

Elektrické a tepelné analýzy varistorov na báze oxidov kovov

Glasa Miloš · Elektrotechnika

26.10.2012



Mechanická a tepelná odolnosť ZnO varistorov triedy I a II pri pôsobení voči impulzným prúdom menovitej hodnoty deklarovanej výrobcom sú hlavnými témami príspevku. Ten sa zameriava na rôzne počítačové riešenie modelu v oblasti ochrany pred účinkami prepätí. Prvá časť je venovaná modelovaniu VA charakteristiky z pohľadu jej nelinearity.

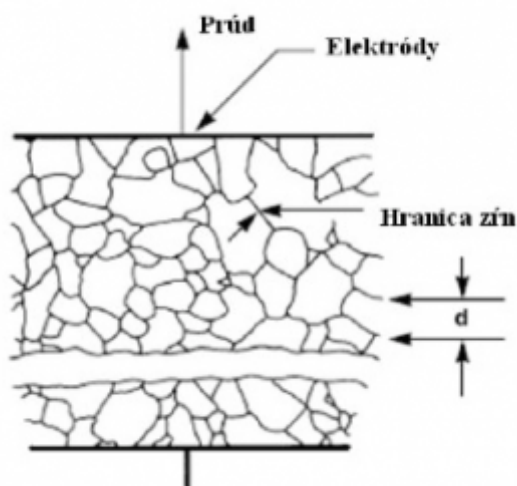
Druhá časť pojednáva o „komplexnej“ elektro - tepelnej analýze MOV.

1. Úvod

Úspešné pôsobenie varistora voči bleskovým a impulzným prúdom je definované v jednotlivých technických normách (STN EN 61643-11 a STN EN 61643-331). Výrobný proces sinterovaním zrn keramiky oxidov kovov s prímiesami umožňuje využívanie varistora predovšetkým v oblasti prepäťovej ochrany. Technické normy presne definujú pôsobenie tohto prvku v jednotlivých triedach ochrany pre nominálne hodnoty prúdov. V dnešnej dobe sa veľká pozornosť sústreďuje v oblasti vývoja na matematické a počítačové analýzy. Tie majú svoje nesporné výhody hlavne čo sa týka nových experimentov. Samozrejme výsledky takýchto analýz by mali korešpondovať s výsledkami experimentov z laboratórií, inak je model neperspektívny.

2. Varistor na báze oxidov kovov

Varistor je nelineárny a tepelne závislý rezistor s nelineárnou V-A charakteristikou, ktorá mu umožňuje širokú škálu uplatnenia. Varistory boli v minulosti vyrábané z karbidu kremíka SiC, ktorý časom nahradila chemická zlúčenina oxid zinočnatý ZnO pre lepšie a komplexnejšie vlastnosti počas pôsobenia voči prepätiu. Chemické zloženie je tvorené z 95% zmesou oxidov kovov. Zvyšných 5% tvoria prímiesi Bi₂O₃, TiO₂, CoO, MnO a Sb₂O₃, ktoré sa podieľajú na nelinearite a stabilite varistora. Varistory sú vyrábané sinterovaním zo spekaného granulátu oxidu zinočnatého spolu so spomínanými prímiesami pri teplote od 1250 - 1400 °C, v závislosti od triedy použitia. Na hraničných miestach zrn sa vytvárajú polovodivé rozhrania, ktorých princíp je rovnaký ako pre polovodivé p-n priechody [1].



Obr. 1 Mikroštruktúra ZnO varistora [2]

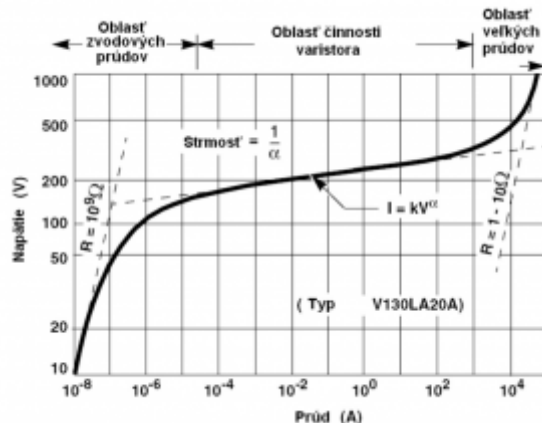
V-A charakteristika varistora je zložená z príspevkov niekoľko tisíc sérioparalelných a antiparalelných zapojení diód. Vzhľadom na symetriu V-A charakteristiky nezáleží na smere zapojenia varistorových zvodíčov. Pri nízkej hodnote napätia je varistor takmer v nevodivom stave a má veľký elektrický odpor. Pri vyšších hodnotách napätia prechádza do vodivého stavu a hodnota odporu je nízka. Odpor varistora vo vodivom stave tlmí oscilácie, ktoré vznikajú pri pôsobení prepätia [3].

$$I = kV^\alpha \quad (1)$$

Charakteristika varistora je definovaná vzťahom (1), kde k predstavuje konštantu keramiky (záleží na type varistora) a exponent α ($1 \leq \alpha \leq \infty$) definuje stupeň nelinearity. Charakteristika varistora je všeobecne dosiahnutá pre hodnoty $\alpha > 20$. Exponent α sa určuje z V-A charakteristiky alebo z nasledujúceho vzťahu (2):

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{\log\left(\frac{U_2}{U_1}\right)} \quad (2)$$

Prechod z nevodivého stavu do vodivého trvá veľmi krátky čas - niekoľko nanosekúnd. Ochranný účinok varistora spočíva v jeho prechode do vodivého stavu a odovzdaní energie prepätia do zeme. Izolácia chráneného zariadenia je namáhaná zvyškovým napätím, ktoré vzniklo prechodom impulzného prúdu cez varistor. Varistor je charakterizovaný vlastnosťami: veľká kapacita, rýchla odozva, schopnosť absorbovať veľkú energiu, malý následný prúd, veľký zvodový prúd. Stabilita V-A charakteristiky závisí v značnej miere od materiálového zloženia a výrobných podmienok (teplota a trvanie sintrovania, množstvo dopadajúcej látky) [4].



Obr. 2 V-A charakteristika ZnO varistora

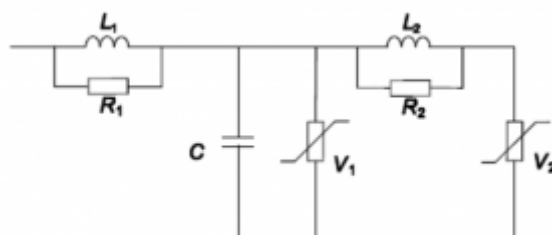
3. Definícia pôsobenia varistora podľa STN EN 61643-331

Základné vlastnosti varistora z oxidov kovov sú opísané v norme STN EN 61643-331. Varistor môže, ale nemusí byť zapúzdrnený, vybavený elektródami, vodičmi a svorkami pre účely pripojenia. Varistory môžu byť použité samostatne alebo spoločne s inými MOV, prípadne s inými súčasťami v prepäťových ochranných zariadeniach (SPD – Surge Protective Device). MOV (Metal Oxide Varistor) sú charakterizované nasledovnými parametrami: obmedzovacie napätie V_c , menovitý vrcholový impulzný prúd I_{max} , najvyššie trvalé prevádzkové napätie V_M , najvyšší kludový prúd I_D a kapacita C_V .

Degradácia MOV varistora je definovaná nasledovne: pri degradácii má MOV menovité napätie varistora menšie než 90 % napätia pred skúškou. Berúc do úvahy, že ak je menovité napätie varistora použité ako základ kritéria poruchy, môže voľba skúšobného prúdu ovplyvniť vyhodnotenie poruchy. Typickou odporúčanou hodnotou pre skúšobný prúd je jednosmerný prúd 1 mA. Pri skrate je odpor MOV trvale znížený na menej než 100 Ω (≥ 10 mA) pri priloženom jednosmernom napätí 1 V [5].

4. Elektrické vlastnosti MOV

Z pohľadu elektrickej funkčnosti MOV existuje niekoľko overených modelov. Ich funkčnosť sa primárne zameriava na riešenie čisto elektrických vlastností MOV, ako napríklad simulácie nelinearity varistora, alebo schematické náhrady MOV v každej fáze pôsobenia – od nevodivého až po vodivý stav. Najviac akceptovaným modelom varistora z pohľadu elektrickej náhrady je model IEEE [6].



Obr. 3 IEEE model varistora

Aleš Štagoj, Vladimír Murko a Andrej Pirih sa v jednom zo svojich článkov venovali problematike schopnosti varistorových vodičov odolať bleskovému výboju s veľkou

energiou [7]. Ich záujmom bol opis nového typu varistora, ktorý dokáže bezpečne zvládnuť výboje s oveľa väčšou energiou ako je energia bleskového prúdu bez deštrukcie. Poukazujú na fakt, že hlavnou nevýhodou varistorov už nie je prekážka použitia varistorov ako zvodíčov bleskových prúdov v triede I, ale degradácia elektrických vlastností spôsobená impulzným namáhaním.

Výsledkom tejto štúdie je objasnenie viacerých výhod varistorov ako zvodíčov bleskového prúdu na rozdiel od zvodíčov využívajúcich iskrište - nižšia ochranná úroveň, žiadny následný prúd, dostatočná kapacita pre impulzný prúd. Kombinácia dvoch varistorových blokov (4 varistory na blok), je schopná bezpečne prerušiť výboj energie impulzného prúdu $I_{imp} = 100$ kA.

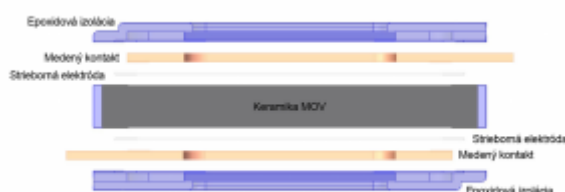
Zvodíč prepätia [8] bol navrhnutý ako kombinácia blokov varistorov pre rôzne nominálne napätia a prúdy, s nehomogénnou V-A charakteristikou. Navrhnutý model vyhovuje medzinárodným normám IEC 60664 a IEC 62305. Táto štúdia sa zaoberala rovnicou, ktorej výsledkom je potrebný počet varistorov pre správnu funkčnosť modelu. Rovnica je funkciou elektrického náboja zložky bleskového prúdu a tolerance varistora udávanej výrobcom.

$$n = \frac{(Q_{tmax} - Q_{lmax})}{Q_{lmax}} \left(\frac{1 + \text{tolerance}}{1 - \text{tolerance}} \right)^\alpha + 1 \quad (3)$$

ZBP triedy I kde je hlavným stavebným prvkom varistor, alebo blok varistorov, má mieru tolerance menšiu ako 2%. Pri tomto návrhu je veľmi podstatný počet varistorov v danom bloku. Na základe testov pri 1 mA sa relatívna miera tolerance pohybuje vo väzbe medzi varistorami, na základe čoho je možný ich výber do bloku. Výpočet je realizovaný s hodnotami poskytovanými výrobcom [8].

5. Elektro tepelná analýza varistora

Pri pôsobení varistora voči impulzným prúdom dochádza k veľmi rýchlym dejom, ktorých následkom je prudké oteplenie. V krajných prípadoch do 150 °C. Z pohľadu predchádzania tepelným prierezom je nanajvýš vhodné zamyslieť sa nad tepelnou analýzou varistora v oblasti vysokých prúdov.

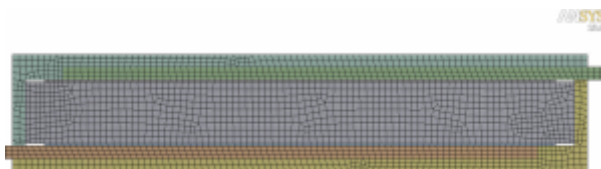


Obr. 4 Základné časti modelu varistora pre elektro tepelné analýzy

Model ZnO keramiky varistora triedy I rieši simuláciu práve z tejto problematickej časti. Najväčším problémom je vhodné nastavenie parametrov keramiky ZnO, práve vďaka ktorej sú varistory vhodné v oblasti pôsobenia voči prepätiam. Rôzne zdroje udávajú rozdielne hodnoty rezistivity a konduktivity. Výhodou modelu sú z veľkej časti takmer okamžité výsledky analýzy pri akejkoľvek zmene parametrov. Na tepelnú analýzu sa vo veľkej miere využívajú metódy konečných prvkov, a to nie len z pohľadu

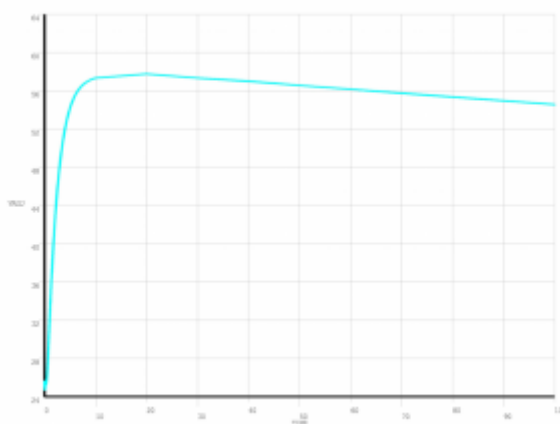
riešenia elektro - tepelných analýz. Tento konkrétny model tiež využíva túto analýzu rozdelenia jednotlivých častí na sieť konečných prvkov.

Model varistora je podľa reálnej predlohy MOV rozdelený na niekoľko častí, pričom hlavným elementom je ZnO keramika (Obr. 6). Ako vidieť impulz bleskového prúdu prichádza po medených kontaktoch na strieborné elektródy, odkiaľ sa ďalej prenáša na problematickú časť. Na základe MKP je model rozdelený na sieť konečných prvkov zobrazenú na Obr. 7. Štatistika údajov je 8000 uzlov a 3000 elementov, pričom sa jedná do značnej miery o zjednodušený model.

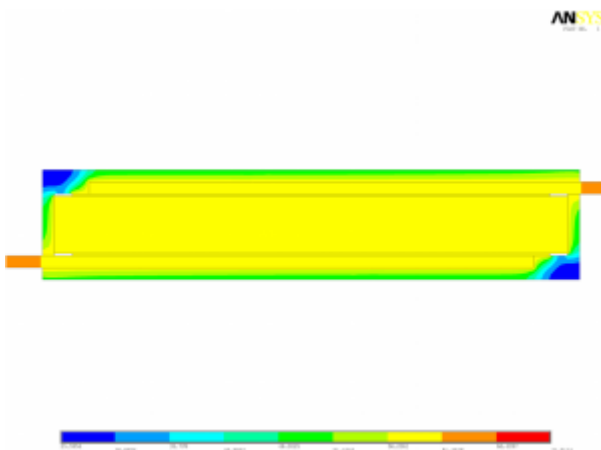


Obr. 5 Sieť konečných prvkov modelu

Po prechode impulzu bleskového prúdu nastáva prudký nárast teploty ZnO keramiky MOV. Podľa fyzikálnych zákonov, ktoré sa uplatňujú aj na tomto modeli, sa teplota veľmi rýchlo šíri celým modelom až na povrch epoxidovej izolácie. Tu sa prejavuje konvekcia, teda odvod tepla do okolia voľným prúdením. Výsledky modelu boli porovnávané s laboratórnym experimentom. Vzhľadom na umiestenie termočlánku - na povrchu epoxidovej izolácie - je aj porovnávanie zjednodušené na konkrétny bod.



Obr. 6 Priebeh teploty na povrchu epoxidovej izolácie pre prechode bleskového prúdu



Obr. 7 Rozloženie teploty na modeli varistora

Predchádzajúci obrázok ilustruje rozloženie teploty na modeli MOV v čase 60 s od prechodu impulzu. Tento čas predstavuje stav úplného tepelného nasýtenia. V tomto momente sa samozrejme uplatňuje aj spomínaná konvekcia. Výsledky tepelnej analýzy tohto modelu korešpondujú s výsledkami overenými v laboratóriu (varistor s pripojenými kontaktmi v epoxidovej izolácii) s maximálnou odchýlkou do 10 %.

6. Záver

Počítačová simulácia je jedným z moderných analytických nástrojov riešenia mnohých problémov. Vzhľadom na vývoj a trend v oblasti prepäťovej ochrany je nanajväč vhodné aplikovať tento spôsob k objasneniu a optimalizácii pri deštrukčných a degradujúcich prejavoch bleskových prúdov. V súčasnosti existuje niekoľko počítačových modelov MOV na riešenie elektrických vlastností. Niektoré sú zamerané aj na koordináciu a správnu spoluprácu pri znižovaní ochrannej úrovne U_p .

Matematické a počítačové riešenia majú nespočetné množstvo výhod pri riešení analýz. Jednou z nich je aj aplikácia pri návrhu nového typu modelu varistora na báze oxidov kovov. Model sa primárne zameriava na oblasť vysokých prúdov (≥ 6 kA) a rieši vzájomne previazanú elektrickú aj tepelnú simuláciu, čiže vplyvom prechodu impulzu bleskového prúdu vyhodnocuje oteplenie celého modelu varistora. Model je schopný dynamicky meniť svoje vlastnosti v závislosti od charakteru impulzu bleskového prúdu, pričom výsledky prechodných analýz zodpovedajú teoretickým predpokladom a zhodujú sa s laboratórnym experimentom v odchýlke maximálne 10 %.

7. Literatúra

1. Dudáš J. (2006): Principy konstrukce a funkce varistorových svodičů přepětí. Elektro - odborný časopis pro elektrotechniku, ročník 2006, číslo 05.
2. LITTELFUSE (2011): Introduction to Varistor Technology, basic information. <http://www.littelfuse.com/varistors/introduction-to-varistors.html>
3. Dolník, B., Guľas, R. (2010): Príspevok k mechanizmu starnutia ZnO varistorov. Starnutie elektroizolačných systémov, ročník 2010, číslo 9, s. 21-25.
4. Dolník, B., Guľas, R. (2010): Sledovanie zmien elektrických parametrov ZnO varistorov pre siete nízkeho napätia počas urýchleného starnutia. Starnutie elektroizolačných systémov, ročník 2010, číslo 8, s. 4-13.
5. Slovenský ústav technickej normalizácie (2004). STN EN 61643-331: Súčasti pre nízkonapäťovú ochranu pred napätím, Časť 311: špecifikácia varistorov na báze oxidov kovov (MOV). Slovenská technická norma.
6. IEEE Working Group 3. 4. 11 (1992): Modeling of Metal Oxide Surge Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1.
7. Štagoj A., Murko V., Pirih A., (2006): High Energy lightning impulse discharge capability Metal Oxide Varistors. 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, 1097-1100.
8. Ibáñez Olaya H., Ortiz Suárez H., Avendaño C. A., (2006): Design of SPDs class I for low voltage electric systems, using combination of metal oxide varistors. 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, 1165-1168.

Spoluautorom článku je Juraj Paulech, Ústav Elektroenergetiky a Aplikovanej

Elektrotechniky, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Slovenská Technická Univerzita,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
