

Naprezanja izolacije elektroenergetske opreme pri nestandardnim talasnim oblicima prenapona

Ranko Jasika¹, Jovan Mrvić¹, Stefan Obradović¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

ranko.jasika@ieent.org, jovan.mrvic@ieent.org, stefan.obradovic@ieent.org

Kratak sadržaj: Elektroenergetska oprema je tokom svog rada stalno izložena prenaponima različitog porekla, kao što su atmosferska pražnjenja, sklopne operacije, kvarovi itd. Zbog toga su adekvatan izbor prenaponske zaštite i podnosivih napona izolacije opreme ključni faktori u povećanju pouzdanosti sistema. Generalno, koordinacija izolacije se sprovodi analizom ponašanja izolacije za standardne talasne oblike udarnog i sklopnog prenapona. Međutim, prenapni koji se javljaju u pogonskim uslovima mogu značajno odstupati od standardnih talasnih oblika podnosivih napona izolacije, u pogledu vremena čela naponskog talasa, trajanja talasa, postojanja visokofrekventnih komponenti usled pojave refleksija u postrojenju i drugih faktora. U ovom radu su predstavljene moguće metode procene ponašanja izolacije opreme za realne naponske talase kojima je izolacija izložena tokom eksploatacije a koji odstupaju od standardnih talasnih oblika, analizom u frekventnom domenu. Kako u signalu prenapona postoje različite komponente na različitim frekvencijama, od kojih svaka ima različitu energiju, osnovni cilj ovog rada je analiza karakteristika izolacije jednog konkretnog transformatora sa stanovišta energetske spektralne gustine naponskog talasa koji se javlja na njegovim priključcima pri pojavi atmosferskog pražnjenja. Analiza je bazirana na određivanju sigurnosne margine na celom frekventnom spektru prenaponskog talasa, odnosno na proračunu takozvanog *FDSF* (*Frequency Domain Severity Factor*). Rezultati proračuna pokazuju da iako je amplituda prenapona niža od podnosivog napona izolacije transformatora uz odgovarajuću sigurnosnu marginu (zadovoljen uslov klasičnog pristupa koordinaciji izolacije), analiza spektra naponskog talasa u frekventnom domenu pokazuje da ipak može doći do ugrožavanja izolacije.

Ključne reči: koordinacija izolacije, ATP/EMTP, prenaponi, *FDSF*, Furijeova transformacija, frekventni domen

1. Uvod

Cilj koordinacije izolacije je adekvatan izbor podnosivih napona izolacije elektroenergetske opreme u skladu sa naponskim naprezanjima koja se mogu javiti u mreži tokom eksploatacije uvažavajući efekte primenjenih sredstava prenaponske zaštite i potrebnu pouzdanost njihovog rada. Kako je koordinacija izolacije opreme veoma važan faktor za pouzdan rad svakog elektroenergetskog sistema, sprovode se brojne numeričke simulacije u softverima za analizu tranzijentnih proseca da bi se što bolje procenio nivo prenapona koji se mogu javiti u mreži.

Izolacija pokazuje različite sposobnosti podnošenja naprezanja za različite talsane oblike napona, odnosno svakoj vrsti (obliku) prenapona jedne te iste izolacione konstrukcije odgovara različita funkcija verovatnoće proboja. Kako se u praksi javlja veliki broj različitih talsnih oblika prenapona, problem koordinacije izolacije postaje složen, zbog čega je za praktične potrebe problem pojednostavljen tako što je mnoštvo vrsta napona i prenapona, polazeći od efekata koje imaju na izolacijama, razvrstano u samo nekoliko grupa (klasa) [1]:

- trajne napone industrijske učestanosti,
- privremene prenapone industrijske učestanosti,
- sporopromenljive (sklopne prenapone),
- brzopromenljive (atmosferske prenapone),
- vrlo brzopromenljive prenapone (GIS, vakuumski prekidači, itd.) i
- kombinovane prenapone.

Navedeni prenaponi koji naprežu izolaciju opreme definisani su amplitudom, oblikom i trajanjem. Za svaku klasu napona i prenapona, određuju se reprezentativni oblici napona i prenapona, uzimajući u obzir efekat koji imaju na izolaciju. Reprezentativni naponi, kojima se vrše ispitivanja izolacija kada se proveravaju podnosivi naponi izolacije prema pojedinim vrstama naponskog naprezanja su (standardni ispitni naponi) [1,2]:

- naizmernični kratkotrajni napon industrijske učestanosti trajanja 1 min,
- sklopni udarni napon oblika 250/2500 ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$),
- atmosferski udarni napon oblika 1.2/50 ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$).

Standardni postupak koordinacije izolacije podrazumeva da se njena provera sposobnosti podnošenja prenapona kojima je izložena sprovodi poređenjem samo amplitude prenapona sa definisanim podnosivim naponom (atmosferskim, sklopnim ili naizmerničnim, zavisno od tranzijentnog procesa koji se posmatra). Međutim u praksi se dešava da dolazi do proboja izolacije opreme usled dejstva prenapona čija je amplituda niža od podnosivog napona

izolacije [3]. Osnovni razlog za to je značajno odstupanje talasnog oblika prenapona kome je oprema izložena od oblika standardnog podnosivog napona, sa kojim se poredi.

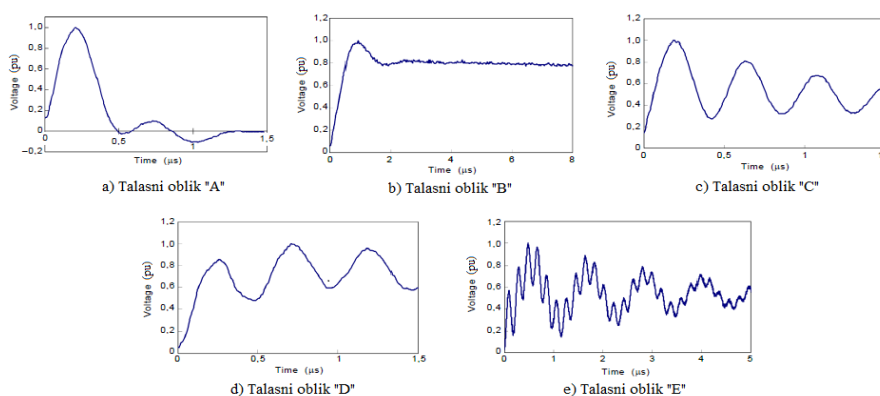
U poglavlju 2 ovog rada predstavljene su različite metode za procenu uticaja prenapona, koji ne odgovaraju standardnim oblicima, na izolaciju opreme. Pogodan način za uvažavanje uticaja proizvoljnih prenaponskih talasa na izolaciju opreme je analiza u frekventnom domenu, koja je opisana u poglavlju 3 rada. U okviru ovog poglavlja, u programskom alatu za proračun tranzijentnih procesa (ATP/EMTP) formiran je model transformatorske stanice 220/110 kV sa pripadajućim nadzemnim vodovima, za potrebe analize atmosferskih prenapona. Simulacije su sprovedene sa ciljem da se odrede realni reprezentativni prenaponi, kojima može biti izložen energetski transformator pri pojavi atmosferskog pražnjenja u nadzemni vod u blizini transformatorske stanice. Na tako dobijenim nestandardnim talasnim oblicima prenapona, demonstriran je postupak analize u frekventnom domenu.

2. Metode za procenu uticaja nestandardnih talasnih oblika prenapona na naprezanje izolacije opreme

U literaturi se mogu sresti brojni pokušaji procene uticaja nestandardnih talasnih oblika napona na naprezanje izolacije. U ovom poglavlju opisane su neke od najčešćih metoda koje se odnose pre svega na impulsne prenapone:

- *Metod konverzije nestandardnog u standardni oblik prenapon*

U postupku koordinacije izolacije reprezentativni prenapon dobijen merenjima, simulacijama ili na neki drugi način bi trebalo da odgovara standardnom talasnom obliku za posmatranu klasu prenapona, što u praksi nije slučaj. Zbog toga su istraživanja usmerena za iznalaženje rešenja.



Slika 2.1 Nestandardni talasni oblici prenapona [2]

Na osnovu brojnih eksperimentalnih istraživanja određeno pet tipičnih nestandardnih talasnih oblika impulsnih prenapona, prikazanih na slici 2.1, sa ciljem da se među njih svrstaju različiti prenaponi koji se javljaju u praktičnim uslovima [2,4,5].

Analiziranjem uticaj navedenih nestandardnih oblika prenapona na dielektrične karakteristike izolacije transformatora [4] i GIS-a [5] određeni su analitički izrazi za faktore konverzije, koji predstavljaju odnos amplitude ekvivalentnog naponskog talasa standardnog oblika i posmatranog prenapona. Predložena metoda je razmatrana i od strane CIGRE radnih grupa, a postupak konverzije je dat u tehničkim brošurama [6], [7] i [8].

- *Metoda ekvivalentne energije (Energy Method)*

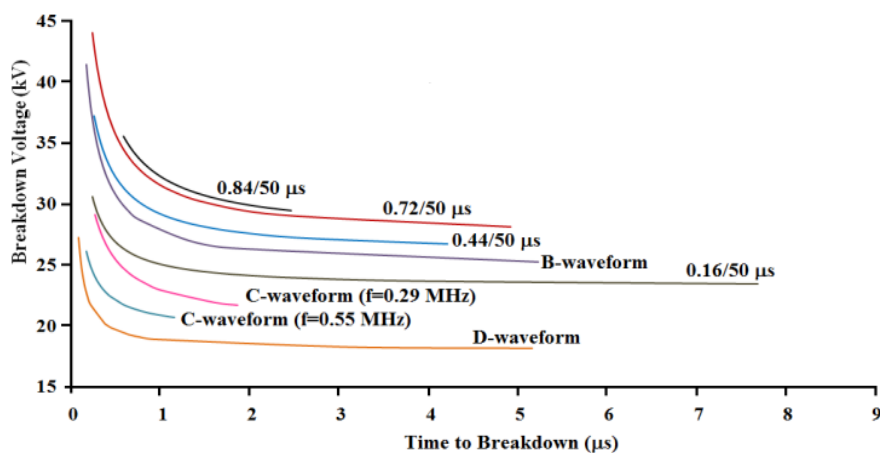
Nestandardni prenapon se može transformisati u odgovarajući standardni talasni oblik prenapona (*Time Domain Waveform Conversion*) ukoliko je njihov efekat na naponska naprezanja izolacije isti [8]. Prema metodi datoj u [9] nestandardni prenapon se ekvivalentira standardnim talasom, predstavljenim dvostrukom eksponencijalnom funkcijom, uz uslov da njihova energija ostane ista, što se može predstaviti izrazom:

$$W_{stand.} = W_{nestand.} \rightarrow \int_0^{t_a} [A(e^{-at} - e^{-bt})]^2 dt = \int_0^{t_a} [u(t)]^2 dt \quad (2.1)$$

Metoda je bazirana na činjenici da energija prenapona ima značajnu ulogu u procesu proboja izolacije, odnosno da je fenomen dielektričnog proboja usko povezan sa progresivnom destrukcijom dielektrične sredine nosiocima naelektrisanja (elektroni ili joni) koji su stekli dovoljnu energiju od električnog polja kome je izolacija izložena. Zbog toga se pretpostavlja da će, ukoliko energije impulsa ostanu jednake, efekat ekvivalentnog standardnog impulsa na električna naprezanja izolacije biti isti kao originalnog nestandardnog prenapona.

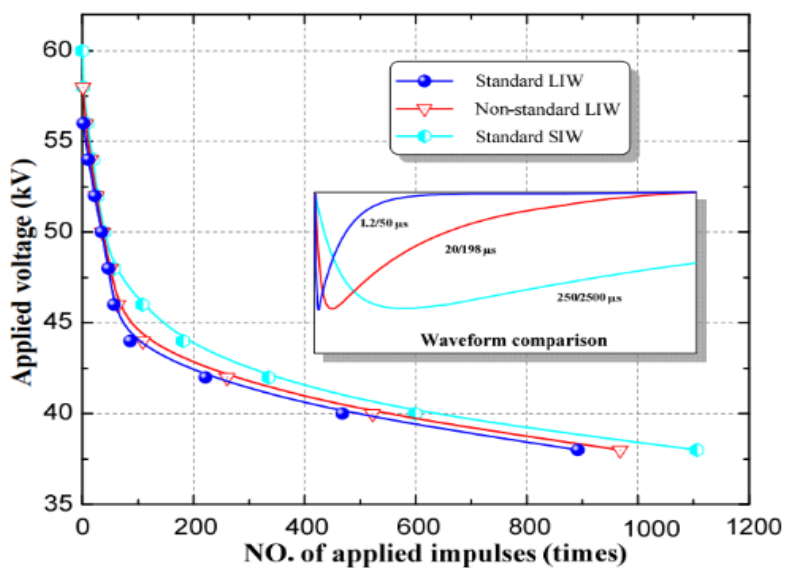
- *V-t karakteristika izolacije*

Dielektrična čvrstoća izolacije, pod uticajem impulsnih prenapona, može se predstaviti takozvanom *v-t* krivom, koja predstavlja zavisnost probojnog napona u funkciji vremena do proboja. Generalno, *v-t* kriva važi samo za jedan talasni oblik prenapona i njome se ne mogu direktno uvažiti proizvoljni nestandardni oblici prenapona koji se javljaju u praksi. Međutim sproveden je veliki broj eksperimentalnih istraživanja, gde je analiziran uticaj tipičnih nestandardnih oblika (slika 2.1) na različite tipove izolacije: papir impregniran uljem [10], GIS [11], izolacija transformatora [12], itd. Na osnovu rezultata istraživanja dobijene su *v-t* karakteristike izolacije za različite nestandardne talasne oblike, kao što je ilustrovano na slici 2.2.



Slika 2.2 v-t karakteristika izolacije transformatora [12]

Takođe, veoma su korisne i dobijanje v-n krive, date na slici 2.3, gde je osim nestandardnog oblika prenapona analiziran i uticaj broja uzastopno primenjenih naponskih impulsa, koje mogu poslužiti za procenu dugoročnih performansi izolacije.



Slika 2.3 v-n karakteristika izolacije transformatora [13]

- *Metoda integracije – metoda destruktivnog efekta*

Metoda integracije se veoma dugo koristi za procenu probojnih karakteristika različitih tipova izolacije usled izloženosti impulsnim prenaponima nestandardnih talasnih oblika [12]. Na osnovu praktičnog iskustva prepoznato je da razvoj procesa koji dovodi do proboja izolacije, tzv. destruktivni efekat (*Disruptive Effect - DE*), zavisi ne samo od amplitude napona koji napreže izolaciju, nego i od vremena izloženosti izolacije tom naponu, što se u opštem slučaju može predstaviti izrazom [12]:

$$DE = \int_{t_0}^t (u(t) - U_0)^n dt \quad (2.2)$$

gde je $u(t)$ napon koji napreže izolaciju, t_0 prvi trenutak u kome je $u(t) > U_0$, U_0 i n koeficijenti.

Prema ovoj metodi smatra se da postoji minimalni nivo napona U_0 koji se mora prekoračiti pre nego što počne proces proboja. U pitanju je univerzalna metoda za predviđanje jačine izolacije pod uticajem nestandardnih impulsnih napona koji je primenljiv za sve izolacione medijume. Pretpostavlja se da za svaku konfiguraciju izolacije postoji optimalni set parametara DE^* , U_0 i n koji su dovoljni za definisanje njenih probojnih karakteristika. DE^* je kritična vrednosti destruktivnog efekta, pri kojoj dolazi do proboja. Osnovni poteškoće u primeni ove metode su vezane za određivanje navedenih konstanti.

Sve prethodno navedene metode, se baziraju na analizi prenaponskog talasa u vremenskom domenu. Nasuprot tome, primenjuje se i metoda koja na bazi spektra naponskog talasa u frekventnom domenu procenjuju probojne karakteristike izolacije. Ovaj pristup je demonstriran u sledećem poglavlju.

3. Analiza u frekventnom domenu

Prvi pokušaji analize prenapona, kojima su izloženi energetski transformatori, u frekventnom domenu sprovedena je 1988 [15]. Predložena metoda je u cilju sistemske klasifikacije naponskih naprezanja izolacije transformatora koristila Furijeovu transformaciju za poređenje amplitudskog spektra posmatranog prenapona sa spektrom standardnog podnosivog napona izolacije.

Pod uslovom da se pravilno koristi, analiza u frekventnom domenu je veoma dragocen alat i može pružiti dodatne informacije koje se ne mogu uočiti posmatranjem oblika prenapona u vremenskom domenu. Poznavanjem harmonijskog spektra prenapona i rezonantnih tačaka energetskog transformatora, mogu se predvideti i izbeći potencijalno opasne situacije.

Osim analize amplitudskog spektra talasa, za analizu u frekventnom domenu može se koristiti i spektralna gustina energije prenapona [16]. Prema Parsevalovoj teoremi, energija vremenskog signala napona $f(t)$ se može dobiti iz energije njegovih frekvencijskih komponenti [17]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (3.1)$$

Kako vrednost integrala u jednačini (3.1) predstavlja energiju signala, podintegralna funkcija predstavlja spektralnu gustinu energije *ESD* (*Energy Spectral Density*) naponskog talasa $f(t)$. Prema tome *ESD* je unutar frekventnog spektra definisana kao kvadrat Furijeove transformacije naponskog signala:

$$ESD(\omega) = |F(\omega)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \right|^2 \quad (3.2)$$

Spektralna gustina energije signala predstavlja energiju po jedinici frekvencije a za naponski signal se izražava u $\frac{V^2s}{Hz}$ odnosno $(Vs)^2$.

Sposobnost izolacije da podnese prenapon proverava se poređenjem spektralne gustine energije posmatranog prenapona ($|F(\omega)_{prenapon}|^2$) i spektralne gustine energije podnosivih napona izolacije ($|F(\omega)_{pod.napon}|^2$). Zbog toga, da bi se kvantifikovao nivo prenapona prema podnosivom naponu uvodi se faktor (FDSF - *Frequency Domain Severity Factor*) [8,16]:

$$FDSF(\omega) = \frac{|F(\omega)_{prenapon}|^2}{|F(\omega)_{pod.napon}|^2} \quad (3.3)$$

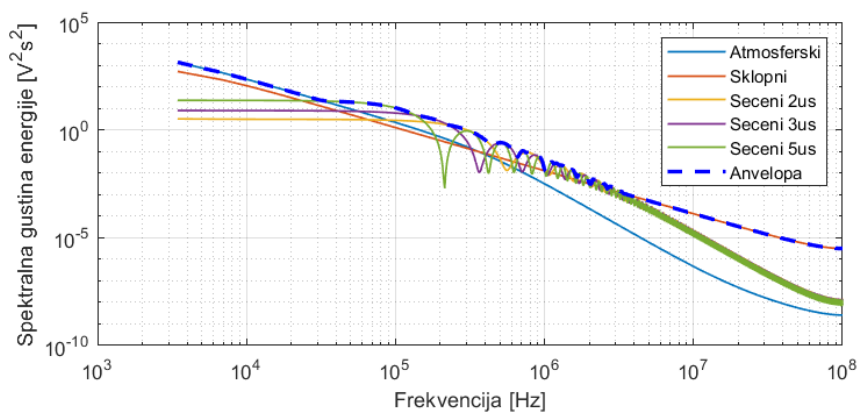
Prethodno opisani postupak analize prenapona sproveden je na konkretnom primeru realne transformatorske stanice, gde je razmatrana mogućnost ugrožavanja izolacije energetskog transformatora 220/110 kV pri pojavi atmosferskih pražnjenja na napojnim vodovima 220 kV. Kako se radi o neobnovljivoj izolaciji primenjen je deterministički metod koordinacije izolacije, koji podrazumeva proračun atmosferskih prenapona pod najnepovoljnijim uslovima sa velikim amplitudama struje groma koje mogu biti prevaziđene sa malom verovatnoćom, najkritičnijim uklopnim stanjima i mestom udara groma. Proračun je sproveden u programskom alatu ATP/EMTP, a način modelovanja pojedinih komponenti simulacionog modela, koje imaju najveći uticaj na dobijene rezultate, pregledno je dat u tabeli 1.

Tabela 1. Primenjeni principi modelovanja

Komponenta	Način modelovanja
Nadzemni vod	Svaki raspon voda i provodnici u postrojenju predstavljeni frekventno zavisnim višefaznim modelom voda, sa raspodeljenim parametrima (<i>JMarti model</i>).
Čelično rešetkasti stubovi voda	Modelovani kao kratki vodovi sa raspodeljenim parametrima, frekventno nezavisni. Pretpostavljena brzina prostiranja talasa od 85% brzine svetlosti.
Stubni uzemljivač	Modelovan konstantnim otpornikom $R=10\Omega$.
Izolator voda	Za modelovanje preskoka na izolatoru primenjena metoda progresivnog lidera (<i>CIGRE LDM model</i>).
Atmosfersko pražnjenje	Modelovano idealnim strujnim (<i>Heidler</i>) uvažavajući karakterističnu impedansu kanala groma ($R_g=1000\Omega$).
Odvodnici prenapona	Odvodnici su predstavljeni dinamičkim, frekventno zavisnim modelom (<i>IEEE model</i>).
Transformator	Konvencionalni model transformatora sa dodatim kapacitetima namotaja.

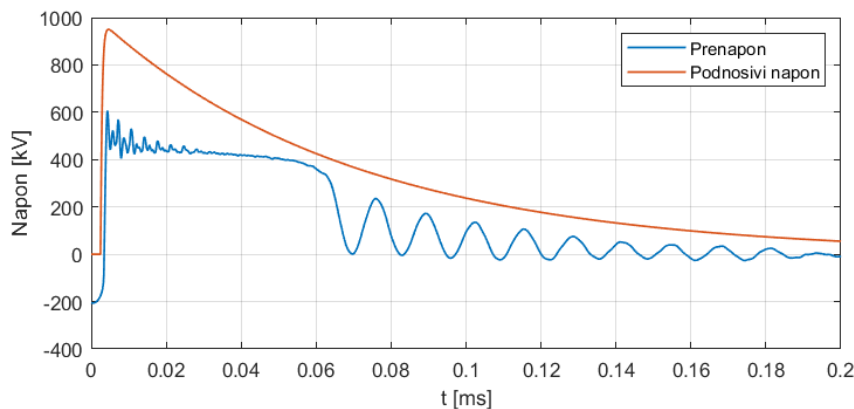
Standardni podnosivi naponi izolacije analiziranog transformatora iznose: 950 kV za atmosferski talas oblika 1.2/50 μ s, 780 kV za sklopni talas oblika 100/1000 μ s, 1045 kV za sečeni talas. Sva tri talasa su u vremenskom domenu predstavljena dvostrukom eksponencijalnom funkcijom, nakon čega je prema izrazu (3.2) određen njihov frekvencijski spektar.

Na slici 3.1 prikazana je spektralna gustina energije svih podnosivih napona izolacije transformatora. Kod sečenog talasa prikazane su tri krive, za slučaj sečenja nakon 2 μ s, 3 μ s i 5 μ s. Isprekidanom linijom predstavljena je zajednička anvelopa frekvencijskog spektra, kojom su obuhvaćeni svi podnosivi naponi.



Slika 3.1 Frekvencijski spektar podnosivih napona izolacije transformatora.

Na formiranom simulacionom modelu sprovedena je sistematska analiza sa ciljem da se odredi najkritičnije mesto udara groma u stub/zaštitno uže. Na slici 3.2 prikazan je talasni oblik prenapona na transformatoru za dobijeni najkritičniji slučaj: udar groma u drugi stub do postrojenja (struja groma 200 kA). Prikazani talasni oblik napona praktično u potpunosti odgovara obliku preostalog napona odvodnika, sa pojavom visokofrekventnih oscilacija na samom čelu talasa koje nastaju kao posledica pojave refleksija na vezama odvodnik – priključak transformatora. Takođe, na slici 3.2 prikazan je i standardni podnosivi atmosferski napon transformatora (predstavljen dvostrukom eksponencijalnom funkcijom).



Slika 3.2. Prenapon na priključcima transformatora i njegov podnosivi napon.

Klasičnim postupkom koordinacije izolacije, koji se najčešće primenjuje u praksi, provera sposobnosti podnošenja prenapona kome je izložena izolacija transformatora se sprovodi poređenjem amplitude prenapona (U_{max}) sa amplitudom podnosivog atmosferskog (U_{pod}) napona izolacije:

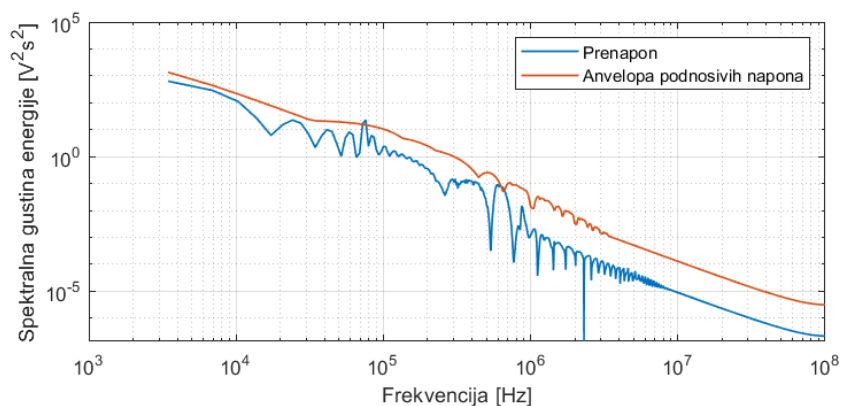
$$\frac{U_{pod}}{U_{max}} = \frac{950 \text{ kV}}{605.6 \text{ kV}} = 1.57 \rightarrow \text{sigurnosna margina} = 57\%$$

Poređenjem amplituda napona zaključuje se da ne dolazi do ugrožavanja izolacije transformatora, uz jako veliku sigurnosnu marginu od 57%. Minimalne preporučene vrednosti sigurnosnih margina su 15% [2].

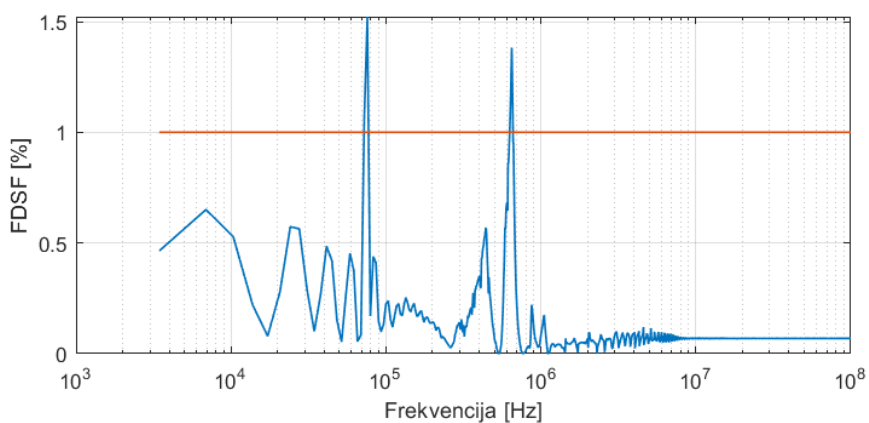
Sa slike 3.2 se može uočiti da standardni podnosivi atmosferski napon, svojim talasnim oblikom, značajno odstupa od prenapona dobijenog simulacijama, pre svega u začelju koje kod prenapona znatno sporije opada. Prema tome, ne može se očekivati da se samo poređenjem amplituda ovih napona može doći do validnih zaključaka. Zbog toga je prema izrazu (3.2) određena spektralna gustina energije prenapona, koja je prikazana na slici 3.3 uporedo sa spektrom podnosivih napona izolacije.

Analiza u frekventnom domenu daje daleko kritičnije rezultate, odnosno pokazuje da posmatrani prenapon može dovesti do ugrožavanja izolacije transformatora.

Da bi se jasnije uvideo stepen ugrožavanja izolacije, izračunat je odnos prenapona i podnosivog napona izolacije, prema izrazu (3.3) takozvani FDSF, koji je prikazan na slici 3.4. Mogu se uočiti dve kritične frekvencije: 75 kHz i 648 kHz, na kojima je faktor sigurnosti veći od 1, odnosno na kojima su energije prenapona veće od energija podnosivih napona izolacije.



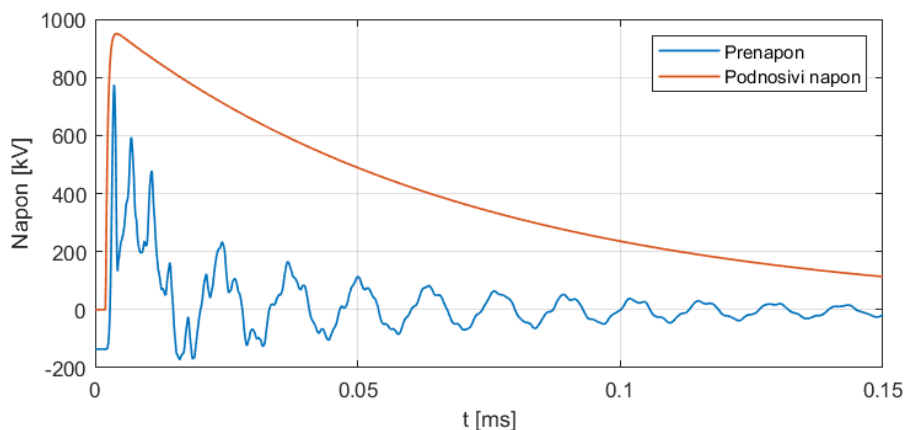
Slika 3.3. Frekventni spektar prenapona i podnosivih napona izolacije.



Slika 3.4. Faktor sigurnosti u frekventnom domenu.

Osim atmosferskih pražnjenja i zaštitnu užad i stubove nadzemnog voda, simulirana su i atmosferska pražnjenja direktno u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta. Primenom elektro-geometrijskog modela (EGM) određena je maksimalna struja koja može da prodre mimo zaštitnog užeta i ona prema CIGRE EGM iznosi 15 kA.

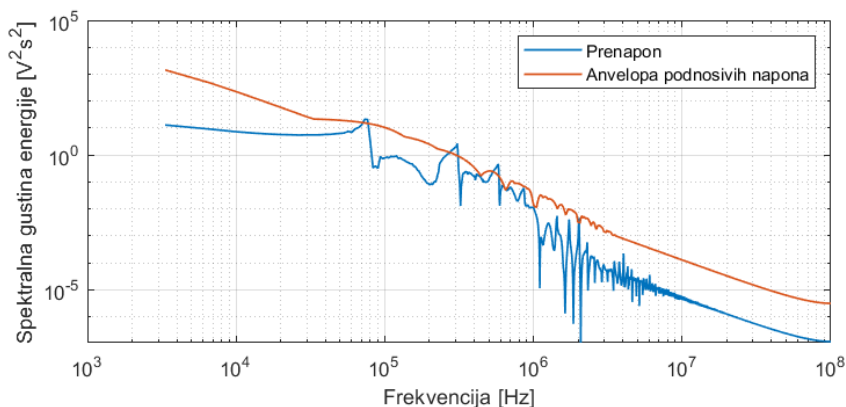
Na slici 3.5 prikazan je talasni oblik prenapona na priključcima transformatora pri udaru groma direktno u fazni provodnik nadzemnog voda, mimo zaštitnog užeta (na mestu drugog stuba do postrojenja). Može se uočiti da se talasni oblici prenapona na transformatoru pri udaru groma direktno u fazni provodnik i pri udaru u zaštitno uže/stub (slika 3.2) značajno razlikuju. U obliku prenapona sa slike 3.5 veoma su izražene refleksije talasa koje se javljaju nakon povratnog preskoka sa faznog provodnika na stub.



Slika 3.5. Prenapon na priključcima transformatora pri atmosferskom pražnjenju direktno u fazni provodnik i podnosivi napon transformatora.

Takođe, u ovom slučaju odstupanje talasnog oblika prenapona od standardnog podnosivog atmosferskog napona izolacije je još izraženiji. Amplitudskim poređenjem ova dva talasa ($U_{pod}/U_{max} = 1.23$) zaključuje se da nema ugrožavanja izolacije namotaja – sigurnosna margina (23%) je veća od zahtevanih 15%.

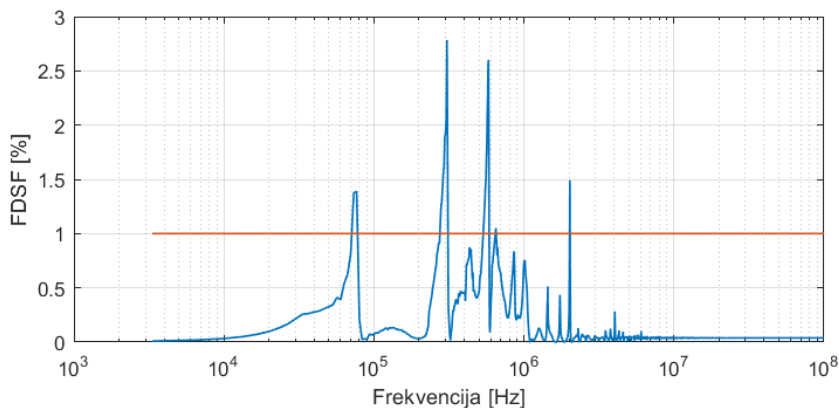
Međutim, ukoliko se analiza sprovede u frekventnom domenu dolazi se do drugačijih zaključaka. Na slici 3.6, uporedo je prikazana spektralna gustina energije prenapona i podnosivih napona izolacije transformatora.



Slika 3.6. Frekvencijski spektar prenapona i podnosivih napona izolacije

Prema slici 3.6 prenapon kome je izložena izolacija transformatora može dovesti do njenog proboja.

Da bi se jasnije uvideo stepen ugrožavanja izolacije, izračunat je odnos prenapona i podnosivog napona izolacije, prema izrazu (3.3), koji je prikazan na slici 3.7. Može se uočiti više kritičnih frekvencija: 76 kHz, 306 kHz, 580 kHz, 2023 kHz, na kojima je faktor sigurnosti veći od 1, odnosno na kojima su energija prenapona veća od energija podnosivih napona izolacije.



Slika 3.7. Faktor sigurnosti u frekventnom domenu

4. Zaključak

Rezultati simulacija dati u ovom radu, kao i rezultati brojnih merenja koji se mogu naći u literaturi, pokazuju da naponska naprezanja izolacije

elektroenergetske oprema nisu adekvatno "pokrivena" standardnim ispitnim naponima. Drugim rečima, prenaponi kojima je izložena oprema u pogonu značajno odstupaju po talasnom obliku od standardnih podnosivih napona koji se definišu za datu opremu. U radu je dat pregled metoda koje se najčešće koriste za procenu ponašanja izolacije izložene nestandardnim prenaponima.

Pažnja je posvećena pre svega analizi u frekventnom domenu koja podrazumeva procenu karakteristika izolacije sa stanovišta energetske spektralne gustine prenapona kome je oprema izložena. Metoda je primenjena na primeru konkretnog energetskog transformatora, za koji su simulacijama određena naponska naprezanja kojima može biti izložen prilikom pojave atmosferskih pražnjenja. Rezultati proračuna pokazuju da iako je amplituda prenapona niža od podnosivog napona izolacije transformatora uz odgovarajuću sigurnosnu marginu (zadovoljen uslov klasičnog pristupa koordinaciji izolacije), analiza spektra naponskog talasa u frekventnom domenu ukazuje da ipak može doći do ugrožavanja izolacije.

Prema tome, može se zaključiti da u studijama koordinacije izolacije koje se najčešće sprovode još u fazi planiranja i projektovanja transformatorskih stanica i postrojenja, prilikom određivanja potrebnog nivoa podnosivih napona izolacije treba uzeti u obzir ne samo maksimalne vrednosti (amplitude) prenapona već i njihov frekvencijski spektar, upoređujući ih sa spektrom standardnih podnosivih impulsnih prenapona (FDSF proračun). U slučaju da je FDSF veći od jedan, potrebno je predložiti povećanje izolacionog nivoa opreme ili primeniti neku od mera za smanjenje prenapona (ugradnja dodatnih odvodnika prenapona, itd.).

Literatura

- [1]. *Insulation co-ordination - Part 1: "Definitions, principles and rules*, IEC 60071-1 ", 2011.
- [2]. *Insulation co-ordination - Part 2: "Application guidelines* , IEC 60071-2, 2018.
- [3]. U. R. R. Massaro, R. Antunes, "Electrical Transient Interaction between Transformers and Power System – Brazilian Experience", *International Conference on Power Systems Transients (IPST2009)*, Kyoto-Japan, June 2009.
- [4]. S. Okabe, J. Takami, "Evaluation of Breakdown Characteristics of Oil-immersed Transformers under Non-standard Lightning Impulse Waveforms – Method for Converting Non-standard Lightning Impulse Waveforms into Standard Lightning Impulse Waveforms –", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, Vol.15, No.5, p.1288-1296, 2008.

- [5]. S. Okabe, S. Yuasa, S. Kaneko, G. Ueta, "Evaluation of Breakdown Characteristics of Gas Insulated Switchgears for Non-standard Lightning Impulse Waveforms – Method for Converting Non-standard Lightning Impulse Waveforms into Standard Lightning Impulse Waveforms –", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol.16, No.1, p.42-51, 2009.
- [6]. CIGRE WG C4.302, "Insulation Co-ordination Related to Internal Insulation of Gas Insulated System in SF6 and N2/SF6 Mixtures under AC Conditions", CIGRE technical brochure No. 360, 2008.
- [7]. CIGRE WG C4.306, "Insulation Coordination for UHV AC Systems", CIGRE technical brochure No.542, 2013.
- [8]. CIGRE JWG A2/C4.39, "Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System", CIGRE technical brochure No.577, 2014.
- [9]. W. Sima, X. Lan, Q. Yang, and T. Yuan, "Statistical analysis on measured lightning overvoltage surges in a 110 kV air-insulated substation," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 28–36, 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0235>
- [10]. G. Krithika, S. Usa, "Volt-Time Characteristics of OIP Under Non-Standard Impulses", *International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, 2013.
- [11]. S. Okabe, M. Koto, T. Kawashima, T. Ishikawa and T. Yamagiwa, "Insulation characteristics of GIS for non-standard lightning surge waveforms. II. Gas gaps and spacer surface," 1999 *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, pp. 163-166 vol.3, 1999.
- [12]. S.P.Balaji, G.Krithika, S.Usa, "Prediction od v-t characteristics of transformer insulation", *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [13]. P. Sun, W. Sima, M. Yang, X. Lan and J. Wu, "Study on voltage-number characteristics of transformer insulation under transformer invading non-standard lightning impulses," in *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol. 22, no. 6, pp. 3582-3591, December 2015.
- [14]. M. Darveniza, A. E. Vlastos, "Generalised breakdown models and the integration method for predicting non-standard waveshape impulse strengths," *Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 284-287 vol.1, 1988.
- [15]. R. Malewski, J. Douville, L. Lavallée, "Measurement of switching transients in 735-kV substations and assessment of their severity for transformer insulation", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 3, no. 4, October 1988.
- [16]. JWG A2/C4-03, "Interaction between Transformers and the Power System with focus in high frequency electromagnetic transients", Brazilian Working Group, Cigre-Brazil, 2005.
- [17]. Xose M. Lopez-Fernandez, Casimiro Alvarez-Marino, "Frequency Domain Severity Factor (FDSF) - Transient Voltage Performance -Transformer Outside/Inside", Advanced Research Workshop on Transformers, 2010, Spain

Abstract: During its operation, electrical equipment is constantly exposed to overvoltages of various waveforms, such as lightning discharges, switching operations, faults, etc. Therefore, adequate selection of overvoltage protection and equipment insulation withstand

voltages are key factors in increasing system reliability. In general, insulation coordination is carried out by analyzing the insulation behavior for standard impulse and switching overvoltage waveforms. However, overvoltages that occur in operating conditions can significantly deviate from the standard waveforms of insulation withstand voltages, in terms of the front time, the duration of the wave, the existence of high-frequency components as result of reflections in the facility and other factors. This paper presents possible methods of assessing the behavior of equipment insulation for real voltage waves to which the insulation is exposed during exploitation and which deviate from standard waveforms, by analysis in the frequency domain. As there are different components in the overvoltage signal at different frequencies, which a different energy, the main goal of this paper is to analyze the insulation characteristics of a specific transformer from the point of view of the energy spectral density of the voltage wave that occurs at its terminals when an atmospheric discharge occurs. The analysis is based on the determination of the safety margin on the entire frequency spectrum of the overvoltage wave, that is, on the calculation of the so-called FDSF (Frequency Domain Severity Factor). The calculation results show that although the overvoltage amplitude is lower than the withstand voltage of the transformer insulation with an appropriate safety margin (the condition of the classic approach to insulation coordination is satisfied), the spectrum analysis of the voltage wave in the frequency domain shows that the insulation may still be compromised.

Keywords: insulation coordination, ATP/EMTP, overvoltages, FDSF, Fourier transform, frequency domain

Insulation Stresses of Power Equipment Exposed to Non-standard Overvoltage Waveforms

Ranko Jasika, Jovan Mrvić, Stefan Obradović

Rad primljen u uredništvo: 28.11.2022. godine.

Rad prihvaćen: 05.12.2022. godine.

