

Funkční hodnocení izolačních systémů a cesty vedoucí k vyššímu využití.

Stauber J. – BRUSH Plzeň

Anotace

Příspěvek shrnuje základní metody hodnocení izolačních systémů vn vinutí točivých strojů. Zaměřuje se nejen na elektrické vlastnosti (průrazná pevnost, napěťová životnost a ztrátový činitel) tak i na vlastnosti mechanické a tepelné. Porovnává hodnocení jak z pohledu norem evropských (EN), tak i mezinárodních (IEEE Std). Na základě hodnocení jsou diskutovány stávající a perspektivní možnosti zvyšování provozního namáhání a tím i využití izolačních systémů.

Úvod

Trend neustálého zvyšování efektivnosti při výrobě točivých elektrických strojů se promítá do stále se zvyšujícího podílu aktivních materiálů, jak je ukázáno v (2). Přímým důsledkem pro izolační systémy je neustálý růst provozních namáhání. Dnes již provozní namáhání přesahuje 3 kV/mm (Prognózy předpokládají dosažení 5 kV/mm – viz (1)). To je samozřejmě podmíněno vývojem izolačních materiálů, způsobem jejich zpracování (použitou technologií), tak i zpřesňováním a prohlubováním metod hodnocení a oceňování dosahovaných vlastností izolačních materiálů.

Metody hodnocení vlastností izolačních systémů

Z hlediska funkčnosti jsou podstatné tři skupiny vlastností: elektrické, mechanické a tepelné. Metody zkoušek jsou zaměřeny jednak přímo na tyto vlastnosti: elektrické (průrazné napětí, napěťová životnost, ztrátový činitel, permitivita) mechanické (pevnost v ohybu, modul pružnosti, tažnost) tepelné (tepelná vodivost) Část zkoušek modeluje skutečné namáhání ve stroji a to kombinací výše uvedených namáhání jako například - napěťová životnost při zvýšené teplotě, cyklické tepelné zkoušky.

Průrazné napětí (pevnost)

Jde o jednu ze základních vlastností izolačního systému, která má vztah ke zkušebnímu napětí stroje. Finální zkušební a z něho odvozená mezioperační zkušební napětí (dle EN 60034-1) jsou zpravidla jednominutová, takže pro hodnocení je podstatná jednominutová pevnost. Určení hodnoty jednominutového průrazného napětí je problematické a vyžádalo by si celou řadu zkoušek. Normy definují průrazné napětí smluvně tak, aby získaná hodnota byla jednoznačně definována i při omezeném počtu zkoušek.

Evropská norma EN50209 viz (4) definuje průrazné napětí následujícím způsobem: Zkouška přiloženým napětím (dle EN 60034-1 je $U_z = 2U_n + 1$ kV) předepsaným pro dané jmenovité napětí po dobu 1 min s následným zvyšováním napětí rychlostí 1 kV/s až do průrazu.

Americká norma ASTM D 149 viz (3) definuje průrazné napětí následujícím způsobem: Od počátečního napětí U_1 (cca 50% očekávaného průrazného napětí) zvyšovat napětí ve stupních (přírůstech) ΔU vždy po minutě až do průrazu, přičemž se zaznamená hladina napětí, při které došlo k průrazu U_i a čas do průrazu na této hladině t_p [s]. Průrazné napětí se určí dle vztahu:

$$U_p = U_{i-1} + \Delta U \frac{t_p}{60},$$

kde U_{i-1} je hladina o jeden stupeň nižší než hladina U_i u které došlo k průrazu.

Na základě jednoduchého statistického vyhodnocení je možné definovat požadavky na minimální průrazné napětí vztahem:

$$U_{pstř} - k\sigma \geq nU_n ,$$

kde

$U_{pstř}$ – střední hodnota průrazného napětí

σ - směrodatná odchylka průrazných napětí

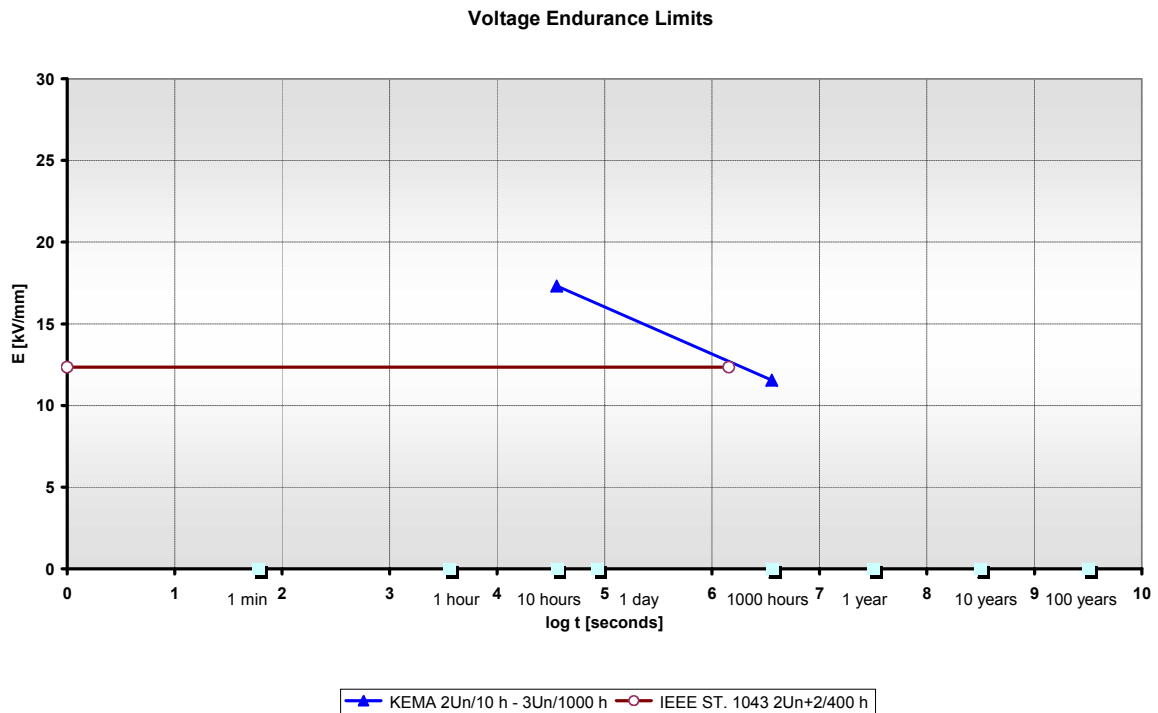
k – kvantil (3 popřípadě 4)

n - zvolený koeficient určený na základě dlouholetých pozorování

U_n - jmenovité sdružené napětí

Napěťová životnost

Životnostní zkouška dává základní představu o dlouhodobém chování izolace. Zkouškou se zjišťuje doba do průrazu pro přiložené zkušební napětí. Normy pro životnostní zkoušku (5), (6) předepisují způsob přípravy zkušebních vzorků, způsob zkoušení a metody vyhodnocení. Požadavky na minimální životnost jsou zpravidla předmětem dohody mezi dodavatelem a odběratelem. Všeobecně akceptovanou mezí (v Evropě) je životnost na hladině $3U_n - 10$ hod a na hladině $2U_n - 1000$ hod a v (Americe - USA, Kanada) 400 hod na hladině $2U_n + 2$ kV viz též (7). Srovnání pro provozní namáhání 3,3 kV/mm je zřejmé z Obr. 1. Zpravidla je požadováno, aby takto definované limity životnosti překročil dohodnutý podíl zkoušených vzorků (na př. 90%).



Obr. 1: Porovnání mezích životností izolačního systému

Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je, jak je již z názvu zřejmé, mírou dielektrických ztrát. Limitní hodnoty jsou vztaženy jak k počáteční hodnotě, vztažené k násobku jmenovitého napětí (zpravidla $0,2 U_n$), tak k přírůstku ($\Delta tg\delta$) a to jak pro teplotu okolí, tak i pro teplotu třídy příslušné izolace. Některé normy jako například (4) předepisují jak způsob zkoušení, tak i mezní hodnoty. Norma (8) specifikuje zkoušku (předmět zkoušky, podmínky, zařízení apod.), meze jsou dohodnuty mezi dodavatelem a odběratelem.

Relativní permitivita

Relativní permitivita ovlivňuje výbojovou aktivitu zejména na výstupu vinutí z drážky (korona) a bezprostředně souvisí s návrhem ochrany proti koruně u výstupu z drážky. Meze jsou oboustranné a jejich odchylka a to jak k nižším, tak vyšším hodnotám může omezit funkčnost protikoronových ochran. Relativní permitivita se měří současně s měřením ztrátového činitele. Normy tedy specifikují způsob zkoušení - viz například (8). Meze jsou vázány na řešení ochran proti koruně.

Mechanické vlastnosti

Na mechanických vlastnostech (pevnost v ohybu, modul pružnosti, tažnost při porušení) závisí odolnost vinutí vůči mechanickým namáháním a to jak v provozu (zkratová odolnost), tak i během výroby (riziko poškození během navíjení). Meze jsou vázány jednak na zkušenosti z provozu a zkoušek na strojích (náhlý zkrat na svorkách) tak, na zkouškách na modelech tyčí (statické i dynamické zkoušky). Na základě analýzy výsledků těchto zkoušek lze stanovit meze mechanických vlastností, při jejichž dodržení se výrazně redukuje riziko porušení izolace a to jak v provozu, tak během výroby.

Tepelné vlastnosti

Z funkčního hlediska je nejpodstatnější tepelná vodivost, která ovlivňuje schopnost odvádět ztráty a má výrazný dopad na dimenzování stroje. Meze jsou odvozeny na základě předchozích provozních zkušeností a měření na strojích.

Zkoušky napodobující skutečné namáhání v provozu

Namáhání v provozu je vždy kombinované (elektrické, tepelné, mechanické a to jak statické tak dynamické). Modelovat zkouškami takovéto komplexní namáhání je prakticky neuskutečnitelné a proto jsou zkoušky zaměřené na kombinaci jen vybraných namáhání. Příklady těchto zkoušek jsou:

1. Životnostní zkouška za zvýšené teploty kombinuje elektrické a tepelné namáhání. Provedení těchto zkoušek je předmětem normy (5). Tato norma (IEEE Std 1043) požaduje jako zkušební vzorek reálnou tyč skutečného stroje. Na rozdíl od této normy připouští Technická zpráva IEC 34-18-33 viz (6) i vzorky v podobě části tyčí.
2. Termomechanická odolnost izolačních systémů dává představu o chování izolace při rychlých změnách teploty v provozu (častý rozběh a odstavení stroje). Provedení těchto zkoušek je předmětem norem (9) a (10). Jak norma (IEEE Std 1310), tak i technická specifikace (ČSN CLC/TS 60034-18-34) požadují zkoušky na reálných tyčích skutečného stroje.

Stávající a perspektivní možnosti zvyšování provozního namáhání

Pokud se soubor výše uvedených zkoušek aplikuje na izolační systém, který je na dané hladině provozního namáhání dostatečně dlouhou dobu, tak mezní hodnoty získané na

základě funkčního hodnocení jsou výchozími mezemi pro zlepšený izolační systém předpokládány pro vyšší provozní namáhání. Jakými cestami lze dosáhnout vyšších provozních namáhání aniž by se snížila spolehlivost izolačního systému? V první řadě je to změna struktury materiálu, která ovlivní střední hodnotu jednotlivých vlastností tak i rozptyl. V neposlední řadě je to změna technologií použitých jak při výrobě materiálů, tak i při jejich zpracování. Změna technologií má zejména vliv na rozptyl, i když v řadě případů může zvýšit i střední hodnoty vlastností. Konkrétně pro resin-rich izolační systém to znamená v etapě výroby izolačních pásek dosáhnou optimální skladby materiálu (volba jednotlivých komponent a dodržení optimálního poměru nosič – slídový papír – pryskyřice) a současně minimalizovat rozptyl. V etapě zpracování izolace to vede k použití technologií umožňujících variabilní řízení procesu s co největší reprodukovatelností optimálního režimu (lisy pro vytváření izolace, izolační roboty) - viz též (11).

Závěr

Príspevek shrnuje základní metody hodnocení izolačních systémů vn vinutí točivých strojů: Detailněji se zaměřuje na vlastnosti elektrické (elektrická pevnost, životnost), které zásadně ovlivňují funkčnost izolačního systému.

Literatura

1. Schuler R.H.: Stand der Isolationstechnik auf dem Gebiet rotierender, elektrischer Hochspannungsmaschinen, ISOTEC WORKSHOP 93
2. Glew C.N, „The Next Generation“ – a Review of the Factors Influencing the Output of Electrical Machines in the New Millennium INSUCON/ISOTEC '98
3. ASTM D 149: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.
4. ČSN EN 50209: Zkoušení izolace tyčí a cívek vysokonapěťových strojů.
5. IEEE Std 1043: IEEE Recommended Practice for Voltage/Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils.
6. IEC 34-18-33: Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for form-wound windings – Multifactor functional evaluation - Endurance under combined thermal and electrical stresses of insulation systems used in machines up to and including 50 MVA and 15 kV.
7. IEEE 1553 Std: IEEE Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators
8. IEEE Std 286: IEEE Recommended Practice for Measurements of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
9. IEEE Std 1310: IEEE Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.
10. ČSN CLC/TS 60034-18-34: Točivé elektrické stroje – Část 18-34: Funkční hodnocení izolačních systémů – Zkušební postupy pro vinutí s tvarovanými cívkami – Hodnocení termomechanické odolnosti izolačních systémů
11. Stauber, J.: Základní vlastnosti izolačního systému vn statorových vinutí. In: Diagnostika '03, ISBN 80-7082-952-4. Plzeň: ZČU 2003.

Autor

Ing. Jiří Stauber.; Konstrukce vinutí, BRUSH Plzeň; Edvarda Beneše 39, 301 00 Plzeň; e-mail: jstauber@sem.fki-et.com