

Razmatranje koordinacije izolacije u energetskim pretvaračima: osnovni pojmovi i pregled standarda u oblasti

Željko V. Despotović¹, 

¹Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11000 Beograd, Srbija

zeljko.despotovic@pupin.rs

Kratak sadržaj: Koordinacija izolacije je u oblasti energetske elektronike postala veoma bitan element za projektovanje i realizaciju raznih topologija energetskih pretvaračkih modula i uređaja, te stoga svakako zaslužuje pažnju kako projektanata tako i korisnika ovih uređaja. Tokom višedecenijskog iskustva u ovoj oblasti, prikupljeno je dosta iskustvenih i praktičnih podataka koji se tiču koordinacije izolacije, što je dokumentovano u nekoliko ključnih standarda. U radu su dati osnovna terminologija i osnovni tipovi izolacije koji se primenjuju u energetskim pretvaračima, kao i pregled relevantnih standarda iz oblasti koordinacije izolacije sa aspekta projektovanja i upotrebe energetskih pretvarača. Pored interesa za projektante, koordinacija izolacije energetskih pretvarača postala veoma bitan element i za korisnike, ali i za realizaciju i implementaciju različitih pretvaračkih topologija.

Ključne reči: koordinacija izolacije, energetski pretvarači, vazdušni razmak, prenapon, puzna staza

1. Uvod

Energetska elektronika je postala jedna od ključnih oblasti elektrotehnike na polju globalnog upravljanja električnom energijom. Naglim industrijskim razvojem i u novije vreme razvojem distribuiranih izvora energije, došlo je do značajnog porasta upotrebe uređaja energetske elektronike, odnosno energetskih pretvarača i pretvaračkih modula. Od kraja sedamdesetih, pa sve do sada, energetski pretvarači niskog i srednjeg napona i širokog opsega snaga se standardno koriste u sistemima regulisanih elektromotornih pogona (pogona sa promenljivom brzinom, pogona sa direktnom kontrolom momenta i

sl.) ili u drugim konvencionalnim niskonaponskim korisničkim aplikacijama, kao što su napojni uređaji različite namene (industrija, ekologija, biomedicinski uređaji i sl.) i sistemi besprekidnog napajanja. Takođe, električni pretvarači velike snage se već uveliko koriste povezani sa prenosnom i elektro-distributivnom mrežom preko uređaja za kompenzaciju reaktivne energije pa sve do sistema jednosmernog prenosa (tzv. „*High Voltage DC*“-HVDC sistemi). U novije vreme sa intenzivnim razvojem obnovljivih izvora energije, na značaju dobijaju i elektroenergetski pretvarači koji se uglavnom primenjuju u solarnim i vetro-generatorskim sistemima[1-4].

Sve prethodno pomenute činjenice su nametnule intenzivnu primenu poluprovodničke tehnologije i uređaja energetske elektronike u cilju povezivanja proizvodnje energije (bilo iz obnovljivih ili neobnovljivih izvora energije) i potrošnje. Ovo podrazumeva direktnu ili indirektnu povezanost energetskih pretvarača kako sa prenosnom tako i sa distributivnom mrežom. Kada su oni direktno povezani sa električnom mrežom, poluprovodnici unutar njih postaju veoma osetljivi na razne uticaje i poremećaje, koji mogu doći iz napojne mreže: prenaponi različitog porekla (sklopni, atmosferski), prekidi napajanja (privremeni, povremeni i trajni), padovi napona i naponski propadi, naponski tranzijentni impulsi, naponski pikovi, kao i drugi poremećaji koji bi mogli dovesti do gubitka njihove funkcionalnosti. Kao posledica ovoga dolazi do narušavanja kvaliteta napajanja potrošača koji su napajani preko pomenutih sistema energetske elektronike. Na osnovu prethodno pomenutih činjenica nametnulo se između ostalog i rešavanje problema koji se tiču koordinacije izolacije uređaja energetske elektronike i energetskih pretvaračkih sklopova, u cilju sprečavanja njihovog privremenog otkaza ili trajnog uništenja. Rešavanje ovih problema na adekvatan način se direktno reflektuje i na sam kvalitet napajanja potrošača električnom energijom.

Svrha koordinacije izolacije je obezbeđenje dovoljno visoke izolacione podnosive i probojne napone uz stvaranje uslova za brzo i pouzdano reagovanja metal-oksidnih odvodnika prenapona, ali i obezbeđenje dovoljno niske izolacione čvrstoće, da ona bude pouzdana i sigurna, ali i ekonomična i finansijski prihvatljiva[1-2]. U poređenju sa ostalim pasivnim komponentama napojnih električnih kola, uređaji energetske elektronike imaju veoma slabu sposobnost izdržavanja prenapona. Tranzijentni prenaponi čak i relativno malih vrednosti mogu oštetiti ove uređaje. Iz tog razloga je od velike važnosti imati pouzdanu i efikasnu zaštitu od prenapona, kao i sprovesti adekvatne mere koje se odnose na koordinaciju izolacije, unutar pomenutih uređaja energetske elektronike. Uzimajući u obzir karakteristike jednog standardnog IGBT prekidača (kao što je na primer snažni IGBT modul FZ250R65KE3 proizvodnje INFINEON) maksimalnih performansi: maksimalno podnosivog inverznog napona od 6.5 kV, maksimalno trajne podnosive struje od 250 A i maksimalnog vremena prekidanja od 0.3 μ s (tipično), podnosivi porasti napona i struje na njemu se približno mogu kvantifikovati kao:

$$\max(dv / dt) = 6.5kV / 0.3\mu s = 21.6kV / \mu s$$

$$\max(di / dt) = 250A / 0.3\mu s = 0.83kA / \mu s$$

Izolacioni test napon predmetnog tranzistora iznosi 10.4kV, 50Hz, t=60s. Ovom test naponu prema tabeli 2 standarda IEC 60071-1:2006+A1:2010 odgovara udarni napon oblika 1.2/50 μ s amplitude 20kV ili 40kV. Stoga, za talas prenaponskog impulsa 40 kV i odnosa trajanja strmine čela i začelja prenaponskog talasa od 1.2/50 μ s, maksimalni porast napona iznosi:

$$\max(dV/dt) = 40kV/1.2 \mu s = 33.33kV/\mu s > 21.6kV/\mu s$$

Na osnovu prethodnog sledi zaključak, da kad god su povezani na električnu mrežu (distributivnu ili prenosnu) uređaji energetske elektronike moraju biti zaštićeni, odnosno na date sklopove se moraju primeniti adekvatne mere koje se prvenstveno odnose na koordinaciju izolacije.

Prema standardima IEC 61000[5] i IEC 60071 [6], visokofrekventni impulsi transformatori i druge snažne poluprovodničke komponente, ali i uređaji (između ostalog i energetske pretvarači), moraju se ispitivati kratkotrajnim impulsom i moraju podneti udarni impuls 1.2/50 μ s sa vršnom vrednošću definisanom standardom IEC 60071 [6]. Vršna vrednost ovog impulsa se naziva podnosivi udarni napon izolacije („*Basic Lightning Impulse Insulation Level*“-BIL). U zavisnosti od nazivnog naizmeničnog napona, BIL može varirati. Tako su na primer, za generatorski linijski napon („faza-faza“) od 15 kV, iz tabele 2 standarda 60071-1:2006+A1:2010, udarni naponi 75kV i 95kV.

Koordinacija izolacije u oblasti energetskih pretvarača je proces definisanja nivoa izolacije energetskog pretvarača (uzimajući u obzir njegove naponske nivoe) i određivanje dielektrične čvrstoće podsklopva i komponenti, energetskog pretvarača obzirom na njegovo radno okruženje i karakteristike raspoloživih zaštitnih uređaja. Glavna svrha koordinacije izolacije je zaštita sistema od kvara izolacije u cilju održavanja kontinuiteta rada energetskog pretvarača uz uvažavanje praktičnih i ekonomskih faktora. Drugim rečima, cilj je obezbediti pretvarački sistem sa pouzdanom zaštitom uz minimalne troškove.

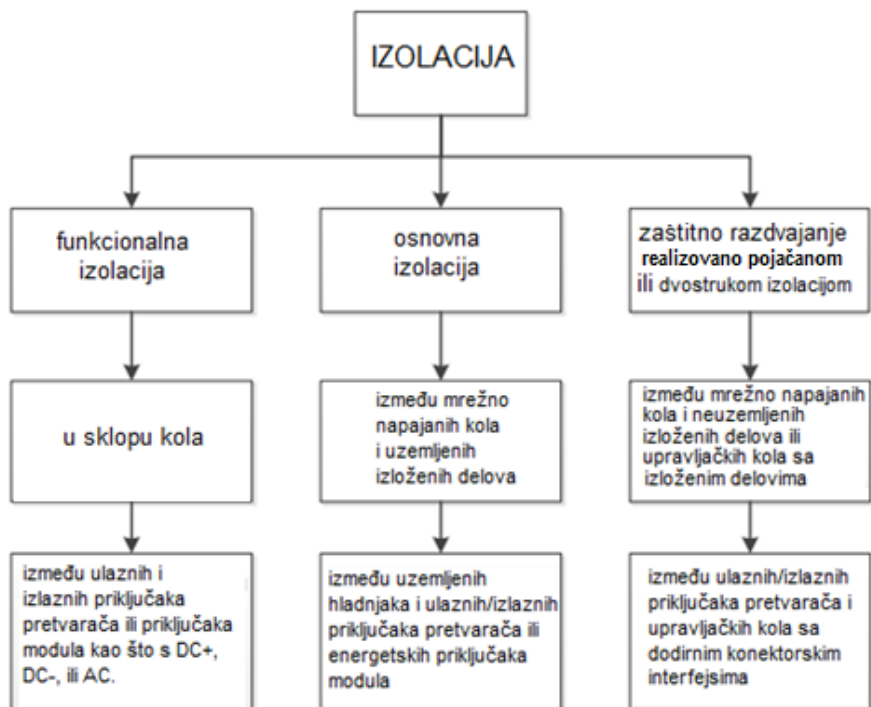
Na osnovu prethodno rečenog, koordinacija izolacije je u oblasti projektovanja i realizacije elektroenergetskih pretvarača postala veoma bitan, ako ne i ključni elemenat. Međutim pored interesa za projektante, koordinacija izolacije energetskih pretvarača postala je veoma bitan elemenat i za korisnike, ali i za realizaciju i implementaciju različitih pretvaračkih topologija. Stoga ova problematika svakako zaslužuje veliku pažnju u stručnoj i inženjerskoj populaciji koja se ovom oblašću bavi. Tokom višedecenijskog iskustva u ovoj oblasti, prikupljeno je dosta iskustvenih i praktičnih podataka, što je dokumentovano u nekoliko ključnih standarda. U nastavku su dati tipovi izolacije koji se koriste u elektroenergetskim pretvaračima, načini njihove realizacije kao i pregled i prikaz strukture relevantnih standarda koji se koriste u ovoj oblasti.

2. Tipovi izolacije u energetske pretvaračima

U oblasti projektovanja i primene elektroenergetskih pretvarača razlikuju se tri osnovna tipa izolacije u zavisnosti od njihove namene [2], [6-7]:

- (1) funkcionalna izolacija,
- (2) osnovna izolacija i
- (3) zaštitno razdvajanje

Svi ovi tipovi izolacije moraju da ispunjavaju hijerarhijski stepenovane zahteve. Na Slici 1 su strukturno prikazani osnovni tipovi izolacije, kao i opisi pozicija na koje se oni odnose i između kojih priključnih krajeva u uređajima energetske elektronike se primenjuju. U nastavku su dati kraći opisi tipova izolacije sa aspekta primene u oblasti energetske pretvarača.



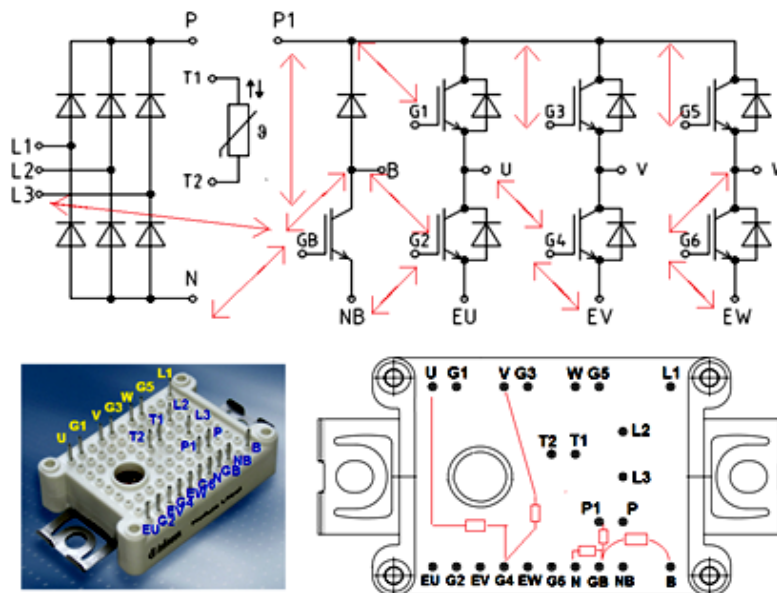
Slika 1. Strukturni prikaz tipova izolacije u energetske pretvaračima [6-7]:

2.1 Funkcionalna izolacija

Funkcionalna izolacija prostorno razdvaja različite potencijale u električnom kolu i uzima u obzir čisto funkcionalnost (osiguranje rada ili ispravne funkcije energetske pretvarača), ali ne i aspekte relevantne za sigurnost korisnika, odnosno izolaciju korisnika od opasnih napona dodira.

U uređajima energetske elektronike, između ostalog u energetskim pretvaračima, pojam funkcionalne izolacije se odnosi na izolaciju između ulaznih i izlaznih priključaka energetskog pretvarača. Što se tiče komponenti energetskih pretvarača, kao što su snažni poluprovodnički IGBT moduli, pojam funkcionalne izolacije se odnosi na izolaciju između priključaka naizmeničnog napona (L1,L2,L3);(U,V,W), priključaka jednosmernog napona (P,N; P1,N) ili priključaka pomoćnog kola za čopersko kočenje (B, NB) i upravljačkih priključaka kao što su priključci „gejta“ (G1-G6, GB) ili priključci „emitera“ (EU, EV, EW) pojedinih IGBT prekidača u modulu[7].

Prikaz naznačenih spojeva između kojih se razmatra ovaj tip izolacije je dat na Slici 2 za jedan standardni IGBT modul EasyPIM™ FP15R12W1T4, proizvodnje INFINEON, za trajnu struju prekidača od 15A i trajni podnosivi napon 1200V[6].

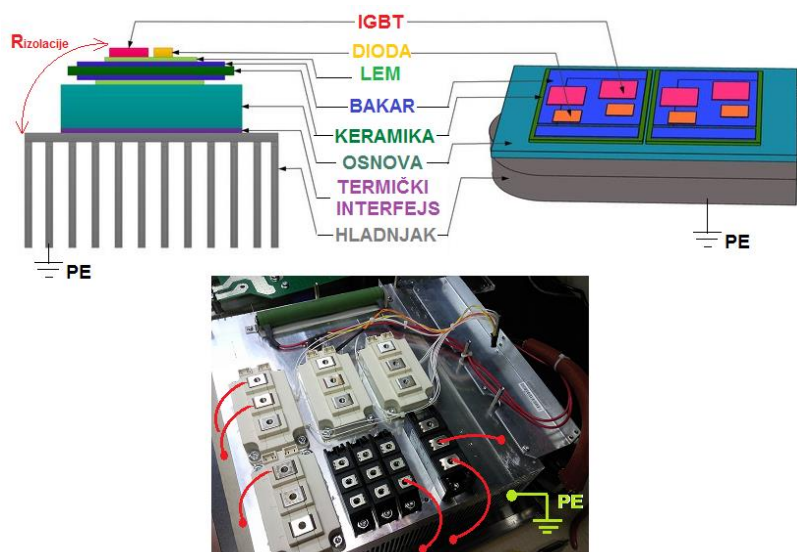


Slika 2. Prikaz IGBT modula snage i priklučaka između kojih se posmatra funkcionalna izolacija

2.2 Osnovna izolacija

Osnovna izolacija odvaja mrežna kola od uzemljenih izloženih delova i stoga je veoma bitna za bezbednost sa aspekta zaštite od opasnih napona dodira, odnosno zaštite od električnog udara. Osnovna izolacija je dovoljna da zaštiti korisnika od električnog udara, ali ako iz nekog razloga dođe do kvara osnovne izolacije, korisnik bi mogao biti izložen opasnim naponima.

U elektroenergetskim pretvaračima, osnovna izolacija je ustvari izolacija između uzemljenih delova energetskog pretvarača kao što su hladnjaci, kućišta ili montažne ploče energetskih modula sa jedne strane i ulaznih i izlaznih priključaka pretvarača ili priključaka energetskih modula sa druge strane. Prikaz spojeva na IGBT modulu snage između kojih se posmatra ovaj tip izolacije je dat na Slici 3.



Slika 3. Prikaz IGBT modula snage i pozicija između kojih se posmatra osnovna izolacija

2.3 Zaštitno razdvajanje

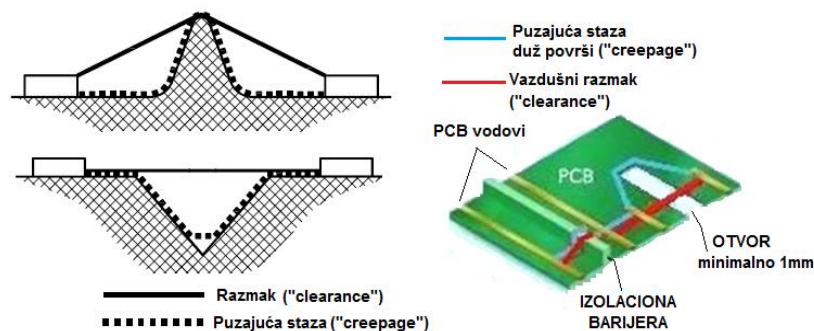
Zaštitno razdvajanje se izvodi pojačanom ili dvostrukom izolacijom (2x osnovna izolacija) i ono odvaja mrežno napajana kola od neuzemljenih izloženih delova, sa jedne strane, od upravljačkih kola sa druge strane, ako

su ona direktno povezana na ostale upravljačke krugove, koji sadrže izložene komponente. Dodatna zaštita korisničke opreme nije predviđena. Kvar ove izolacije mogao bi biti fatalan za korisnika, jer uzemljeni izloženi delovi mogu doći na potencijal mrežnog napona. To je upravo razlog zašto se u ovom slučaju moraju ispuniti znatno strožiji zahtevi u odnosu na prethodna dva tipa izolacije [6].

Zaštitno razdvajanje se izvodi i između ulaznih i izlaznih priključaka energetskog pretvarača ili priključaka energetskog modula, sa jedne strane i izolovanih internih kontrolnih kola ili senzora sa druge strane. Senzori su uobičajeno strujni, naponski ili temperaturni, čiji izlazi mogu biti povezani na upravljačka kola sa izloženim delovima, na primer, pinovi konektora ili paneli osetljivi na dodir („touch panel“). Potrebno je dalje ostvariti zaštitno odvajanje između energetskih i upravljačkih kola sa izloženim delovima na štampanim pločama pobudnih (drajverskih) modula energetskih prekidačkih tranzistora.

3. Realizacija izolacije

Izolacija se može izvesti kao (1) vazdušni razmak (ili preskočna staza), (2) puzna staza (staza puzajućih struja), (3) čvrsta izolacija ili kao kombinacija ova tri načina. Na Slici 4 su prikazani detalji koji se odnose na osnovne definicije vazdušnog razmaka ili preskočne staze (engl. „clearance“) i puzne staze (engl. „creepage“). Ove definicije su bitne za dalje praćenje izložene tematike i mogu se odnositi se na tipove izolacije između dve tačke na štampanoj ploči („Printed Circuit Board“-PCB) ili na primer između dve priključne tačke energetskog IGBT modula.



Slika 4. Prikaz vazdušnog razmaka (preskočne staze) i puzne staze na štampanoj ploči

Vazdušni razmak (preskočna staza) se odnosi na rastojanje u vazduhu između dve tačke na PCB koje su obično rastavljene izolacionom barijerom,

dok se za iste te dve tačke koje mogu biti rastavljene udubljenjem ili otvorom na površini (Slika 4), specificira se puzna staza (staza puzajućih struja) koja se odnosi na tzv. površinsko rastojanje koje spaja te dve tačke.

3.1 Vazdušni razmak ili preskočna putanja („clearance“)

Vazdušni prostor između provodnih delova naziva se vazdušni razmak ili preskočna staza (engl. „clearance“). Ona mora biti dovoljno velika da spreči preskok varnice tokom celokupnog vremena trajanja brze ili tranzijentne promene napona. Odlučujući faktori za to su najveći prisutni vršni napon i dielektrična čvrstoća okolnog vazduha. Vršni napon je uzet u obzir preko prenaponske kategorije opreme koja se napaja iz mreže.

Nivo prenaponske kategorije je u stvari nivo očekivanog prenapona. U posebnim zaštićenim kolima očekivani naponi su niži (nivo niske prenaponske kategorije) u odnosu na kola u kojima može doći do atmosferskih prenapona (nivo visoke prenaponske kategorije). Četiri postojeće kategorije opisane su u svim standardima koji se tiču koordinacije izolacije, sa malo drugačijim objašnjenjima, ali suštinski sa istim značenjem. Prenaponske kategorije u skladu sa EN61800-5-1, 4.3.6.1.3[8] su date u Tabeli 1.

| Tabela1. Prenaponske kategorije u skladu sa EN61800-5-1, 4.3.6.1.3 | |
|---|--|
| Prenaponska kategorija „Over Voltage Category“ (OVCAT) | OPIS |
| 1 | Oprema povezana u električnom kolu u kojem su preduzete mere za smanjenje tranzijentnih prenapona na nizak nivo |
| 2 | Oprema koja nije stalno povezana na trajnu instalaciju |
| 3 | Oprema povezana u trajnoj (fiksnoj) instalaciji („nizvodno“ od distributivnog razvodnog ormana, uključujući i njega) |
| 4 | Oprema trajno povezana na početku instalacije („uzvodno“ ka distributivnom razvodnom ormanu) |

Nadmorska visina na kojoj se nalazi uređaj ili instalacija ima veliki uticaj na dielektričnu čvrstoću vazduha usled smanjenja vazdušnog pritiska. Ako je nadmorska visina primenjenog uređaja ili instalacije veća od 2000m, potreban razmak, odnosno vazdušni razmak (preskočna staza) mora biti uvećan za faktor korekcije nadmorske visine koji je dat u standardu EN60664-1[9], tabela A2. Standard ne zabranjuje niti dozvoljava interpolaciju nadmorskih visina. Uobičajeno je i fizički ima smisla vršiti interpolaciju prilikom projektovanja. Korekcionni faktori razmaka usled nadmorske visine, prema standardu EN60664-1, tabela A2, su dati u Tabeli 2.

Tabela 2. Korekcionni faktor nadmorske visine u skladu sa EN60664-1, tab.A2

| Nadmorska visina (m) | Atmosferski pritisak (kPa) | Korekcionni faktor |
|----------------------|----------------------------|--------------------|
| 2000 | 80 | 1.00 |
| 3000 | 70 | 1.14 |
| 4000 | 62 | 1.29 |
| 5000 | 54 | 1.48 |
| 6000 | 47 | 1.70 |
| 7000 | 41 | 1.95 |

3.2 Puzna staza („creepage“)

Zaprljanost, kondenzacija ili u najgorem slučaju kvašenje površine izolacionog materijala može preko njega stvoriti provodni put. Dužina ovog provodnog dela naziva se dužina puzanja, specifična puzna staza ili kraće puzanje („creepage“). Prijavština, soli, voda i primenjeni napon mogu imati uticaj na dužinu provodne puzne staze. Nivo zagađenja i otpor materijala koji se koriste za izolaciju u najvećoj meri određuju dužinu puzne staze. Uslovi okoline su u korelaciji sa četiri stepena zagađenja, koji su prikazani pregledno u Tabeli 3 koja je u skladu sa standardom EN61800-5-1, 4.3.6.1.2[8].

Tabela 3. Stepene zagađenja u skladu sa EN61800-5-1, 4.3.6.1.2

| Stepen zagađenja „pollution degree“ (PD) | OPIS |
|---|--|
| 1 | Ne dolazi do zagađenja ili se javlja samo suvo, neprovodljivo zagađenje. Zagađenje praktično nema uticaja. |
| 2 | Obično se javlja samo neprovodno zagađenje. Povremeno, međutim, može se očekivati privremena provodljivost prouzrokovana kondenzacijom kada uređaj nije u radu. Neki standardi poput EN50124-1 uvažavaju mogućnost pojavljivanja privremene provodljivosti izazvane kondenzacijom u toku rada. |
| 3 | Slučaj kada dolazi do provodnog zagađenja ili suvog neprovodnog zagađenja, koje postaje provodno usled kondenzacije, što je i očekivano. |
| 4 | Zagađenje stvara trajnu provodljivost prouzrokovanu, na primer provodna prašina, kiša ili sneg. |

Otpor izolacionog materijala opisan je uporednim indeksom praćenja (engl. „comparative tracking index“- CTI). Uporedni indeks praćenja se koristi se za merenje svojstava električnog proboja (tzv. „praćenja“) izolacionih materijala. Praćenje je ustvari električni kvar na površini izolacionog materijala u kojem početno izlaganje toploti usled električnog luka karbonizuje izolacioni materijal. Karbonizovana područja postaju provodljivija od netaknutog dela izolatora, povećavajući protok struje, što dovodi do povećanog stvaranja toplote, i na kraju do potpune provodljivosti izolacije.

Indeks CTI se određuje povećanjem ispitnog napona sve dok određena „struja curenja“ ne poteče u definisanoj postavci ispitivanja. Što je materijal otporniji, to je veća vrednost indeksa CTI i puzna staza tada može biti kraća. U ovom pogledu izolacioni materijali su klasifikovani u pet grupa, kao što prikazuje Tabela 4.

| Tabela 4. Uporedni indeks praćenja CTI - grupe | | |
|---|-----------------|--|
| CTI grupa | CTI nivo | Primer |
| 0 | | Neorganski materijali poput stakla ili keramike koji se ne prate |
| 1 | ≥600 | Plastični materijal poput PE-HD (polietilen) ili PTFE (politetrafluoretilen) |
| 2 | 400...599 | Osnovni materijal štampane ploče (PCB), FR4 tip KF. |
| 3a | 175...399 | Štampane ploče punjene staklom, materijal FR4, tip KF |
| 3b | 100...174 | Polyimid folije (npr. Kapton) ili smole (npr. Fenol) |

Štetni efekat puzajućih struja je odavno poznat problem. U ovim slučajevima je odlučujuća efektivna vrednost primenjenog napona, a ne njegova vršna vrednost. Interval za izračunavanje efektivne vrednosti napona mora iz ovih razloga biti barem jednak vremenskom ciklusu pojave puzanja. Fazni pomeraj između prvih harmonika napona mora se uzeti u obzir povećanjem efektivne vrednosti napona. Često je fazni pomeraj nepoznat ili ga je moguće identifikovati samo uz velike teškoće. Zbog toga se ovaj slučaj smatra najkritičnijim i koristi se kvadratna suma linijskih napona, odnosno:

$$V_{1,3} = \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{2,3}^2}$$

Minimalne dužine puzne staze koje se zahtevaju u standardima uglavnom su određene empirijski i u eksperimentalnim postavkama, pri čemu je otpornost praćenja štampanih elektronskih ploča određena samo za napone do 1000V i stepenom zagađenja 1 i 2. Zbog toga su u ovom slučaju potrebna rastojanja mnogo manja nego što bi CTI materijala štampane ploče (PCB) to zapravo zahtevao. Ovo su razlozi zbog kojih dužina puzne staze mora biti najmanje jednaka vazdušnom razmaku (preskočnoj stazi). Za neorganske izolacione materijale poput stakla ili keramike, koji se ne prate, dužina puzne staze može biti jednaka pripadajućem vazdušnom razmaku (preskočnoj stazi).

3.3 Čvrsta izolacija

Čvrsta izolacija spada u grupu izolacije koja u osnovi ne koristi samo vazduh ili neki drugi izolacioni medijum (na primer izolacioni gas). Neki standardi zahtevaju minimalnu debljinu materijala, ne prihvataju premaz kao

izolacioni materijal ili imaju posebne zahteve u pogledu čvrste izolacije štampanih ploča. Uopšteno, nije moguće generalizovati zahteve za izolacijom i mora se proveriti odgovarajući standard proizvoda. Da bi se proverilo da li čvrsta izolacija podnosi naponsko opterećenje, u najvećem broju slučajeva se vrše tri ispitivanja:

- Ispitivanje na podnosivi impulsni napon
- AC i DC naponsko ispitivanje
- Ispitivanja parcijalnih pražnjenja

U idealnom slučaju, ako je napon paljenja parcijalnih pražnjenja veći od maksimalnog vršnog napona koji se može očekivati, tada do parcijalnog pražnjenja nikada neće doći. Napon gašenja parcijalnog pražnjenja mora biti veći od stalno prisutnog napona, jer kada započne parcijalno pražnjenje, on se mora ponovo bezbedno prekinuti.

Neki standardi zahtevaju test parcijalnog pražnjenja samo za zaštitnu izolaciju koja je dobijena zaštitnim odvajanjem. Ova ispitivanja su dozvoljena u slučajevima kada se vrše ispitivanja na komponentama, pre nego na opremi [1], [3].

Koordinacija izolacije je ima za cilj da poveže vrste i realizaciju izolacije za svaki potencijal unutar energetskog pretvarača, kao i da utvrdi minimalne zahteve u pogledu razmaka (rastojanja) i/ili ispitnih napona, koji su zahtevani relevantnim standardima.

4. Pregled relevantnih standarda u oblasti

U ovom poglavlju će biti dat kraći pregled evropskih EN i UL standarda koji se odnose na koordinaciju izolacije elektroenergetskih pretvarača.

4.1 Evropski standardi (EN norme) koji se koriste za koordinaciju energetskih pretvarača

Visokonaponska oprema (za napone $>1000\text{Vac}$ ili 1500Vdc) i niskonaponska oprema (za napone $\leq 1000\text{Vac}$ ili 1500Vdc) moraju biti posmatrane odvojeno. Obe vrste opreme imaju svoje osnovne standarde sa osnovnim zahtevima.

Za visokonaponsku opremu priključenu na mrežu je relevantan standard EN60071-1[6], dok je za niskonaponsku opremu to EN60664-1[9]. Standardi proizvoda i standardi grupa proizvoda obično se pozivaju na ove osnovne standarde, tako da su zahtevi za svu opremu uglavnom nezavisni od korišćenih standarda.

Postoje neki tipično primenjeni standardi za koordinaciju izolacije energetskih pretvarača. U Tabeli 5 [1],[3-4] su pregledno prikazani izabrani evropski standardi (norme) koji su relevantni za koordinaciju izolacije energetskih pretvarača.

Standardi za opremu koja nije povezana na elektroenergetsku mrežu obično se ne zasnivaju na prethodno navedenim osnovnim standardima. Povremeno se zahtevaju ozbiljniji zahtevi za izolacijom energetskih pretvarača, kao što je na primer standard EN50124-1[10] koji se koristi u železnici.

| Tabela 5. Izbor Evropskih standarda za koordinaciju izolacije u energetskim pretvaračima | | |
|---|---|--------------------------|
| EN60071-1 | Koordinacija izolacije – definicije, principi i pravila | osnovni standard |
| EN60664-1 | Koordinacija izolacije za opremu u viskonaponskim sistemima - principi, zahtevi i ispitivanja | osnovni standard |
| EN50178 | Elektronska oprema za upotrebu u energetskim instalacijama | standard grupe proizvoda |
| EN62477-1 | Bezbednosni zahtevi za sisteme i opremu električnih pretvarača snage - opšte | standard grupe proizvoda |
| EN60950-1 | Oprema za informacione tehnologije - bezbednost - opšti zahtevi | standard grupe proizvoda |
| EN61204-7 | Niskonaponski izvori napajanja, sa dc izlazom - bezbednosni zahtevi | standard grupe proizvoda |
| EN61800-5-1 | Električni pogonski sistemi sa podešavanjem brzine – sigurnosni zahtevi - električni, termički i energetski | standard grupe proizvoda |
| EN62040-1 | Besprekidni izvori napajanja (UPS) – opšti i sigurnosni zahtevi za UPS | standard grupe proizvoda |
| EN62109-1 | Sigurnost energetskih pretvarača za upotrebu u fotonaponskim sistemima- opšti zahtevi | standard grupe proizvoda |
| EN50124-1 | Primene na železnici - koordinacija izolacije - osnovni zahtevi – razmaci i puzajuće staze za svu električnu i elektronsku opremu | osnovni standard |
| EN60071-1 | Koordinacija izolacije - Definicije, principi i pravila | standard grupe proizvoda |

4.2 UL standardi koji se odnose na koordinaciju izolacije energetskih pretvarača

Generalno, koordinacija izolacije prema sertifikaciji UL (*Underwriter Laboratories*) se u principu ne zasniva na IEC ili EN standardima. Iz ovog razloga postoje i znatnije razlike između ovih standarda. Ako se predviđa UL odobrenje za opremu, koordinacija izolacije će biti sprovedena dva puta: jednom za evropske/međunarodne standarde i jednom za UL standarde.

Osnovni zahtevi po UL normi za izolaciju uspostavljeni su za nazivne fazne napone („faza-zemlja“) do 1500V u to konkretno u standardu UL840. Zahtevi različitih UL standarda proizvoda utvrđeni su na ovom osnovnom standardu ili omogućavaju alternativno korišćenje zahteva za izolacijom na osnovu ovog osnovnog standarda[1],[3-4].

U poređenju sa IEC i EN standardima, većina UL-standarda ne dozvoljava razliku između funkcionalne i osnovne izolacije, što najčešće rezultuje većim vazdušnim razmacima (preskočnim stazama) u kolu. Obično oprema projektovana u skladu sa IEC i EN standardima ne ispunjava UL

zahteve za izolaciju. Tabela 6 daje pregled UL standarda za koordinaciju izolacije elektroenergetskih pretvarača.

| Tabela 6. Izbor UL standarda za koordinaciju izolacije | | | |
|---|---|--------------------------|---|
| UL840 | Koordinacija izolacije obuhvata razmak i puzne staze za električnu opremu | osnovni standard | |
| UL508A | Industrijski kontrolni paneli | standard grupe proizvoda | UL840 se može koristiti alternativno |
| UL508C | Oprema za konverziju električne snage (energetski pretvarači) | standard grupe proizvoda | UL840 se može koristiti alternativno |
| UL1741 | Invertori, konvertori (pretvarači), kontroleri i oprema za međusobno povezivanje za korišćenje sa distribuiranim energetskim izvorima | standard grupe proizvoda | UL840 se može koristiti alternativno |
| UL61800-5-1 | Električni pogonski sistemi sa podešavanjem brzine, deo 5.1: sigurnosni zahtevi - električni, termički i energetski | standard grupe proizvoda | UL840 se NE može koristiti alternativno |

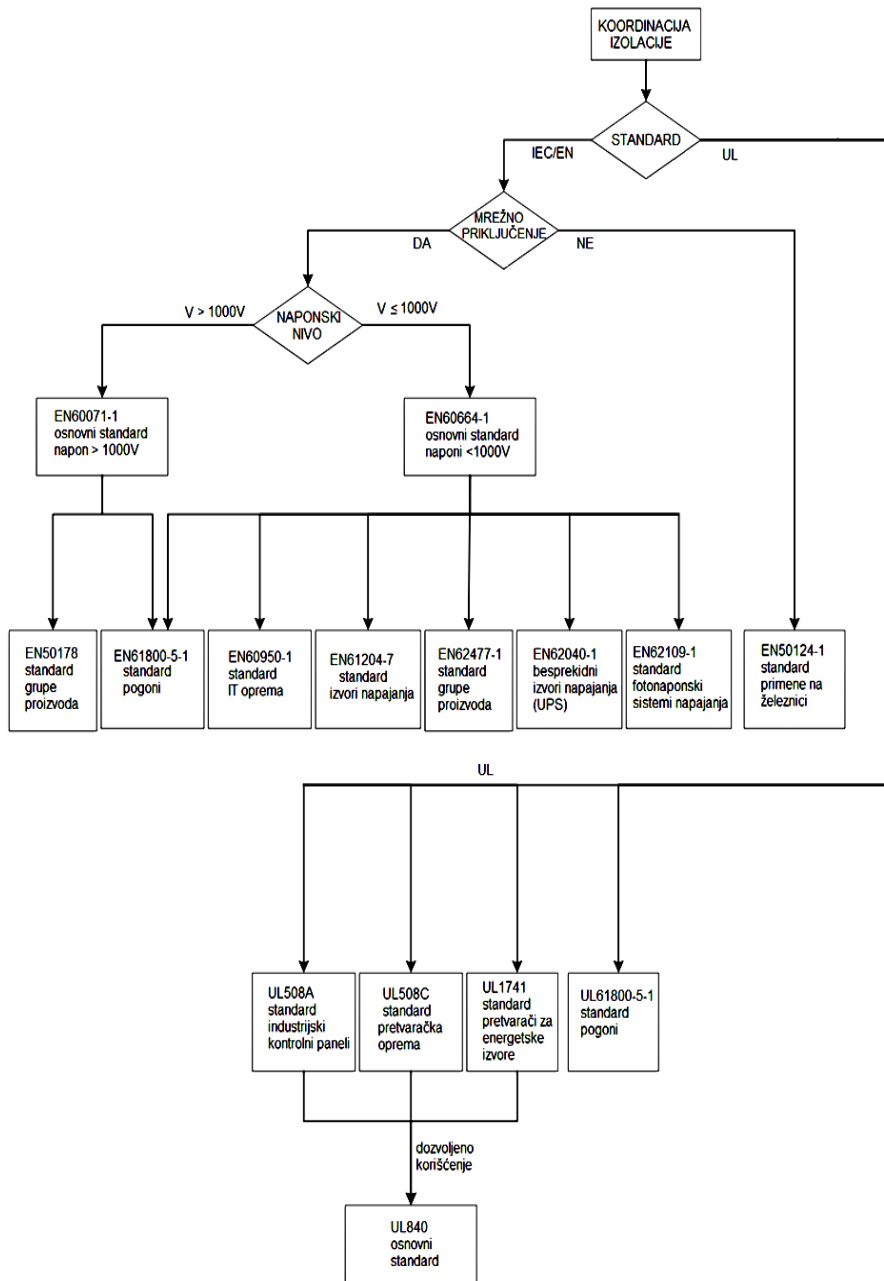
Objavljeni standard UL61800-5-1 je donet da bi na kraju zamenio UL508C. Od 2016. godine UL61800-5-1 se koristi za određivanje koordinacije izolacije novih proizvoda. Kao rezime značajnih razlika između UL61800-5-1 i UL508C, dat je dokument dostupan na početnoj UL internet stranici:

www.ul.com/global/documents/offerings/industries/powerandcontrols/powerdistribution/041013UL508CContinuingCert.pdf, koja je dostupna počev od 28.07.2016.

Standard UL61800-5-1 nije identičan sa EN61800-5-1. Značajno se razlikuju naprimer vazdušni razmaci u oblasti priključnih terminala pogona. Prema UL61800-5-1 se zahtevaju veći vazdušni razmaci (preskočne staze), odnosno udaljenosti. Spisak razlika nalazi se u predgovoru UL61800-5-1.

Na Slici 5 je prikazana detaljna struktura tipično korišćenih standarda za koordinaciju izolacije u oblasti industrijske primene energetskih pretvarača. Takođe na prikazanom dijagramu toka je data procedura za izbor IEC/EN standarda i UL standarda u zavisnosti od toga da li se radi o mrežnom priključenju ili ne, i u zavisnosti od izbora naponskog nivoa.

Kod vodećih evropskih i svetskih proizvođača (SEMIKRON, INFINEON, ROHMS i sl.) su komponente dizajnirane u skladu sa standardom EN61800-5-1. Ako u tehničkom ili kataloškom listu komponenti nije navedeno drugačije, dimenzionisanje izolacije je u mnogome određeno klasom probojnog napona (direktni i inverzni napon) za datu komponentu ili modul.



Slika 5. Prikaz strukture izbora standarda iz oblasti koordinacije izolacije elektroenergetskih pretvarača [7]

Moduli iste proizvodne linije i iste veličine kućišta dizajnirani su za najveći raspoloživi napon proboja ovog tipa modula. Na primer, MiniSKiiP 38ACxxx (proizvodnje SEMIKRON) je dostupan sa integrisanim čipovima za 600V, 1200V i 1700V. Osim napona čipa, uvek se koristi isto kućište, a dimenzionisanje izolacije se vrši za najveći probojni napon modula (u ovom slučaju za 1700V)[7].

Tako na primer tipične specifikacije koje firma SEMIKRON koristi za koordinaciju izolacije u skladu sa EN61800-5-1 su date u Tabeli 7[7].

Tabela 7: Tipične specifikacija firme SEMIKRON za koordinaciju izolacije u skladu sa EN61800-5-1

| Klasa probojnog napona | DC-link napon | Mrežni napon | Konfiguracija mreže | Prenaponska kategorija | Nadmorska visina | Stepen zagađenja |
|------------------------|---------------|--------------|---------------------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| 600V/650V | 400V | 230V | sprega „zvezda“ uzemljeni TN-C sistem | 3 | 2000m | 2 |
| 1200V | 900V | 480V | | | | |
| 1700V | 1200V | 690V | | | | |

Prema definicijama iz poglavlja 2, priključni krajevi modula (terminali) imaju međusobnu funkcionalnu izolaciju. Između terminala i baze modula, koristi se osnovna izolacija. U modulima sa integrisanim temperaturnim senzorom (tzv. “*potential free*”), kao što je prikazano na Slici 2 ili u kataloškom listu modula FP15R12W1T4[11], proizvodnje INFINEON, funkcionalna izolacija je primenjena između senzora i energetskeg dela kola.

Ispitni izolacioni napon modula Visol, dat u tablicama kataloških podataka firme SEMIKRON, pokazuje veće napone od zahtevanih standardom EN61800-5-1. To je zato što se moduli proizvodnje SEMIKRON mogu koristiti prema drugim standardima, kao na primer za primene na železnici. Stoga iz datog ispitnog napona nije moguće zaključiti koja je specifikacija korišćena za koordinaciju izolacije.

5. Zaključak

U radu su predstavljeni osnovni tipovi i specifičnosti realizacije izolacije, kao i neki relevantni standardi koji se odnose na koordinaciju izolacije u elektroenergetskim pretvaračima. Ovaj rad je imao za cilj da ukaže na neke specifičnosti postupaka koordinacije izolacije u energetskim pretvaračima koja je u ovoj oblasti postala veoma značajan element kako projektovanja tako i njihovog korišćenja. Naročito naglasak u radu je dat na pregled osnovnih standarda koji se tiču koordinacije izolacije u elektroenergetskim pretvaračima. Na kraju je dat kompletan i pregledan strukturni prikaz standarda iz ove oblasti u cilju mogućeg korišćenja ovih podataka kako od

strane projektanata elektroenergetskih pretvarača tako i od strane njihovih korisnika. Dalji pravac u sagledavanju problematike u oblasti koordinacije izolacije elektroenergetskih pretvarača se odnosi na proučavanje i prikaz metodologija i određivanje koordinacije izolacije za konkretne tipove energetskih pretvarača.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru istraživanja koja su finansirana od strane Ministarstva Prosvete Nauke i Tehnološkog razvoja za period 2020.-2021, Ugovor pod evidencionim brojem 451-03-9/2021-14/200034.

Literatura

- [1] S.Ozdemir, N.Altin, A.Nasiri and R.Cuzner, "Review of Standards on Insulation Coordination for Medium Voltage Power Converter", *IEEE Open Journal of Power Electronics* (Volume: 2), pp. 236-249, March 2021.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9376926/authors#authors>
- [2] X. Rong, "Insulation Coordination of Solid State Devices Connected Directly to the Electric Power Distribution System", ARIZONA STATE UNIVERSITY, August 2017.
- [3] X. Rong, D. Zhang, G. Karady, and G. Heydt, "Insulation coordination of FREEDM solid state transformer", in *Proc. CIGRE Grid of the Future Conf.*, Philadelphia, PA, 2016.
- [4] R.R. Nunes and W.d.C. Boaventura, "Insulation coordination considering the switching overvoltage waveshape—Part I: Methodology", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 4, pp. 2434–2440, Oct. 2009.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5235739>
- [5] *Electromagnetic compatibility*, IEC-61000, 1.1, 1.2, 2.3.1, 2014.
- [6] *Insulation coordination*, IEC-60071, 1.2, 3.1, 3.1, 2006.
- [7] R.Weiss, U.Nicolai, *AN1405-Coordination of Insulation-Rev 03*, SEMIKRON, 2017.
- [8] *Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems - Part 5-1: Safety Requirements - Electrical, Thermal and Energy*, EN Standard, 61800-5-1, 2007.

- [9] *Insulation Coordination for Equipment Within Low-Voltage Supply Systems - Part 1: Principles, Requirements and Tests*, IEC Standard 60664, 2007
- [10] *Railway applications. Insulation coordination Basic requirements. Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment* BS EN 50124-1, 2017.
- [11] Technical Information FP15R12W1T4- INFINEON, rev 2.2., 2013.
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FP15R12W1T4-DS-v02_02-EN.pdf?fileId=db3a3043163797a6011638945429014f

Abstract. Insulation coordination in the field of power electronics has become a very important issue. It certainly deserves the attention of both designers and users of various topologies of power converter modules and devices. Over decades of experience in this area, a lot of experiential and practical data has been collected and documented in several key standards. The paper presents the basic terminology and basic types of insulation used in modern power converters, as well as an overview of relevant standards. Except being important for designers, the insulation coordination of the power converters has become also a very important issue for users.

Keywords: insulation coordination, power converters, clearance, overvoltage, creepage distance

Consideration of Insulation Coordination in Power Converters: Basic Terminology and Review of Standards in the Field

Željko V. Despotović

Rad primljen u uredništvo: 29.10.2021. godine.

Rad prihvaćen: 01.12.2021. godine.

