

není transformátor jako transformátor

Suché transformátory se zalitým vinutím se vyrábějí od 70. let 20. století. Po celém světě je v provozu několik stovek tisíc těchto transformátorů, mnohé déle než 20 let, takže lze tvrdit, že suché transformátory se zalitým vinutím nijak nezaostávají za distribučními olejovými transformátory ve své spolehlivosti a životnosti. Charakteristickým znakem těchto transformátorů je vinutí, které je zapouzdřeno v pevné izolaci.

Výhodou suchých transformátorů se zalitým vinutím je především nižší požární zatížení, protože použité izolační materiály jsou těžce zápalné a samozhášivé. Oproti olejovým transformátorům nepřispívají tyto transformátory k rozšiřování požáru a lze je použít tam, kde by použití olejových distribučních transformátorů nebylo možné z důvodu požární bezpečnosti. Protože suché transformátory neobsahují žádnou izolační a chladicí kapalinu, lze je provozovat bez problémů také v místech, kde jsou zvýšené požadavky na ochranu vod. V mnoha případech jsou tedy suché transformátory se zalitým vinutím z celkového pohledu hospodárnějším řešením, ačkoli jsou svou konstrukcí výrazně dražší než olejové transformátory stejného výkonu. Vyšší cena a větší rozměry jsou dány fyzikálními zákony, protože vzdálenosti, požadované z hlediska elektrické pevnosti, jsou u suchých transformátorů výrazně větší.

Významným evropským výrobcem suchých transformátorů se zalitým vinutím je závod na výrobu transformátorů SGB Regensburg, který je významným a dlouholetým dodavatelem transformátorů na český trh. Letos slavíme 10 let SGB na našem trhu a můžeme se pochlubit více než 7000 pozitivními referencemi v ČR.

V následujících odstavcích je popsáno technické řešení transformátorů tohoto výrobce.

Magnetický obvod - základ nízkých ztrát naprázdno

Materiál magnetického obvodu, způsob stříhání a skládání plechů a průřezy odpovídají olejovým transformátorům. Magnetické obvody se skládají ze zastudena válcovaných orientovaných plechů. Obvykle se používají plechy tloušťky

0,27 mm se ztrátovým číslem 0,89 W/kg při indukci 1,5 T s izolací Kerizol. Pro transformátory se sníženými ztrátami naprázdno se používají plechy tloušťky 0,27 mm se ztrátovým číslem 0,92 W/kg při indukci 1,7 T a tloušťky 0,23 mm se ztrátovým číslem 0,81 W/kg při indukci 1,7 T. Plechy jsou nastříhány z pásů, úhel stříhu je 45°. Plechy jsou strojově skládány systémem „step lap“, to znamená, že místa styku plechů spojky a sloupku jsou proti sousedním plechům stupňovitě přesazena. Tím se dosáhne snadnějšího



autor:
text



přechodu magnetického toku z jader do sloupků a tím i snížení ztrát naprázdno, proudu naprázdno a hluku. Šířka plechů sloupků a jader je odstupňována tak, aby se průřez magnetického obvodu blížil kruhu. U transformátorů vyšších výkonů je magnetický obvod rozdělen chladicími kanály.

Postranice, stahující spojky magnetického obvodu, jsou z ocelových U-profilů nebo z ohýbaného plechu a jsou sešroubovány s plochými tyčemi, přibandážovanými polyesterovým páskem ke sloupkům. Sborníky, stahující

postranice, procházejí mimo magnetický obvod, avšak u transformátorů vyšších výkonů se navíc používají izolované nemagnetické svorníky procházející spojkou. Horní postranice jsou opatřeny závěsnými oky pro zvedání transformátoru, dolní postranice jsou spojeny s podvozkem. U suchých transformátorů je kromě magnetických vlastností magnetického obvodu důležitá ochrana proti korozi, protože magnetický obvod je trvale obtékán chladicím vzduchem. Proti korozi chrání dvousložkový nátěr a kromě toho zajišťuje dostatečné slepení jednotlivých transformátorových plechů a spolu s bandážemi zamezuje jejich chvění, které by vedlo ke zvýšenému hluku. Tento nátěr musí pochopitelně odolávat vysokým teplotám, které se na jádru vyskytují.

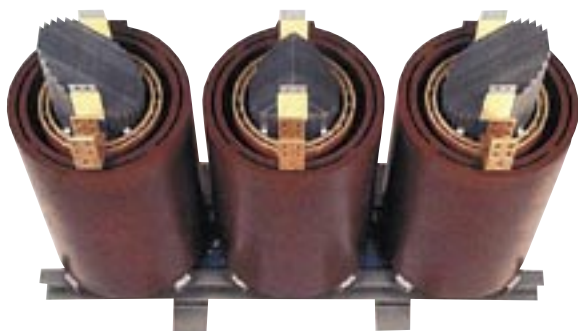
Vinutí nižšího napětí – odolnost proti zkratu

Pro výkony větší než 200 kVA a napětí $U_m \leq 1,1$ kV, tedy ve více než 90% vyráběných transformátorů, se používá fóliové vinutí, tedy vinutí z tenkého měděného nebo hliníkového pásu se zaoblenými hranami. Výhodou fóliového vinutí je, že proud se může volně rozložit po délce vinutí a v případě zkratu působí na cívky velice nízké axiální zkratové síly. Závitová izolace je provedena prepregem, který je oboustranně předimpregnován a navíjí se současně s vodičem. Šířka izolace je o potřebnou vzdálenost větší než šířka vodiče. U cívek pro vyšší výkony se po určitém počtu závitů vkládá mezi dva sousední závity podložka s nalepenými lištami a vytvoří se tak axiální chladicí kanál. Vývody z cívek jsou provedeny zastudena nalisovanými pasy a jsou dodatečně izolovány rovněž prepregem. Po navíjení se provádí vytvrzení cívky při teplotě 150 °C po dobu tří hodin, při kterém se prepreg slepí s vodičem a cívka tak získá potřebnou mechanickou pevnost, která se následně kontroluje. Použité izolační materiály odpovídají teplotě izolačního systému 155 °C.

Vinutí vyššího napětí – základ spolehlivosti

Technologicky nejnáročnější částí transformátoru je vinutí vyššího napětí, které je provedeno jako zalité vinutí, to znamená, že vodič je zapouzdřen v pevné izolaci. Zalité vinutí se používá pro napětí $U_m \leq 7,2$ kV. Měděný nebo hliníkový lakem izolovaný drát kruhového nebo obdélníkového průřezu, případně svazkový vodič, se navíjí na trn. Navíjecí trn je zároveň vnitřní stranou formy pro zalití. Vinutí vyššího napětí je provedeno jako skupinové polohové vinutí, to znamená, že polohové vinutí je rozděleno na dva nebo čtyři díly na fázi. Mezi polohy se vkládá několik vrstev skelné tkaniny. Tato skelná tkanina (glasvlies) je ze skelných vláken o průměru 10 μm , jako pojivo je použita melamin-formaldehydová pryskyřice a zvláštní vrstva silanu zlepšuje přilnavost zalévací pryskyřice. Celkový podíl organických látek je 10%, tloušťka tkaniny je zhruba 1 mm a plošná

hmotnost $0,12 \text{ kg/m}^2$. Ve vnějších polohách vinutí se pak připojují odbočky do zalévacích svorek, které jsou umístěny v podélném nálitku na vnější straně cívky. Pokud jsou ve vinutí vyžadovány chladicí kanály, jsou mezi určité polohy vloženy výplňové lišty, které se po zalití vytáhnou a tak se vytvoří axiální chladicí kanál, takže hotová cívka má pak tvar dvou nebo více soustředných válcových mezikruží spojených mezi sebou obvykle čtyřmi můstkami. Nakonec se cívka se uzavře do vnější ocelové formy a provede se její zalití. Jako zalévací hmota se používá bezropouštědlová tekutá nemodifikovaná epoxidová pryskyřice na bázi Bisphenolu A a Epichlorhydrinu. Pryskyřice se smíchá s tvrdidlem na bázi hydridu kyseliny uhličité v poměru 1:1. Tuto směs doplňuje ještě flexibilizátor (polyglykol), barvicí pasta a urychlovač. Zalití se provádí ve vakuové komoře při teplotě $70 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu zhruba 6 hodin a následuje vytvrzení při teplotách $70 \text{ }^\circ\text{C}$ až $150 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 20 až 40 hodin. Vytvrzením vzniká kompaktní spojení vodičů, izolace vodičů, skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice. Teplota izolačního systému je $155 \text{ }^\circ\text{C}$.



Vraťme se ještě k výše zmíněnému druhu vinutí. Obecně se používá několik druhů vinutí vyššího napětí:

- polohové vinutí,
- vinutí z dílčích cívek z pásu,
- vinutí z dílčích cívek z drátu,
- sypané (náhodné) vinutí,
- deskové vinutí přesouvané,
- deskové vinutí nepřesouvané,
- diagonální vinutí.

Právě skupinové polohové vinutí, používané ve firmě SGB, má následující přednosti. Při atmosférických nebo spínacích přepětích dochází k téměř lineárnímu rozložení napětí podél vinutí. Vazba mezi polohami je velice těsná, takže rázová vlna se přenáší především kapacitami mezi polohami. Činitel ϵ , vyjadřující poměr příčné a podélné kapacity vinutí, je poměrně nízký. Namáhání se rozdělí přibližně rovnoměrně po délce vinutí, takže se předejde zvýšenému namáhání pouze v některých částech vinutí, mezi určitými



závity. Mezi polohami je ale velké napětí, což klade velké nároky na polohovou izolaci, která musí být po zalití bez bublin. Na druhou stranu je potenciál na vnitřní ploše cívky snížen na polovinu a hlavní rozptylový kanál, tj. kanál mezi vinutím vyššího a vinutím nižšího napětí, je méně namáhán. Skupinové polohové vinutí má také nízký vlastní kmitočet (zhruba 10 kHz). Nízký vlastní kmitočet a nízký činitel ϵ výrazně snižují možnost vzniku přepětí, vzniklých rezonančním vybuzením při vypínání. Tyto vlastnosti jsou důležité právě při použití vakuových vypínačů, kdy mohou při vypnutí transformátoru naprázdno nebo s induktivní zátěží vzniknout uvnitř cívky rezonanční přepětí, která mohou poškodit závitovou izolaci, aniž tomu mohou zabránit přepětové ochrany na vstupu transformátoru.

Na materiál zalévací hmoty jsou kladeny nejen izolační požadavky. Cívky musí odolávat i velkým mechanickým napětím vznikajícím na základě rychlých teplotních změn při změně zatížení nebo přetížení z chladného stavu. Protože vodič je pevně uložen v zalévací hmotě, neměly by být součinitele tepelné roztažnosti vodiče a zalévací hmoty příliš rozdílné. Pokud by tomu tak nebylo, došlo by při prudkých tepelných změnách ke vzniku trhlin v izolaci a v konečném důsledku ke znehodnocení cívky.

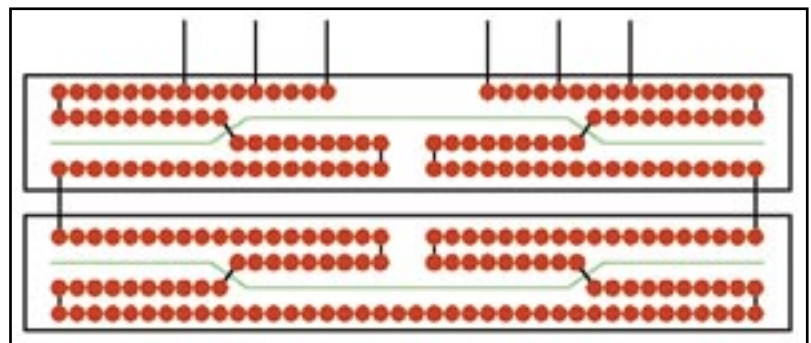
autor:
text



Elpro-Energo

SGB
STARKSTROM

PIFFNER



Lineární součinitele tepelné roztažnosti:

epoxidová pryskyřice čistá	$63 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
epoxidová pryskyřice s plnidly	$28 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
epoxidová pryskyřice zpevněná skelnou tkaninou	$20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
měď	$17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
hliník	$24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Z výše uvedeného je vidět, že součinitel tepelné roztažnosti epoxidové pryskyřice zpevněné skelnou tkaninou leží mezi součiniteli tepelné roztažnosti pro hliník a měď. Pro výrobu cívek lze tedy používat oba vodivé materiály, přičemž hliník má určitou nevýhodu s ohledem na dobu trvání zkratu. Pro ověření provedla firma SGB zvláštní zkoušku

tepelným šokem. Transformátor ochlazený na teplotu $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ zatížila dvojnásobkem jmenovitého proudu a ohřála až za mezní teplotu izolačního systému. Následující izolační zkoušky a zkoušky částečných výbojů potvrdily neporušenost izolačního systému.

Někteří výrobci používající například sypané vinutí, zalévají vinutí epoxidovou pryskyřicí s plnidly, takže použití měděného vodiče není v tomto případě vhodné. Také výroba cívek metodou mokrého navíjení za atmosférických podmínek dává uspokojivé výsledky pouze pro napěťové hladiny $U_m \leq 12 \text{ kV}$. Některé technologie zalévání neumožňují vyrobit cívky s axiálními chladicími kanály.

Kvalita zalitých cívek byla v SGB ověřována zkouškami stárnutí izolace, kdy cívky byly vystaveny extrémním klimatickým podmínkám, a následně byly měřeny elektrické vlastnosti cívek. Protože transformátory se zalitým vinutím se vyrábějí již více než tři desítky let, je kvalita cívek z hlediska stárnutí izolace ověřena i v praxi.

Hotové cívky se nasadí na magnetický obvod a horní spojka se zaplechuje. Cívky nižšího napětí jsou blíže k jádru a jsou zajištěny jádrovými lištami. Mezi cívkami vyššího a nižšího napětí je obvykle vložen izolační váleček. Cívky jsou uloženy na izolačních válečkách nebo špalicích s vrstvou gumy, která zachytí tepelnou roztažnost cívek a tlumí přenášení vibrací. Z horních postranic jsou cívky stlačeny tlačnými šrouby.

Na tomto místě je třeba upozornit, že i když je vodič zcela uzavřen v izolaci, jde pouze o pracovní izolaci, nikoli o izolaci ve smyslu ochrany před nebezpečným dotykem. Na zalité cívkách se může objevit nebezpečný potenciál. Také při instalaci se musí dodržet mezi zalitými cívkami a zemí stejné vzdálenosti jako mezi živými částmi a zemí.

Zkoušky

Nejdůležitější normy pro návrh a zkoušky transformátorů se zalitým vinutím jsou stanoveny v normách ČSN EN 60076 a ČSN EN 60276. Zkouškami se zjišťuje, zda transformátor splňuje zaručované vlastnosti a snese v provozu se vyskytující namáhání při návrhem stanovené životnosti.

V ideálním případě by zkoušky měly být odrazem skutečného provozu.

Součástí kusových zkoušek je měření částečných výbojů, které se musí provádět na transformátorech s $U_m \leq 3,6$ kV. Měření částečných výbojů ukazuje, do jaké míry dochází u zkoušených transformátorů k nežádoucím výbojům. Na prvním místě hraje rozhodující roli místo částečných výbojů. Sršení mezi vně ležící živou částí a zemí není z hlediska provozní spolehlivosti a životnosti rozhodující. Ale zcela jinak to vypadá s částečnými výboji uvnitř cívky. Pokud cívka nevykazuje žádné částečné výboje, je to důkaz homogenity zalití. Pokud v cívce dochází k částečným výbojům, pak při předpokladu, že návrh vinutí je bezchybný, zůstaly v cívce po zalití bubliny. Částečné výboje pak vedou k dlouhodobému poškození izolačního systému. Otázkou je, jakou hladinu částečných výbojů je možno připustit. Norma ČSN EN 60726 stanoví maximální hladinu 10 pC. Pečlivou analýzou po více jak 10 letech provozu transformátorů výrobce stanovil, že maximální hladina vnitřních částečných výbojů v zalitých cívkách je 5 pC. Tato hladina je spolehlivě a s udržitelnými náklady měřitelná a poskytuje důkaz o kvalitě cívky. Přitom je zkoušena a dokumentována každá jednotlivá cívka.

Provoz transformátorů

Tak jako jiné transformátory mohou být transformátory se zalitým vinutím za určitých podmínek zatěžovány vyšším než jmenovitým proudem. Rozhodujícím hlediskem je teplota. Při trvalém přetěžování se tepelným namáháním izolace podstatně zkracuje životnost transformátoru. Hlídaní teploty zajišťují termistory, které jsou umístěny v horní části transformátoru mezi cívkou nižšího napětí a jádrem. Termistory jsou teplotně závislé odpory, u kterých při dosažení jmenovité teploty dochází k výraznému nárůstu odporu. Termistory jsou umístěny ve všech třech vinutích a spojeny do série a pokud vyhodnocovací přístroj zaznamená vyšší odpor obvodu, který je způsoben zvýšením teploty nad jmenovitou teplotu termistoru třeba jen na jedné cívce, přepne se příslušné relé. Aby nedocházelo k nechtěnému vypínání transformátoru, jsou k dispozici dva nezávislé obvody termistorů s různými jmenovitými teplotami – první obvod při teplotě například 120 °C přepíná relé pro výstrahu obsluze nebo může odpojit část zátěže. Druhý obvod pak při teplotě například 150 °C přepíná relé pro vypnutí transformátoru. Aby se předešlo stavu, že tepelná ochrana v důsledku výpadku napájení vyhodnocovacího přístroje nebude fungovat, je k dispozici relé, signalizující napájení přístroje.

Na obě spodní postranice lze osadit jednotky s ventilátory, které vhánějí chladicí vzduch do kanálu mezi jádrem a vinutím a do kanálu mezi vinutími, případně do chladicích kanálů ve vinutích, a tím lze zvýšit zatížení transformátoru

až o 40%. Transformátor tak pracuje v režimu s nuceným chlazením. Ovládání ventilátorů zajišťuje vyhodnocovací přístroj, který měří teplotu vinutí pomocí odporu PT 100 a při určité nastavené teplotě spouští ventilátory. Ke spuštění ventilátorů dojde také v pravidelném intervalu 30 dní, aby se proběhly osy ventilátorů. Svorky transformátoru a přípojovací praporce jsou dimenzovány pro tyto případy na 1,4 násobek jmenovitého proudu. Je třeba si ale uvědomit, že ztráty transformátoru jsou úměrné druhé mocnině proudu a vzrůstou při nárůstu výkonu o 40% na dvojnásobek. Osazení vyhodnocovacích jednotek a celkové zapojení ovládacích obvodů je už věcí projektanta a montážní firmy.

Životnost suchých transformátorů se zalitým vinutím je srovnatelná se životností olejových transformátorů a závisí na zatěžování a okolní teplotě. Nároky na údržbu jsou nízké, pravidelně se kontroluje hlídání teploty, případně ventilátory a podle stupně znečištění se musí transformátor čistit od prachu a nečistot.

Technologie suchých transformátorů SGB je v celosvětovém měřítku ojedinělá a patří svými vlastnostmi ke světové špičce. Ve vašem okolí pracují tyto transformátory už několik let, zeptejte se provozovatelů na jejich zkušenosti.

Elpro-Energo
NEJSPOLEHLIVĚJŠÍ NA TRHU

SGB TRANSFORMÁTORY

- suché se zalitým vinutím 50 kVA ... 24 MVA
jedinečná technologie zalévání mědi do pryskyřice pod vakuem
- olejové distribuční 25 kVA ... 10 MVA
- olejové výkonové 10 MVA ... 100 MVA

Novinka:

- kioskové trafostanice - plechové

PIFFNER

MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY

- izolace papír - olej 36 kV ... 220 kV
napěťové proudové kombinované
- kabelové průvlekové, dělené
vnitřní, venkovní

Kontakt: Elpro-Energo s.r.o.
www.elpro-energo.cz
Tel.: Praha: 227195208, Třinec: 558338645