

Tajana Nižić, mag.ing.el.
Končar D&ST
Tajana.Nizic@koncar-dst.hr

Vedrana Starčević Prebeg, mag.ing.el.
Končar D&ST
Vedrana.StarcevicPrebeg@koncar-dst.hr

VISOKOTEMPERATURNI IZOLACIJSKI SUSTAVI U DISTRIBUTIVNIM TRANSFORMATORIMA PREMA NORMAMA IEC 60076-14 I IEEE C57.154

SAŽETAK

U referatu je opisana i dana usporedba norme IEC 60076-14:2013 „Energetski transformatori - Dio 14: Transformatori uronjeni u tekućinu s ugrađenim visokotemperaturnim izolacijskim materijalima“ i IEEE norme C57.154-2022 „IEEE Standard for Liquid-Immersed Transformers Designed to Operate at Temperatures Above Conventional Limits Using High Temperature Insulation Systems“. Obje norme daju i opisuju posebne zahtjeve za korištenje izolacijskih materijala više temperaturne klase ili kombinacije izolacije više temperaturne klase i klasične izolacije (105 °C), koja radi na temperaturama iznad konvencionalnih granica. Visokotemperaturni izolacijski sustavi sastoje se od izolacijske tekućine i čvrste izolacije. S obzirom da se tekućine mogu zamijeniti, a čvrsta izolacija ostaje, vijek trajanja transformatora određen je vijekom trajanja papira u izolaciji. Visokotemperaturni izolacijski sustavi u transformatorima povećavaju njihovu trajnost i učinkovitost, čineći ih prikladnima za širi raspon primjena.

Ključne riječi: transformator, izolacija više klase, visokotemperaturni izolacijski sustavi

HIGH TEMPERATURE INSULATION SYSTEMS IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS ACCORDING TO STANDARDS IEC 60076-14 AND IEEE C57.154

SUMMARY

The paper describes and provides a comparison of the IEC 60076-14:2013 standard "Power Transformers - Part 14: Liquid-Immersed Transformers with High-Temperature Insulation Materials" and the IEEE C57.154-2022 standard "IEEE Standard for Liquid-Immersed Transformers Designed to Operate at Temperatures Above Conventional Limits Using High-Temperature Insulation Systems." Both standards provide and describe specific requirements for the use of insulation materials of higher temperature classes or a combination of higher temperature class insulation and conventional insulation (105 °C), which operate at temperatures above conventional limits. High-temperature insulation systems consist of insulating liquid and solid insulation. As the liquids can be replaced while the solid insulation remains, the lifespan of a transformer is determined by the lifespan of the paper in the insulation. High-temperature insulation systems in transformers enhance their durability and efficiency, making them suitable for a wider range of applications.

Key words: transformer, insulation of higher temperature class, high-temperature insulation systems

1. UVOD

Razvoj elektroenergetskih mreža i sve veći zahtjevi za pouzdanošću, energetsom učinkovitošću i ekološkom održivošću postavljaju nove izazove u projektiranju i radu distributivnih transformatora. Jedan od ključnih elemenata u poboljšanju njihove učinkovitosti i dugovječnosti je odabir odgovarajućeg izolacijskog sustava, koji pod utjecajem toplinskog opterećenja izravno utječe na vijek trajanja i sigurnost rada transformatora.

Izolacijski sustav uljnog transformatora sastoji se od tekuće i od krute izolacije. Tekuću izolaciju čine mineralna ulja, esteri i silikonska ulja, dok krutu izolaciju čine celulozna izolacija (prešpan, kraft papir, natron papir, drvo,...) i necelulozni materijali (aramidni papir, stakleno tvrdo tkivo, poliesteri, poliamidi,...).

Distributivni transformatori obično koriste sustav izolacije koji uključuje celuloznu izolaciju uronjenu u mineralno ulje, što ograničava maksimalnu hot spot temperaturu na 98 °C. IEC 60076-14 i IEEE C57.154 klasificiraju nove sustave izolacije u različitim kategorijama i specificiraju granice porasta temperature za svaku kategoriju.

2. TOPLINSKE KLASSE IZOLACIJE

Različite kategorije izolacije dozvoljavaju kombiniranja različitih krutih i tekućih materijala izolacije. Stoga je nužno prije korištenja napraviti evaluaciju i ispitivanja kompatibilnosti materijala.

Postupak za evaluaciju kombinirane čvrste i tekuće izolacije opisan je u IEC/TS 62332-1 i u IEEE C57.100, a koji utvrđuje toplinski indeks iz kojeg se određuje maksimalna hot spot temperatura, uz koju se veže standardni životni vijek transformatora i na temelju kojeg se određuje temperaturna klasa izolacije za koju se očekuje da će osigurati normalan vijek trajanja transformatora. U tablici I dane su preferirane toplinske klase izolacijskog sustava prema IEC 60076-14, a u tablici II prema IEEE C57.154 [1, 2], koje će kasnije u radu biti korištene radi usporedbe dozvoljenih temperatura viših izolacijskih sustava.

Tablica I. Preferirane toplinske klase izolacijskog sustava prema IEC 60076-14

Toplinska klasa	Hot spot temperatura [°C]
105	98
120	110
130	120
140	130
155	145
180	170
200	190
220	210

Tablica II. Preferirane toplinske klase izolacijskog sustava prema IEEE C57.154

Toplinska klasa	Hot spot temperatura [°C]
105	95
120	110
130	120
140	130
155	145
180	170
200	190

3. IZOLACIJSKI SUSTAVI PREMA IEC 60076-14

Norma IEC 60076-14 definira tri osnovna tipa izolacijskih sustava za transformatore: konvencionalni izolacijski sustav, hibridni izolacijski sustav te visokotemperaturni izolacijski sustav. Tim istim sustavima definirane su i vrste namota u transformatorima. Tablica III prikazuje ključne atribute koji definiraju različite vrste namota transformatora, a time i odgovarajuće sustave izolacije.

Tablica III. Usporedba izolacijskih sustava / namota

		Konvencionalni izolacijski sustav	Hibridni izolacijski sustav			Visokotemperaturni izolacijski sustav
			Polu-hibridni namot	Mješoviti hibridni namot	Potpuni hibridni namot	
Vrsta izolacije - Konvencionalna (eng. C) ili visokotemperaturna (eng. H)	Tekućina	C ili H	C ili H	C ili H	C ili H	H
	Izolacija vodiča	C	H	C i H	H	H
	Letvice, podložne pločice	C	C	C i H	H	H
	Uljno – barijerna izolacija	C	C	C	C	H
Temperaturne granice ulja i namota - Konvencionalne (eng. C) ili visokotemperaturne (eng. H)	Maksimalna nadtemperatura top-ulja	C	C	C	C	H
	Srednja nadtemperatura namots	C	H	C	H	H
	Hot-spot nadtemperatura namota	C	H	H	H	H

3.1. Konvencionalni izolacijski sustavi

Konvencionalni izolacijski sustavi rade na konvencionalnim temperaturama, propisanim u IEC 60076-2. Sastoje se od celulozne čvrste izolacije i tekuće izolacije koja može biti konvencionalna (mineralno ulje) ili za više temperaturne klase (esteri, silikonska ulja).

3.2. Hibridni izolacijski sustavi

Hibridni izolacijski sustavi dijele se na tri vrste podsustava: poluhibridni izolacijski sustav, mješoviti hibridni izolacijski sustav te potpuni hibridni sustav. Hibridni izolacijski sustavi za tekuću izolaciju koriste mineralna ulja koja rade na konvencionalnim temperaturama ili tekuću izolaciju koja radi na temperaturama većima od konvencionalnih, a to su esteri i silikonska ulja. Svi podsustavi hibridnih izolacijskih sustava rade na konvencionalnim nadtemperaturama ulja.

Za čvrstu izolaciju koriste ili konvencionalnu čvrstu izolaciju, ili čvrstu izolaciju viših temperaturnih klasa ili njihovu kombinaciju.

S obzirom na to da temperatura namota nije ista u svim dijelovima namota, ponekad nije potrebno koristiti istu izolaciju na isti način za sve namote. Zato se hibridni izolacijski sustav promatra kao skup odvojenih, izoliranih namota. Prema tome, hibridni izolacijski sustavi dijele se prema vrstama namota i to na :

- poluhibridne namote
- mješovite hibridne namote
- potpune hibridne namote.

3.2.1 Poluhibridni namoti

Poluhibridni namoti za čvrstu izolaciju vodiča koriste izolaciju viših temperaturnih klasa, dok je preostala čvrsta izolacija u transformatoru konvencionalna. Takvi namoti mogu raditi na većim nadtemperaturama od konvencionalnih.

3.2.2 Mješoviti hibridni namoti

Mješoviti hibridni namoti koriste čvrstu izolaciju više temperaturne klase u određenim dijelovima namota. To je najčešće izolacija vodiča u dijelovima namota gdje se javljaju veće nadtemperature namota od konvencionalnih. Primjer takvog dijela namota je kraj namota gdje se javljaju vrtložne struje koje uzrokuju veća zagrijanja. S obzirom na to da su takvi namoti samo djelomično izolirani izolacijom viših temperaturnih klasa, oni rade na konvencionalnim temperaturama namota, ali imaju maksimalnu hot spot temperaturu veću od konvencionalnih.

3.2.3 Potpuni hibridni namoti

Potpuni hibridni namoti trebaju imati izolaciju vodiča i svu ostalu čvrstu izolaciju koja se nalazi na namotima od materijala više temperaturne klase, dok ostali dijelovi koji nisu direktno uz namot, kao što su cilindri, kape i prsteni, mogu biti od konvencionalnih materijala. Takvi namoti rade na nadtemperaturama namota većima od konvencionalnih.

3.3. Visokotemperaturni izolacijski sustavi

Visokotemperaturni izolacijski sustavi koriste i tekuću i čvrstu izolaciju više temperaturne klase kroz cijeli namot. S obzirom na to mogu raditi s većim temperaturnim granicama ulja i namota od konvencionalnih.

3.4 Temperaturne granice ulja i namota

U tablicama IV i V prikazani su maksimalni temperaturni porasti kod kontinuiranog rada transformatora za različite kombinacije tekuće i čvrste izolacije [1].

Tablica IV. Maksimalni kontinuirani porast temperature za transformatore s hibridnim izolacijskim sustavima prema IEC 60076-14

	Konvencionalni izolacijski sustav	Hibridni izolacijski sustav				
		Polu-hibridni izolacijski namot	Mješoviti hibridni izolacijski namot	Potpuni hibridni izolacijski namot		
Minimalna potrebna toplinska klasa čvrste izolacije	105	120	130	130	140	155
Maksimalna nadtemperatura top-ulja (K)	60	60	60	60	60	60
Srednja nadtemperatura namota (K)	65/70	75	65	85	95	105
Hot-spot nadtemperatura za čvrstu izolaciju (K)	78	90	100	100	110	125

Tablica V. Maksimalni kontinuirani porast temperature za transformatore s visokotemperaturnim izolacijskim sustavima prema IEC 60076-14

	Esteri				Silikonska ulja			
Minimalna potrebna toplinska klasa čvrste izolacije	130	140	155	180	130	140	155	180
Maksimalna nadtemperatura topulja (K)	90	90	90	90	115	115	115	115
Srednja nadtemperatura namota (K)	85	95	105	125	85	95	105	125
Hot-spot nadtemperatura za čvrstu izolaciju (K)	100	110	125	150	100	110	125	150

3.5 Preopterećenje

Preopterećenje kod transformatora označava stanje u kojem transformator radi s većim opterećenjem od svog nazivnog kapaciteta tijekom određenog vremena. Ono može biti kratkotrajno ili dugotrajno. Inače se za rad pod opterećenjem primjenjuje norma IEC 60076-7, ali postoji izuzetak kada su u pitanju ograničenja preopterećenja, s obzirom da ona variraju u odnosu na različiti izolacijski sustav. S obzirom na duljinu preopterećenja norma IEC 60076-14 je dala preporuku za drugačije temperaturne limite kod različitih izolacijskih sustava. U tablicama VI i VII dane su preporuke za maksimalne temperature za rad pod preopterećenjem.

Tablica VI. Preporuke za maksimalne temperaturne limite u preopterećenju za transformatore s hibridnim izolacijskim sustavima prema IEC 60076-14

	Konvencionalni izolacijski sustav	Hibridni izolacijski sustav				
		Polu hibridni izolacijski namot	Mješoviti hibridni izolacijski namot	Potpuni hibridni izolacijski namot		
Minimalna potrebna toplinska klasa čvrste izolacije	105	120	130	130	140	155
Maksimalna temperatura ulja kod normalnog opterećenja (°C)	105	105	105	105	105	105
Maksimalna temperatura ulja kod dugotrajnog preopterećenja (°C)	115	115	115	115	115	115
Maksimalna temperatura ulja kod kratkotrajnog preopterećenja (°C)	115	115	115	115	115	115
Hot-spot temperatura za čvrstu izolaciju kod normalnog opterećenja (°C)	120	130	140	140	150	165
Hot-spot temperatura za čvrstu izolaciju kod dugotrajnog preopterećenja (°C)	140	140	150	150	160	175
Hot-spot temperatura za čvrstu izolaciju kod kratkotrajnog preopterećenja (°C)	160	160	170	170	180	195

Tablica VII. Preporuke za maksimalne temperaturne limite u preopterećenju za transformatore s visokotemperaturnim izolacijskim sustavima prema IEC 60076-14

	Esteri				Silikonska ulja			
Minimalna potrebna toplinska klasa čvrste izolacije	130	140	155	180	130	140	155	180
Maksimalna temperatura ulja kod normalnog opterećenja (°C)	130	130	130	130	155	155	155	155
Maksimalna temperatura ulja kod dugotrajnog preopterećenja (°C)	140	140	140	140	165	165	165	165
Maksimalna temperatura ulja kod kratkotrajnog preopterećenja (°C)	140	140	140	140	165	165	165	165
Hot-spot temperatura kod normalnog opterećenja (°C)	140	150	165	190	140	150	165	190
Hot-spot temperatura kod dugotrajnog preopterećenja (°C)	150	160	175	200	150	160	175	200
Hot-spot temperatura za čvrstu izolaciju kod kratkotrajnog preopterećenja (°C)	170	180	195	220	170	180	195	220

4. IZOLACIJSKI SUSTAVI PREMA IEEE C57.154

Norma IEEE C57.154, koja se pretežno koristi na sjevernoameričkom tržištu, definira tri tipa izolacijskih sustava koji se koriste u transformatorima:

1. KONVENCIONALNI IZOLACIJSKI SUSTAV u kojem se koriste konvencionalni izolacijski materijali i koji prati temperaturne granice propisane unutar C57.12.00, a koje su prikazane u tablici II.
2. HIBRIDNI IZOLACIJSKI SUSTAV u kojem se koristi kombinacija konvencionalnih i visokotemperaturnih izolacijskih materijala, temperaturne granice ulja ostaju unutar onih propisanih unutar C57.12.00, dok se temperaturne granice namota povećavaju ovisno o temperaturnoj klasi korištenih izolacijskih materijala (tablica VIII) [2].
3. VISOKOTEMPERATURNI IZOLACIJSKI SUSTAV u kojem se koriste visokotemperaturni izolacijski materijali te se temperaturne granice i ulja i namota povećavaju ovisno o temperaturnoj klasi korištenih izolacijskih materijala (tablica IX) [2]

Tablica VIII. Maksimalni kontinuirani porast temperature za transformatore s hibridnim izolacijskim sustavima prema IEEE C57.154

	Konvencionalni izolacijski sustav	Hibridni izolacijski sustav		
Toplinska klasa izolacije	120	130	140	155
Maksimalna temperatura ulja (°C)	65	65	65	65
Srednja temperatura namota (°C) :				
Klasa hlađenja: ON, OF, KN, KF	65	75	85	95
Klasa hlađenja: OD, KD,	70	80	90	100
Hot-spot temperatura (°C)	80	90	100	115

Tablica IX. Maksimalni kontinuirani porast temperature za transformatore s visokotemperaturnim izolacijskim sustavima prema IEEE C57.154

	Konvencionalni izolacijski sustav	Visokotemperaturni izolacijski sustav		
Toplinska klasa izolacije	130	140	155	180
Maksimalna temperatura ulja (°C)	75	85	95	115
Srednja temperatura namota (°C) :				
Klasa hlađenja: ON, OF, KN, KF	75	85	95	115
Klasa hlađenja: OD, KD,	80	90	100	120
Hot-spot temperatura (°C)	90	100	115	140

4.1 Preopterećenje

Ako transformator radi u okolini koja se razlikuje od one definirane standardnom C57.12.00 ili radi pod preopterećenjem u određenom trajanju, treba primijeniti standard C57.12.91 u kombinaciji sa standardom C57.154 (Tablica X i XI).

Tablica X. Preporučeni maksimalni temperaturni limiti za rad pod preopterećenjem za hibridne izolacijske sustave prema IEEE C57.154

	Konvencionalni izolacijski sustav	Hibridni izolacijski sustav		
Toplinska klasa čvrste izolacije	120	130	140	155
Maksimalna temperatura ulja kod normalnog očekivanog životnog vijeka (°C)	105	105	105	105
Maksimalna temperatura ulja kod preopterećenja (°C)	110	110	110	110
Hot-spot temperatura kod normalnog očekivanog životnog vijeka (°C)	120	130	140	155
Hot-spot temperatura kod planiranog preopterećenja (°C)	130	140	150	165
Hot-spot temperatura kod dugotrajnog preopterećenja (°C)	140	150	160	175
Hot-spot temperatura kod kratkotrajnog preopterećenja (°C)	180	180	180	180

Tablica XI. Preporučeni maksimalni temperaturni limiti za rad pod preopterećenjem za visokotemperaturne izolacijske sustave prema IEEE C57.154

	Visokotemperaturni izolacijski sustav			
Toplinska klasa čvrste izolacije	130	140	155	180
Maksimalna temperatura ulja kod normalnog očekivanog životnog vijeka (°C)	115	125	135	155
Maksimalna temperatura ulja kod preopterećenja (°C)	125	135	145	165
Hot-spot temperatura kod normalnog očekivanog životnog vijeka (°C)	130	140	155	180
Hot-spot temperatura kod planiranog preopterećenja (°C)	140	150	165	190
Hot-spot temperatura kod dugotrajnog preopterećenja (°C)	150	160	175	200
Hot-spot temperatura kod kratkotrajnog preopterećenja (°C)	180	180	195	220

5. ISPITIVANJA I ODRŽAVANJE TRANSFORMATORA S IZOLACIJAMA VIŠE TEMPERATURNE KLASSE

Ispitivanje transformatora definiranih normama IEC 60076-14 i IEEE C57.154 provode se prema pripadajućim relevantnim normama, IEC normama za europsko tržište, odnosno IEEE normama za sjevernoameričko tržište. Međutim, preporuča se uzeti u obzir sljedeće:

- provesti dielektrična ispitivanja nakon ispitivanja zagrijanja unutar perioda od jedne vremenske konstante ulja kako bi se na taj način potvrdila dielektrična čvrstoća izolacije pri povišenim temperaturama
- procedura prilikom dielektričnih ispitivanja može biti izmijenjena u odnosu na standardnu u ovisnosti o korištenim visokotemperaturnim materijalima (npr. produljeno vrijeme između ispitnih impulsa/napona, produljeno vrijeme impregnacije nakon punjenja uljem)
- provesti DGA ispitivanje kao dio FAT-a
- ispitivanja zagrijanja provode se prema IEC 60076-2, odnosno IEEE C57.12.00 i C57.12.90, međutim smjernice za evaluaciju rezultata ispitivanja zagrijanja kod transformatora s višim definiranim hot-spot temperaturama daju spomenuti IEC 60076-14 i IEEE C57.154.

Ispitivanja kompatibilnosti izolacijskih materijala u transformatorima koji rade na temperaturama višim od konvencionalnih su izuzetno važna jer visoke temperature mogu značajno utjecati na kemijska i fizikalna svojstva izolacijskih materijala. Ispitivanja kompatibilnosti pomažu u osiguravanju da materijali zadrže svoje performanse i stabilnost tijekom cijelog radnog vijeka transformatora. Neodgovarajući ili nekompatibilni izolacijski materijali mogu dovesti do brže degradacije, što povećava rizik od kvarova i prekida u radu, ali i sigurnosnih incidenata jer nekompatibilni materijali mogu dovesti do požara i/ili eksplozija. Postupak za evaluaciju kombinirane čvrste i tekuće izolacije opisan je u IEC/TS 62332-1 i u IEEE C57.100

Nadzor i dijagnostika transformatora ključni su za pravovremeno otkrivanje kvarova i sprječavanja prekida napajanja potrošača. U slučaju transformatora s visokotemperaturnim izolacijskim sustavima to je posebno važno jer se izolacija može ponašati drugačije nego u standardnim tj. konvencionalnim uvjetima. S obzirom na to da značajni povijesni podaci o ovim sustavima još uvijek nisu dostupni, kontinuirano praćenje može pomoći u ranom prepoznavanju potencijalnih problema, što omogućava pravovremene intervencije i smanjuje operativne troškove. U tu svrhu, u praksi se koriste različite dijagnostičke metode za provjeru i procjenu stanja izolacije. Obično se na mjestu ugradnje transformatora primjenjuju električne dijagnostičke metode, dok se u fizikalno-kemijskim laboratorijima koriste metode temeljene na uzorcima materijala za analizu stanja transformatorskog ulja i papira. Opseg dijagnostičkih metoda koje treba primijeniti na određeni transformator ovisi o njegovoj važnosti unutar mreže, kao i o njegovoj snazi i starosti.

6. ZAKLJUČAK

Obje norme (IEC 60076-14 i IEEE C57.154) definiraju pravila za primjenu visokotemperaturnih izolacijskih sustava. Iako imaju sličan pristup klasifikaciji izolacijskih sustava, ipak glavne razlike su u dopuštenim temperaturnim granicama – IEEE norme često dopuštaju više temperature ulja i namota, dok IEC detaljnije definira temperaturne limite.

Visokotemperaturni izolacijski sustavi u distributivnim transformatorima u određenim primjenama mogu donijeti značajne tehničke i ekonomske prednosti, uključujući povećanu pouzdanost, veću energetska učinkovitost i mogućnost rada pri višim temperaturama bez smanjenja radnog vijeka transformatora. Uvođenje izolacijskih materijala viših temperaturnih klasa omogućuje optimizaciju dimenzija transformatora, smanjenje mase te poboljšanu otpornost na preopterećenja, što doprinosi fleksibilnosti u njihovoj primjeni u modernim elektroenergetskim sustavima. Osim tehničkih prednosti, ovakvi sustavi doprinose i ekološkoj održivosti jer smanjuju potrošnju klasičnih izolacijskih materijala i omogućuju primjenu biorazgradivih i ekološki prihvatljivijih izolacijskih tekućina.

Unatoč brojnim prednostima, široka primjena visokotemperaturnih izolacijskih sustava još uvijek zahtijeva daljnja istraživanja. Međutim, već sada postoji njihova primjena u specijalnim transformatorima,

poput vučnih transformatora, transformatora za vjetroagregate, podzemnih transformatora (vault type) i pećnih transformatora.

Zaključno, visokotemperaturni izolacijski sustavi predstavljaju važan korak prema modernizaciji i povećanju učinkovitosti elektroenergetskih mreža. Njihova daljnja primjena i razvoj ključni su za postizanje energetske održivosti, smanjenje operativnih troškova i povećanje pouzdanosti elektroenergetskih sustava u budućnosti.

7. LITERATURA

- [1] HRN EN 60076-14:2013 Energetski transformatori - 14. dio: Transformatori uronjeni u tekućinu s ugrađenim visokotemperaturnim izolacijskim materijalima (IEC 60076-14:2013)
- [2] IEEE Std. C57.154-2022 : IEEE Standard for Liquid-Immersed Transformers Designed to Operate at Temperatures Above Conventional Limits Using HighTemperature Insulation Systems (IEEE C57.154:2022)
- [3] IEC 60076, "Power transformers"
- [4] IEEE C57.12.00-2010 IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [5] Žarko, B.Ćućić, Transformatori u teoriji i praksi, Graphis, Zagreb, 2020