

## Měření voltampérových charakteristik pásek a laků používaných jako ochrana před klouzavými výboji u výstupu vinutí čel synchronních generátorů

O. Krpal<sup>1</sup>, E. Kučerová<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : [okrpal@ket.zcu.cz](mailto:okrpal@ket.zcu.cz), [kucerova@ket.zcu.cz](mailto:kucerova@ket.zcu.cz)

### Anotace:

Článek se zabývá měřením vlastností pásek používaných u výstupu vinutí z čel synchronních generátorů jako ochrana proti klouzavým výbojům. Výboje vznikají v důsledku nerovnoměrného rozložení elektrického pole podél statorové cívky. Pokud by se ochrana neaplikovala, vznikaly by u strojů pracujících cca. od 5 kV a výše zmíněné klouzavé výboje, způsobující degradaci izolace. To by mělo za následek častější odstávky stroje, v horším případě pak proražení hlavní izolace statorové cívky a následnou poruchu. Aplikací těchto povlaků, které jsou tvořeny SiC částicemi a mají nelineární voltampérovou charakteristiku, se nerovnoměrné rozložení pole linearizuje a dochází tak k minimalizaci klouzavých výbojů.

The paper deals with measurement of coatings used in end-winding of synchronous generators as a protection against sliding discharges. These discharges are due to nonlinear distribution of the electric field along the stator coil. If this protection was not applied, at the machines with nominal voltage more than 5 kV the sliding discharges would appear, causing degradation of the insulation. This would result in more frequent machine shutdown, or worse, breakdown of the main insulation of the stator coil and the subsequent failure. By applying these coatings which consist of SiC particles and are characterized by non-linear current-voltage characteristic, the nonlinear distribution of the field gets linear and it leads to minimizing of surface discharges.

### ÚVOD

Synchronní stroje jsou nejčastěji používané na výrobu elektrické energie, tedy jako alternátory. Jejich bezproblémový chod je proto velmi důležitý pro celou elektrizační soustavu. Stroje pracující v synchronních otáčkách se dále využívají jako kompenzátory, které mají za úkol regulovat jalový výkon ve vedení VVN pro udržení stability soustavy. Synchronní motory se používají většinou jako pomaloběžné motory středních a větších výkonů, které pohánějí zařízení bez větších rázů a zatížení a kde je nutnost synchronních otáček. Proto se výrobci strojů snaží zajistit maximální spolehlivost a dlouhou životnost stroje. Velký vliv na životnost má bezpochyby izolační systém točivého stroje, který prakticky určuje její dobu, ale i potřeby odstávky z důvodu diagnostiky nebo opravy.

Izolační systém je v průběhu provozu stroje vystaven několika druhům namáhání. Jedním z nich je namáhání elektrickým polem, kdy u točivých strojů pracujících na provozním napětí nad 5 kV vznikají částečné výboje. Vnitřní ČV vznikají v drážce statoru. Ty jsou způsobeny nedokonalým složením magnetických plechů a tak vytvoření dutinek mezi hlavní izolací cívky a magnetickým obvodem. Klouzavé výboje pak vznikají nerovnoměrným rozložením elektrického pole u výstupu vinutí z čel statoru. Výboje způsobují intenzivní degradaci izolačního systému, tzn. urychlují stárnutí izolace a

na konec mohou způsobit předčasné selhání stroje. Mají podstatný vliv na určování doby životnosti izolačního systému. Proto se konstruktéři těchto strojů snaží částečným výbojům předcházet. Řešením je použití polovodivých materiálů a to aplikováním jak v samotné statorové drážce, tak i na výstupu vinutí z drážky, tedy na čelech vinutí. Polovodivé materiály jsou buď ve formě pásek nebo laků a souhrnně se označují jako polovodivé ochrany. Aplikace polovodivých ochran slouží jako prevence před částečnými výboji a prodlužuje tak dobu životnosti izolačního systému vysokonapěťového točivého stroje.

V anglické literatuře tyto ochrany bývají označovány jako end-winding corona protection (ECP) a nebo semiconductive stress grading tape (or varnish). Polovodivé pásy jsou tvořeny SiC částicemi, které jsou rozmíchány v pryskyřici a nanášené na tkanou polyesterovou pásku. V případě laků se jedná pouze o SiC částicemi rozmíchané ve fenolické pryskyřici. Pásy jsou ve všech stavech vytvrzení, tedy A, B a C.

### APLIKACE OCHRANY PROTI KLOUZAVÝM VÝBOJŮM

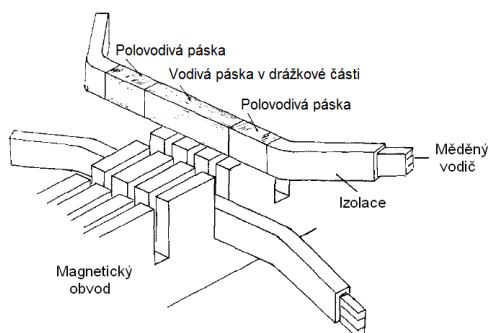
Tyto pásy se navijí na statorové cívky většinou s polovičním překrytím, někdy i více vrstev na sobě. Vytvrzují se 2 hodiny při 120°C. Lak se nanáší v několika vrstvách, aby výsledná tloušťka laku byla

0,2 – 0,5 mm (v závislosti na typu stroje). Délka ECP ochrany je doporučená výrobcem ochran rovnicí:

$$l = U_{\max} / 2 \quad (1)$$

kde  $l$  délka polovodivé ochrany [cm];  
 $U_{\max}$  maximální testovací napětí cívky [kV].

Tyto ochrany se aplikují cca. 20 mm s přesahem přes vodivou drážkovou ochranu. Celé uspořádání statorových cívek a magnetického obvodu je uvedeno na obr. 1.



Obr. 1: Uspořádání statorových cívek [1]

### Vlastnosti polovodivých ochran

Materiály používané pro polovodivé ochrany jsou nelineární, jejich rezistivita se v závislosti na přiloženém elektrickém poli (elektrické intenzitě) mění.

Na materiály jsou kladeny následující požadavky:

Koeficient nelinearity  $\beta$  se u prakticky používaných materiálů pohybuje v rozmezí  $\beta = 10-40$  (podle použití polovodivé ochrany) a udává se vztahem:

$$\beta = 1 + d \ln(\gamma) / d \ln(E) \quad (2)$$

kde  $\beta$  koeficient nelinearity [-];  
 $\gamma$  elektrické vodivost [ $S \cdot m^{-1}$ ];  
 $E$  hodnota intenzity elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ].

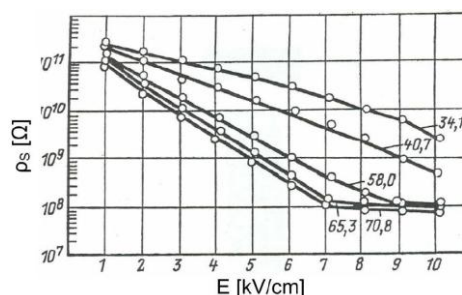
Z hodnoty koeficientu nelinearity pak vyplývají také podmínky pro odpovídající hodnoty rezistivity materiálu v závislosti na působícím elektrickém poli. Ve slabých elektrických polích ( $E < 1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) musí být s ohledem na vznikající ztráty konduktivita materiálu  $\gamma < 10-10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  (rezistivita  $> 1010 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ). Pro intenzitu  $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  pak při frekvenci  $f = 50 \text{ Hz}$  a relativní permitivitě materiálu  $\epsilon_r = 10$  by konduktivita materiálu měla splňovat podmínku, že  $\gamma \gg \epsilon \omega$ , z čehož  $\gamma \gg 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  (ideálně  $10^{-7} - 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Dalším kritériálním parametrem, vymežujícím vlastnosti ochranného povlaku je velikost dovolených

tepelných ztrát v izolaci, které jsou determinovány procházejícím elektrickým proudem. Podle reálných měření by velikost proudů tekoucích ochrannou vrstvou na výstupu z drážky měla být menší než cca  $50 \text{ } \mu\text{A}$  a vzniklé Jouleovy ztráty by neměly překročit zhruba  $0,2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  plochy izolace.

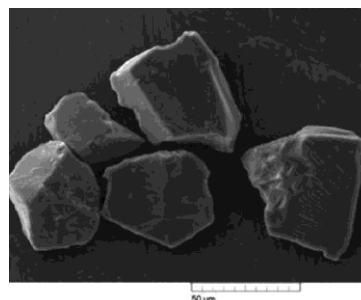
### Modifikace vlastností polovodivých ochran užívaných u výstupu vinutí z čel

SiC prášek se skládá z SiC zrn, která jsou vždy obklopena pojivem. Dielektrické vlastnosti systému jsou určeny kontaktní zónou na mikroskopické úrovni a vodivé cesty jsou určeny různými kontaktními místy na makroskopické hladině. Pokud se tedy určují elektrické vlastnosti, oba tyto pohledy musí být zahrnuty. Chování systému pro stejnosměrné napětí je určeno pouze odporem na kontaktech. Pokud se jedná o napětí střídavé, celkovou charakteristiku určuje odpor, kapacita, ale i okolní prostředí, ve kterém je prášek umístěn. Závislost odporu složky na intenzitě elektrického pole v rozsahu od  $1 \text{ kV/cm}$  až do  $10 \text{ kV/cm}$  je zobrazena na obr. 2.



Obr. 2: Vliv koncentrace SiC prášku na rezistivitu [2]

1. Zmenšením rozměrů hlavních částecek SiC zvyšuje odpor složky a zároveň snižuje koeficient nelinearity  $\beta$ .
2. Existuje jistá hodnota koncentrace SiC prášku ve složce, nad kterou se již hodnota odporu nemění (obr. 2). Pokud je koncentrace SiC vyšší než limit, složka se stává porézní a hodnota odporu může poklesnout navlhnutím.
3. Každý typ prášku a jeho koncentrace v kompozitu určuje jistou kritickou hodnotu elektrického namáhání, nad kterou se zastavuje pokles odporu. Koeficient nelinearity má jasné maximum.



Obr. 3: Částičky karbidu křemíku [4]

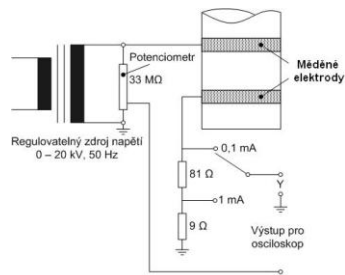
## MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK

Bylo změřeno šest polovodivých pásek a dvě polovodivé laky. Pět pásek bylo od výrobce VonRoll, tzn. typ pásek 217.01, 217.02, 217.03, 217.21 a 217.22 a jedna páska Akasic 4b od výrobce Electrical Insulation Company. Posledně jmenovaná páska byla před vytvrzením stárnutá po dobu 2 let v 7 °C. Typy laků byly P 8001 a P 8002. Měření se provádělo podle interní normy VonRoll SIB 14\_07a.

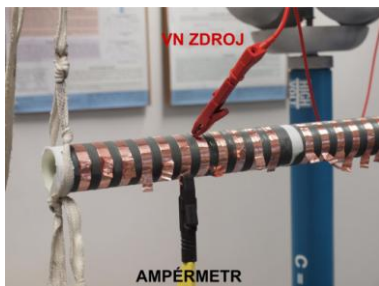
Na sklotextitovou trubku o vnějším průměru 40 mm a tloušťkou stěny 1 mm se nanasla teflonová folie, na kterou se poté navinula polovodivá páska s polovičním překrytím. Takto zhotovený vzorek se umístil do horkovzdušné pece, kde byl umístěn po dobu 120 min při 120 °C.

Lak se nejdříve důkladně promíchal, poté se na sklotextitovou trubku nanaslo pět vrstev štětcem. Mezi každým nátěrem byla 1 hodinová pauza, aby lak uschl. Po nánosu všech vrstev se lak nechal doschnout 24 hodin.

Pro měření se na povrch polovodivých ochran umístily měděné samolepící elektrody o šířce 10 mm ve vzdálenosti 10 mm od sebe. Takto bylo nalepeno 11 měděných pásek a vzniklo tak 10 měřících políček. V každém z nich se poté měřila V-A charakteristika tak, jak je uvedeno v obr. 4. Na jednu elektrodu se připojil zdroj napětí, z druhé se odčítal proud. Měření probíhalo v rozsahu od 250 V do 4 500 V. Nejdříve se připojilo napětí 4 500 V, proud se nechal ustábit. Po ustálení proudu se snižovala hodnota napětí po kroku 250 V až do hodnoty 250 V. Naměřené hodnoty proudů jsou poté vyděleny obvodem tyče tak, abychom dostali tzv. čtvercový odpor, který slouží jako srovnávací hodnota u polovodivých ochran.

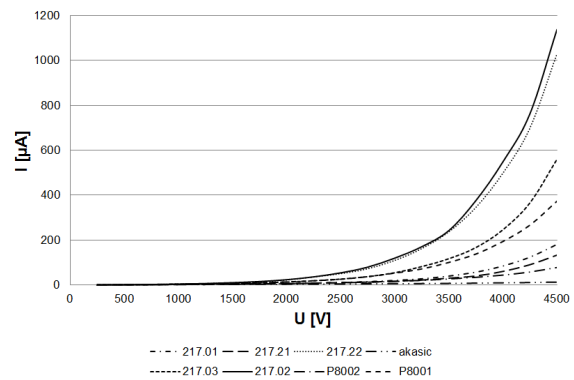


Obr. 4: Uspořádání statorových cívek [3]



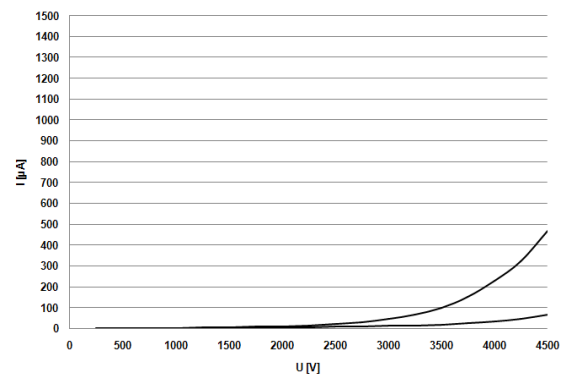
Obr. 5: Fotografie z měření

## Výsledky měření

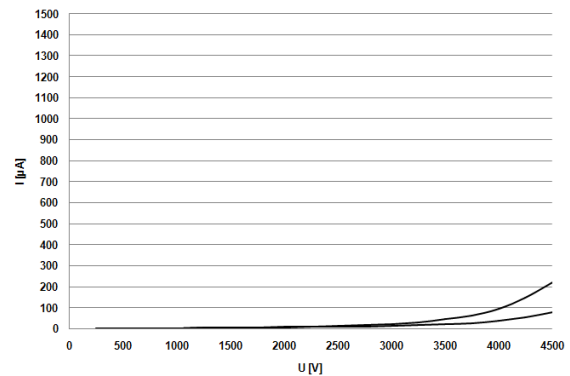


Obr. 6: Aritmetické průměry polovodivých ochran

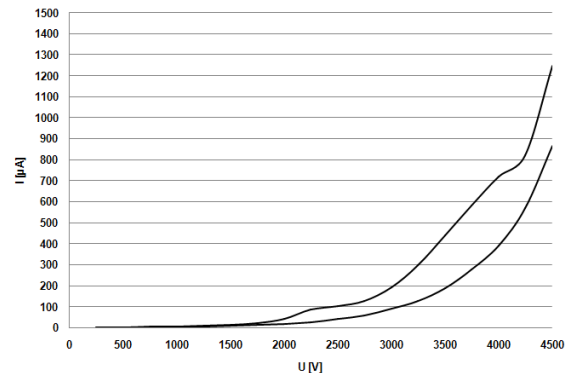
## Porovnání rozptylů polovodivých ochran



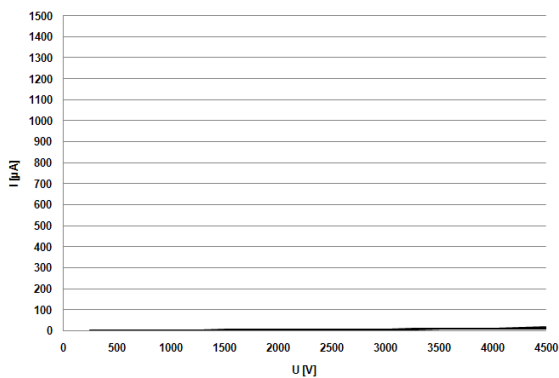
Obr. 7: V-A charakteristika - ECP VonRoll 217.01



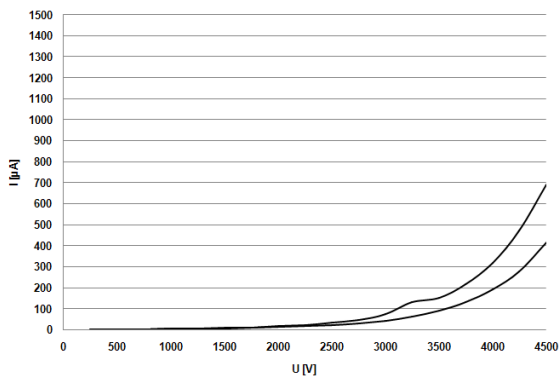
Obr. 8: V-A charakteristika - ECP VonRoll 217.21



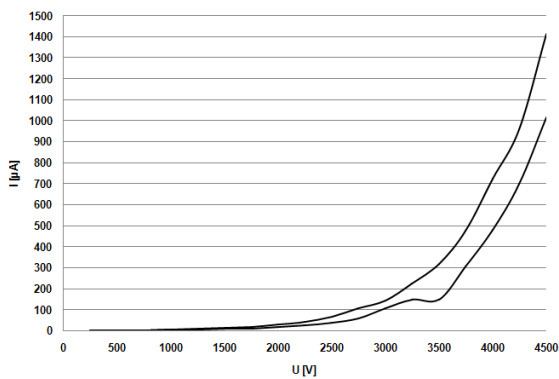
Obr. 9: V-A charakteristika - ECP VonRoll 217.22



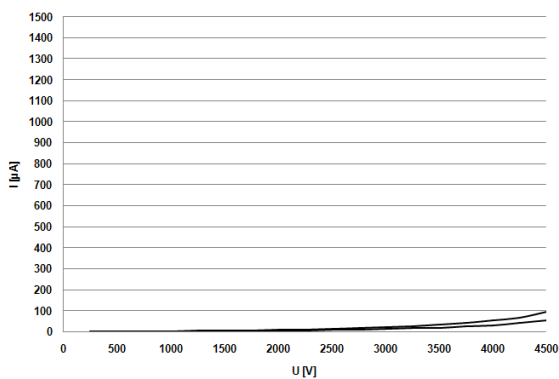
Obr. 10: V-A charakteristika - ECP Akasic 4b



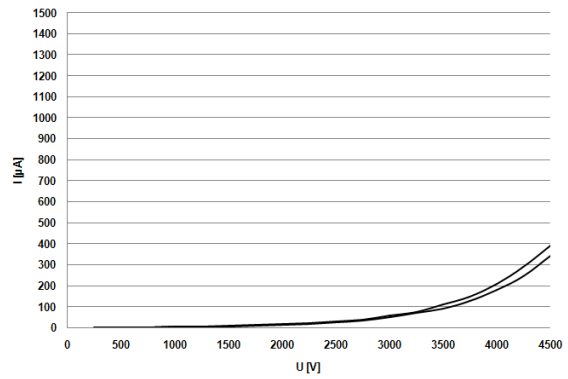
Obr. 11: V-A charakteristika - ECP VonRoll 217.03



Obr. 12: V-A charakteristika - ECP VonRoll 217.02



Obr. 13: V-A charakteristika - ECP VonRoll P8002



Obr. 14: V-A charakteristika - ECP VonRoll P8001

## ZÁVĚR

V článku byl popsán způsob měření voltampérových charakteristik polovodivých ochran.

Byly změřeny jak polovodivé pásy, tak polovodivé laky. Aritmetické průměry jsou uvedeny v obr. 6. Jednotlivé rozptyly V-A charakteristik daných polovodivých pásek a laků jsou zobrazeny v obr. 7 – 14. Největší nelinearitu vykazuje páska VonRoll 217.22 společně s páskou VonRoll 217.02. Nelinearita V-A charakteristiky laku P 8001 je nižší než u laku P 8002.

Polovodivá páska Akasic 4b dosahuje velmi nízkých hodnot a prakticky nevykazuje nelineární průběh. Toto bylo způsobeno skladováním této pásy po dobu 2 let.

## LITERATURA

- [1] Roberts, A. Stress Grading for High Voltage Motor and Generator Coils. *IEEE*. 1995, 1, p. 26-31.
- [2] MÅRTENSSON, E.; GÄFVERT, U.; ONNEBY, C. Alternate current characteristic of SiC powders. *Journal of Applied Physics*. 2001, 1, s. 2870-2878 .
- [3] Halbleitende Glimmschutzbander : Strom-Spannungsverlauf vom Glimmschutzbelag. - : Isola, 1978. 3 p.
- [4] DONZEL, Lise; GREUTER, Felix; CHRISTEN, Thomas. Nonlinear Resistive Electric Field Grading : Part 2: Materials and Applications. *IEEE*. 2011, 2, s. 18-29
- [5] Malamud, R.; Schumovskaya, G.; Stepanova, T. The Development of Semiconducting Materials for Anti-Corona Protection Designs of Generator High Voltage Winding and their Testing at Cryogenic Temperatures. *IEEE*. 2008, 1, p. 420-423.