta S, \quad (2)$$

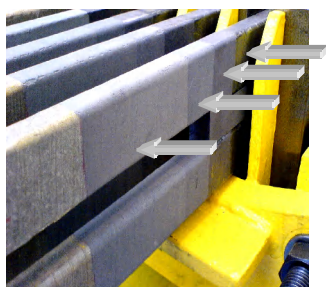
kde: ΔC_{DEIM} je přírůstek kapacity vzorku díky degradaci napětím (pF),

ΔC_{PO} je úbytek kapacity degradací polovodivých ochranných vrstev (pF),

S je plocha elektrod (m^2).

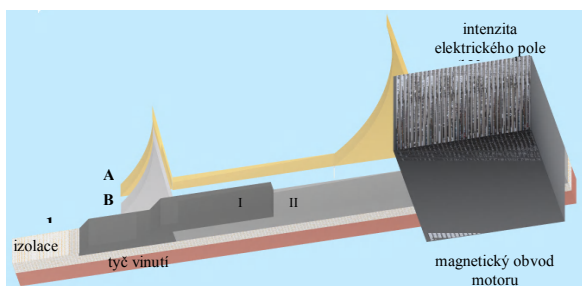
K_{CDEIM} je konstanta zahrnující permitivitu zkoušeného vzorku a plochu měřicí elektrody.

K_{CPO} je konstanta zahrnující permitivitu zkoušeného vzorku a tloušťku materiálu.



Obr. 1: Příklad rozložení ochranných laků. Patrné jsou jednotlivé vrstvy.

Znázornění problémového místa izolačního systému točivého stroje je uvedeno na obr. 2. Zobrazen je zde výstup vodiče z drážky, tj. magnetického obvodu stroje a izolované tyče vinutí opatřené ochrannými nátěry (I, II). Je zde patrné i jejich rozložení. Uvedena je i předpokládaná intenzita elektrického pole v závislosti na vzdálenosti od magnetického obvodu stroje, a to jak pro pulzní napětí A, tak i pro napětí střídavé 50 Hz.



Obr. 2: Schematické zobrazení třídimenzionálního uspořádání na výstupu vodiče z drážky. I, II jsou polovodivé laky; E intenzita elektrického pole; d vzdálenost; A intenzita elektrického pole na povrchu polovodivých ochranných vrstev při pulzním namáhání; B intenzita elektrického pole na povrchu polovodivých ochranných vrstev při 50 Hz síťového napětí.

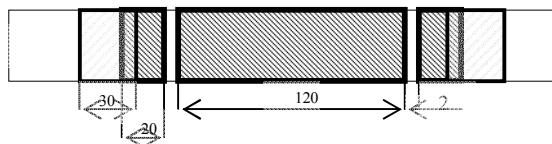
Testované vzorky

Pro sledování stavu polovodivých ochranných vrstev při elektrickém namáhání byly vyrobeny vzorky odpovídající svým provedením reálným částem točivých strojů, umožňujících simulaci řešeného problému. Vzorky s izolací běžně používané technologie VPI (vakuově tlaková impregnace) byly opatřeny testovanou polovodivou ochranou. Zkušební vzorky byly vytvořeny ovinutím měděných trnů o rozměrech $5 \times 18 \times 500$ mm izolační páskou pro VPI technologii. Vytvrzení izolačního systému proběhlo dle předepsaného postupu pro VPI technologii a konkrétní materiál. Na hotový izolační systém byly nanášeny testované polovodivé vrstvy.

Skupiny vzorků byly podrobeny zrychlenému stárnutí na různých hladinách napětí (3, 3,5, 4, 4,5, 5 kV, 10 kHz). Ve stanovených časech bylo prováděno měření kapacit a ztrátového činitele.

Nákres uspořádání polovodivých ochranných vrstev na vzorku je uveden na obr. 3, hotový vzorek pak na obr. 4. Tyčové vzorky svým tvarem odpovídají rovné části statorových tyčí velkých točivých strojů.

Takto vyrobené vzorky odpovídaly 4kV izolačnímu systému pro teplotní třídu F.



- Polovodivý lak – Semiconductive Varnish 8001 (105-528)
- Vodivý lak – Conductive Varnish 8003 (105-527)

Obr. 3: Uspořádání ochranných laků na vzorku izolačního systému.



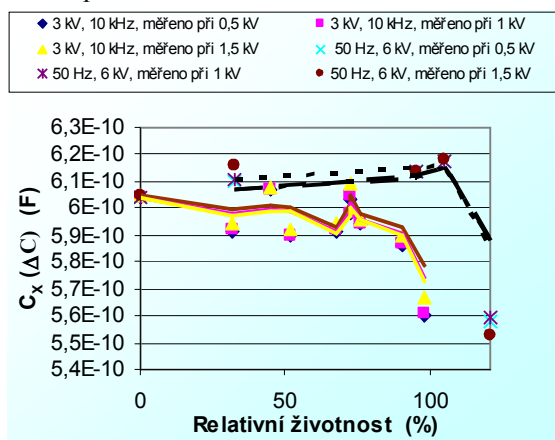
Obr. 4: Vzorek izolačního systému, izolační systém vytvrzený technologií VPI. Opatřen ochrannými nátěry pro testy.

DISKUSE VÝSLEDKŮ

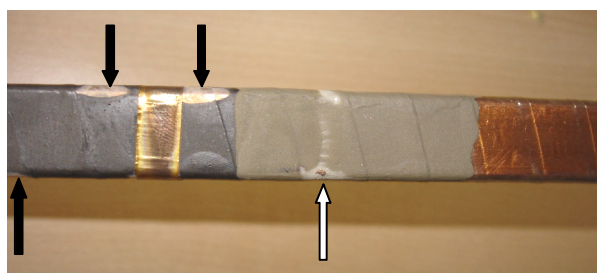
Na obr. 5 je představena jedna z naměřených závislostí kapacit vzorků testovaných 3 kV, 10 kHz střídavým napětím 6 kV, 50 Hz. Při těchto namáháních byla životnost vzorků přibližně stejná, proto jsou tato dvě testovací napětí z časového hlediska dobře porovnatelná. Z grafu je patrná klesající závislost kapacity vzorků. Naměřená kapacita odpovídá ΔC z (2). Z grafu na obr. 5 je zřejmá větší degradace na vzorcích namáhaných pulzním napětím. Na vzorcích namáhaných pulzním napětím o frekvenci 10 kHz a napětí 3 kV kapacita během testu klesala rychleji než na vzorcích stárnutých střídavým napětím 50 Hz a napětí 6 kV.

Na vodorovné ose je čas vyjádřen jako relativní životnost, hodnota doby života sledovaného parametru je vztažena k celkové životnosti vzorků testovaných při daném napětí, a vyjádřená

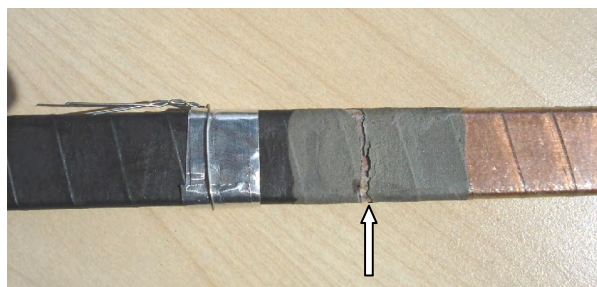
v procentech. Stoprocentní relativní životnost odpovídá času potřebnému k tomu, aby u 63,2 % (viz. Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti doby do průrazu) vzorků testovaných za daných podmínek došlo k průrazu.



Obr. 5: Příklad naměřené závislosti kapacit vzorků během stárnutí pulzním napětím 3 kV, 10 kHz a střídavým napětím 50 Hz.



Obr. 6: Vzorek opatřený ochrannými laky po expozici pulzním napětím.



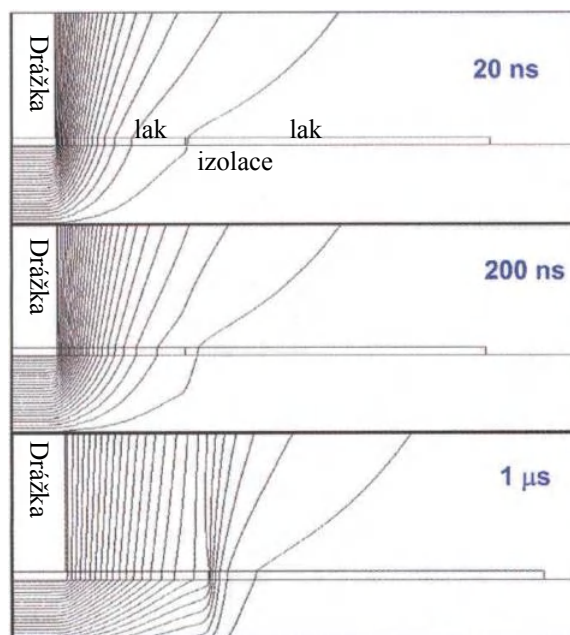
Obr. 7: Vzorek opatřený ochrannými laky po expozici střídavým napětím 50 Hz.

Zjištěná degradace ochranných laků (obr. 6 a 7) odpovídá předpokladům viz. obr. 2. Stejných výsledků bylo dosaženo simulací prováděnou v práci [3] viz. obr. 8.

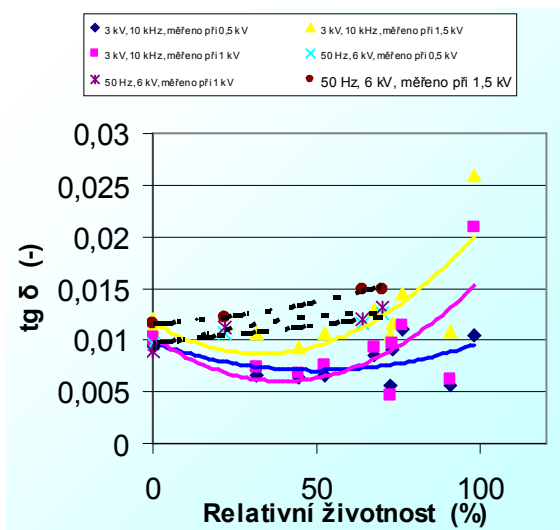
Měření ztrátového činitele

Na obr. 9 jsou výsledky měření časové závislosti ztrátového činitele vzorků. Ztrátový činitel během stárnutí střídavým napětím 50 Hz mírně stoupal. Při stárnutí vzorků vysokofrekvenčním pulzním napětím ztrátový činitel nejprve mírně klesal, posléze začal strmě růst. Tento trend při měření ztrátového činitele je charakteristický pro stárnutí vysokofrekvenčním

pulzním napětím. Tento jev byl poprvé popsán v [8], kdy je nárůst ztrátového činitele při pulzním namáhání připisován dezintegraci vnitřní struktury izolačního kompozitu.



Obr. 8: Výsledky simulací elektrického pole na výstupu vodiče z drážky pro různé náběžné doby obdélkového pulzu. Převzato z [3].



Obr. 9: Trend vývoje ztrátového činitele vzorků namáhaných pulzním napětím 3 kV, 10 kHz a 6 kV, 50 Hz v relativních hodnotách.

Navrhovaná opatření

Řešení, která musí být přijata jako opatření proti zvýšené degradaci ochranných "polovodivých" ochran (vrstev, laků) při pulzním namáhání spočívá ve změně vodivosti ochranného laku, nebo polovodivé pásy s ohledem na frekvenci a strmost hran přivedeného napětí. Obecně je možno říci, že s ohledem na frekvenci při pulzním namáhání je nutno použít tím vodivější ochranu, čím je vyšší frekvence a

vyšší strmost nárůstu napětí při jednotlivých napěťových pulzech. Návrhem polovodiivých ochranných vrstev zabývá např. [2], [3].

Dalším zřejmým vylepšením je několika stupňová aplikace ochranných laků, se stupňovitě se snižující vodivostí. Délky jednotlivých vrstev a jejich přesahy by měly být s ohledem na aplikované frekvence zkráceny oproti použití při střídavém napětí 50 Hz.

Také zaměření se na některé strukturální aspekty stárnutí ochranných vrstev, plánuje se např. použití TMA analýzy [6] pro měření mechanických vlastností v závislosti na teplotě.

ZÁVĚR

Test ochranných „polovodiivých“ vrstev – laků používaných ve vysokonapěťových vinutích elektrických točivých strojů jako ochrana před klouzavými výboji na výstupu vodiče z drážky prokázal dva předpoklady vycházející z praxe.

Za první - ochrany běžně používané při napájení točivých strojů síťovým napětím 50 Hz jsou silně degradovány vysokofrekvenčním pulzním napětím při napájení stroje z měniče kmitočtu.

Za druhé - jejich vodivost a rozměry musí být navrhovány s ohledem na druhy působícího napětí, tj. jeho frekvenci a strmosti nárůstu napěťových pulzů ve stroji.

Provedená měření prokázala shodu s testy prováděnými na jiných pracovištích [2].

PODĚKOVÁNÍ

Tento výzkum je podporován výzkumným záměrem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

LITERATURA

- [1] Mentlík V., Pihera J., Tábořík O., Trnka P. Vliv pulzního namáhání na izolační systém elektrických strojů, In Diagnostika'07, Plzeň, Západočeská univerzita, 2007. s. 58-61, ISBN 978-80-7043-557-1.
- [2] Espino-Cortes F. P., Jayaram S. H., Cherney E. A. "Effectiveness of Stress Control Coatings in Medium Voltage Form Wound Coils Ends under Fast Rise Time Pulses and Contamination" Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005, Proceedings, 23-26 Oct. 2005, Page(s):167 – 170.
- [3] 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, Jan/Feb 2007, Vol. 23, No. 1, pp. 16-28.
- [4] Trnka, P. The Pulse Stress in Interaction with Insulation Systems, [Ph.D. Thesis], Plzeň, University of West Bohemian in Pilsen, Czech Republic, 86 p., 2005.
- [5] Barták, A, Mravinač, L. at al. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984, 256 s.
- [6] Polanský, R. Aplikace TMA a XRF v elektrotechnologické diagnostice. In Proceedings of the 5th International Conference Elektro 2004, Žilina, Žilinská univerzita, 2004, s. 376-379, ISBN 80-8070-252-7.
- [7] Mentlík V.; Polanský, R.; Prosr, P. Termomechanická analýza velmi tenkých vzorků, In Diagnostika '07. Plzeň : Západočeská univerzita, 2007. s. 268-271. ISBN 978-80-7043-557-1.
- [8] Mentlík V., a kol.: Spolehlivost pohonů s elektrickými motory napájenými pulzním napětím, Závěrečná zpráva grantu GAČR 102/00/362, ZČU, Plzeň, 2002.