

Uticaj sinergije neutronskog i gama zračenja i funkcionalnog starenja na efikasnost hibridnog zaštitnog kola

Alija R. Jusić , Dušan P. Nikezić, Član ETRAN, Milić M. Pejović, Uzahir R. Ramadani, član ETRAN

Apstrakt—Usled manje komercijalnih filtera i nelinearnih komponenti za zaštitu od prenapona u uslovima sinergije neutronskog i gama zračenja i funkcionalnog starenja ispitano je ponašanje hibridnog zaštitnog kola pod istim uslovima. Da bi eksperimentalni postupak bio u skladu sa realnim okolnostima, opterećenje hibridnog kola nije bilo prilagođeno po impedansi. Uobičajeni model hibridnog zaštitnog kola preporučen u skladu sa IEC 1.3 simuliran je pomoću programskog paketa PSPICE. U tom cilju je nužno kreirati varistor odgovarajućim elementima. Zaključeno je da su parametri ekvivalentne induktivnosti stabilni u odnosu na uslove eksperimenta. Takođe je ustanovljeno da usled dejstva sinergije neutronskog i gama zračenja i funkcionalnog starenja dolazi do promene strmine karakteristike varistora i tangensa ugla gubitaka u kondenzatorima. Ukupni efekat dejstva neutronskog i gama zračenja i funkcionalnog starenja je ispitana na hibridnom kolu i na komponentama pojedinačno. Eksperimenti su vršeni pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima kombinovana merna nesigurnost eksperimentalnog postupka nije prelazila 5%.

Ključne reči: Dejstvo neutronskog i gama zračenja na zaštitu od prenapona, filterska zaštita od prenapona, hibridna kola za zaštitu od prenapona.

I. UVOD

Elementi prenaponske zaštite mogu se podeliti na nelinearne i linearne. U nelinearne elemente prenaponske zaštite spadaju različite vrste zaštitnih odvodnika kao što su gasni prenaponski odvodnici, varistori i prenaponske diode. U linearne elemente prenaponske zaštite spadaju različite vrste filtera. U praksi se često koristi kombinacija ovih elemenata. To iz razloga što većina komercijalnih filtera nije predviđena za korišćenje kao zaštita od smetnji koje dostižu više hiljada volti. Osim toga vrlo je teško obezbediti potreban nivo zaštite uz upotrebu samog filtera. Zaštitni odvodnici sami za sebe, imaju nekih nedostataka u slučaju kada je potrebno garantovati zaštitu posebno osetljivih poluprovodničkih elektronskih komponenti. To je razlog primene kombinovane (hibridne) zaštite u kompenzaciji nedostataka linearnih i nelinearnih zaštitnih elemenata [1-10].

II. KARAKTERISTIKE ELEMENATA PRENAPONSKE ZAŠTITE

Osnovne osobine realnih elemenata prenaponske zaštite su sledeće:

1. Prag reagovanja realnog nelinearnog elementa prenaponske zaštite je postepen. To znači da nelinearni elementi prenaponske zaštite imaju konačnu vrednost koeficijenta nelinearnosti a . Ovaj koeficijent se u opštem slučaju definiše kao $a = \log(I_2/I_1)/\log(U_2/U_1)$, gde su U_1 , I_1 odnosno U_2 , I_2 koordinate tačaka sa volt-amperске krive. Realni nelinearni elementi prenaponske zaštite odlikuju se inercijalnošću, odnosno vremenom potrebnim da element odreaguje (kada napon tranzijentnog talasa dostigne vrednost reagovanja elementa). Činjenica da se propusni opseg realnih električnih filtera ne može učiniti beskonačno malim utiče na to da deo frekventnog spektra tranzijenta prolazi kroz filter [11-14].
2. Vrednost napona u štićenoj tački uređaja u manjoj ili većoj meri zavisi od struje koja prolazi kroz nelinearni zaštitni element [15, 16].
3. Mogućnost apsorbovanja energije realnih nelinearnih elemenata za zaštitu od prenapona je ograničena. U slučaju električnih filtera deo energije se reflektuje nazad u kolo, dok je mogućnost apsorbovanja dela energije u aktivnim otpornostima filtera takođe ograničena [17-19].
4. Nelinearni elementi prenaponske zaštite kao i električni filteri pokazuju svojstva starenja odnosno promenu karakteristika u funkciji broja aktiviranja, vršne vrednosti struje koje provode kao i dužine trajanja tranzijenta. Promena karakteristika ovih elemenata uočava se i u uslovima promene temperature ambijenta i zračenja [20-24].
5. Uticaj nekih elemenata prenaponske zaštite na normalan rad uređaja, u vreme odsustva prenaponske pojave, ne može se zanemariti što može voditi pogoršanju karakteristika uređaja [25].

Cilj rada je da se realnim eksperimentom i numeričkim postupkom ispitati uticaj broja aktiviranja (prethodnih prorada) i neutronskog i gama zračenja na stabilnost relevantnih

Alija Jusić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, BiH .

Dušan Nikezić, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija (e-mail: dusan@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-8885-2683>)

Milić M. Pejović, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, Republika Srbija

Uzahir Ramadani, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija (e-mail: uzahir@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-3702-0094>).

karakteristika hibridnog zaštitnog kola izrađenog prema predlogu standarda IEC 77.C.1.3 [26].

U cilju dobijanja rezultata maksimalne verodostojnosti upotrebljivani su visokokvalitetni izvori napajanja i merni instrumenti. Ceo postupak je vršen pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima i bio je potpuno automatizovan. Kombinovana merna nesigurnost mernog postupka bila je manja od 7% [27-30].

III. EKSPERIMENT

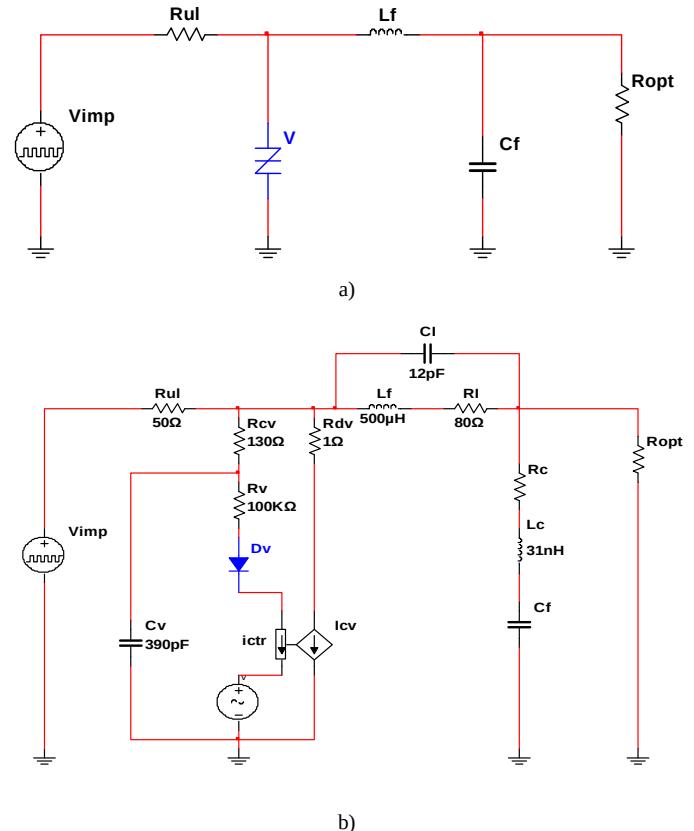
Kao što je već rečeno nelinearni zaštitni elementi često se koriste zajedno sa filterima. Naime, većina komercijalnih filtera ne može da podnese veliki broj prenapona bez većih promena karakteristika. To se, uglavnom, odnosi na kondenzatore kao elemente filtera. Takođe, dielektrički kondenzator je osjetljiv na efekte neutronskog i gama zračenja. Sa druge strane, teško je obezbediti efikasnu zaštitu u slučaju primene samo nelinearnog zaštitnog elementa, pošto pikovi koji prođu kroz takvu zaštitu mogu imati dovoljno energije za direktno uništenje elektronske komponente ili dovoljan naponski nivo za njeno posredno uništenje. Tako može doći do poremećaja u radu štićenog uređaja. Iz ovih razloga često se upotrebljavaju hibridna zaštitna kola. Iz tog razloga potrebno je ispitati doprinos pojedinačnih komponenti prenaponske zaštite ukupnoj zaštitnoj karakteristici hibridnog zaštitnog kola. Iako postoji veliki broj najrazličitijih konceptacija hibridnih zaštitnih kola, principi njihovog rada su veoma slični. To znači da simulacija uticaja stabilnosti karakteristika elemenata prenaponske zaštite na jednom konkretnom modelu hibridnog sklopa daje korisne podatke za sve ostale tipove hibridnih sklopova. U ovom radu je korišćeno hibridno kolo izrađeno prema standardu IEC 77.C.1.3. Simulacija je obavljena programskim paketom PSPICE.

Na slici 1 data je idealizovana šema zaštitnog hibridnog kola korišćenog u radu. Kolo prikazano na slici 1 je bazirano na varistoru i L-filteru, kao i uprošćena šema ovog kola. Izvor prenapona (V_{imp}) je simuliran duploeksponencijalnim unipolarnim impulsom $1.2/50 \mu\text{s}$ čija je vršna vrednost iznosila 5 kV . Ulagana impedansa kola je bila standardna aktivne otpornosti 50Ω . Da bi analizirano kolo u što većoj meri odgovaralo realnoj situaciji opterećenje filtera nije bilo prilagođeno po impedansi. Kako korišćeni programski algoritam ne poseduje odgovarajući model varistora, izvršeno je njegovo kreiranje elementima R_{CV} , R_V , D_V , R_{DV} , V_{MN} , V_{MV} , V_{PV} i I_{UV} tako da je model odgovarao varistoru korišćenom u eksperimentu ($d=14 \text{ mm}$). Kolo $R_{CV}C_V$ određuje vremensku konstantu reagovanja varistora (C_V predstavlja sopstvenu varistora), parametar R_{DV} predstavlja dinamički otpor varistora, naponski generator V_{PV} određuje probojni napon varistora, a I_{UV} predstavlja strujno upravljeni strujni izvor (nulta elektromotorna sila V_{MV} predstavlja ampermetar upravljačke struje i_{UPV} izvora I_{UV}). Veza upravljačke struje i_{UPV} i struje izvora I_{UV} data je relacijom:

$$I_{UV} = k_i i_{UPV} \quad (1)$$

gde je k linearni koeficijent strujnog pojačanja čija je vrednost određena izrazom:

$$k = \frac{R_{CV} + R_v}{R_{DV}} \quad (2)$$



Slika 1: a) Idealizovana šema hibridnog zaštitnog kola; b) Uprošćena ekvivalentna šema hibridnog zaštićenog kola.

Ekvivalentna šema varistora u konkretnom slučaju je unipolarnog tipa pošto zbog prirode ispitnog impulsa nije bilo potrebe za uvođenjem bipolarnog modela. Potrebno je napomenuti da linearna aproksimacija (koeficijent k) volt-amperske karakteristike varistora daje zadovoljavajuće rezultate u opsegu struje od 1 mA pa do oko 200 A .

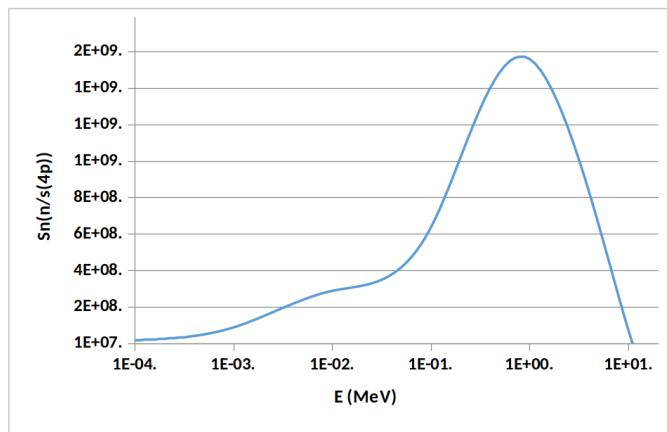
Uprošćena zamenska šema induktivnosti filtera je klasičnog tipa i postavljena je induktivnošću L_f , kapacitivnošću C_f koja predstavlja međunavojni parazitni kapacitet i rednom otpornošću R_e koja predstavlja ekvivalent čisto omskih gubitaka i gubitaka usled rasipanja. Sinteza ekvivalentne šeme induktivnosti obavljena je na osnovu [31] za komercijalnu prigušnicu od $500 \mu\text{H}$. Zamenska šema kondenzatora predstavljena otpornošću R_c , sopstvenom induktivnošću L_c i kapacitetom C_f koji je u ovom slučaju iznosio $0.2 \mu\text{F}$.

Ispitivanje uticaja stabilnosti elemenata prenaponske zaštite na izlazni napon R_{OPT} pod dejstvom prenaponskog impulsa na ulazu kola i dejstvom neutronskog i gama zračenja

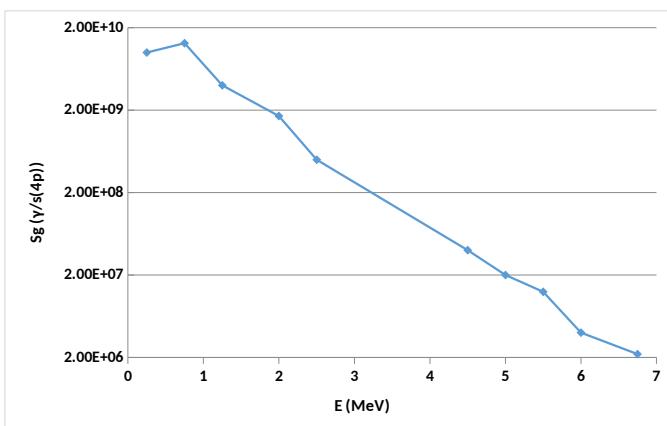
vršeno je pod prepostavkom da su parametri ekvivalentne induktivnosti (C_e , L_f , R_e) ostali stabilni u odnosu na početne uslove. Strmina varistora menjana je povećanjem dinamičkog otpora. Takođe, se menja i odgovarajuća vrednost probojnog napona, kapacitet kondenzatora i otpor gubitaka. Ove promene su određivane prema merenju sinergičkog dejstva neutronskog i gama zračenja i broja prethodnih impulsnih opterećenja [32-37].

Eksperimentalni postupak je vršen tako što su varistor i kondenzator opterećivani sa 1, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 i 1000 impulsa, nakon čega je snimana promena volt-amperске i volt-omske karakteristike varistora sa brojem opterećenja kao parametrom. Nakon toga su varistori ozračivani i ponovo snimane volt-amperске i volt-omske karakteristike varistora. Uočene izmene ekvivalentnih komponenata šeme varistora su preračunavane i ubacivane u program za simulaciju za procenu uticaja sinergije neutronskog i gama zračenja i broja prorada na zaštitne karakteristike hibridnog kola.

Tokom eksperimenta je korišćen varistor prečnika diska 14 mm, predviđen za trajno opterećenje naizmeničnim naponom. Korišćeni kondenzator je imao film dielektrik izrađen od polistrola, izolacione otpornosti 100 TΩ i vrednošću $\text{tg}\delta$ od 0.0015. Izvor neutronskog i gama zračenja je bio izotop kalifornijuma ^{252}Cf . Izvor je bio izrađen u obliku Cf_2O_3 kapsule. Masa mu je bila 2265 µg. Na slici 2 je prikazan neutronski spektar primenjivanog izvora. Na slici 3 je prikazan gama spektar primenjivanog izvora. Tabelom 1 su date vrednosti fluensa (neutronskog i gama zračenja zajedno) koje su deponovane tokom eksperimenta (N_f).



Slika 2: Neutronski spektar primenjivanog izvora.



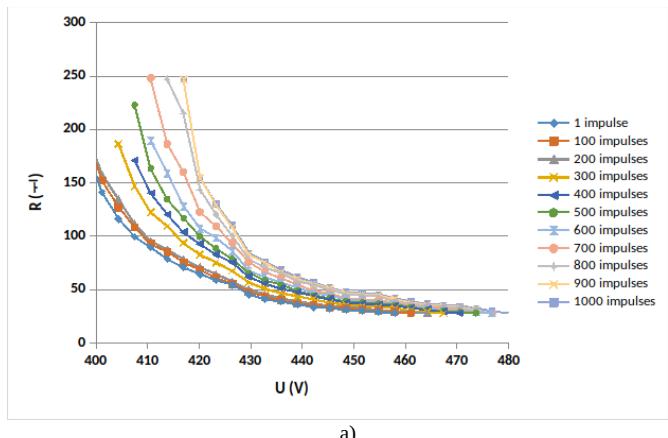
Slika 3: Gama spektar primenjivanog izvora.

Tabela 1: Vrednosti fluensa (neutronskog i gama zračenja zajedno) koje su deponovane tokom eksperimenta (N_f).

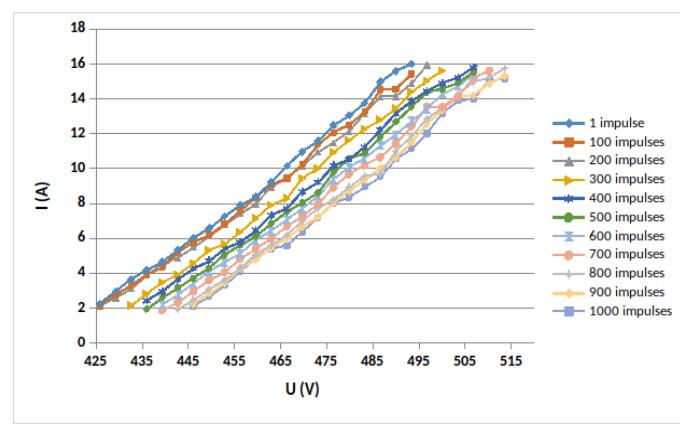
N_f	$F_n [\text{n/cm}^2]$	$F_\gamma [\text{γ/cm}^2]$
0	0	0
1	3.55	8.66
2	7.10	17.3
3	10.66	26

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

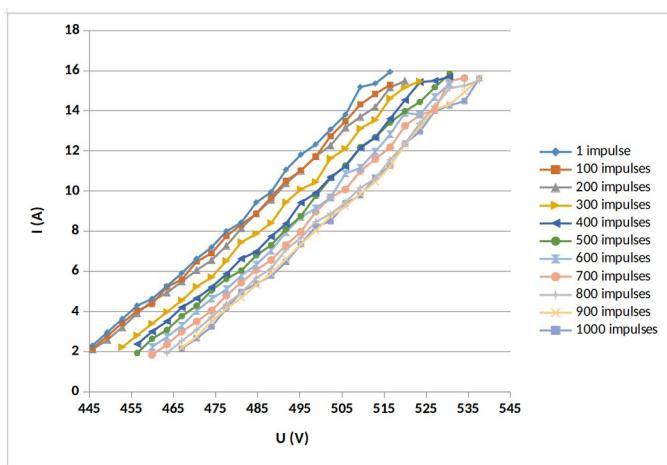
Na slici 4 su date promene volt-amperске karakteristike u zavisnosti od broja prorada (impulsa) i fluensa neutronskog i gama zračenja. Na slici 5 su date promene volt-omske karakteristike u zavisnosti od broja prorada (impulsa) i fluensa neutronskog i gama zračenja.



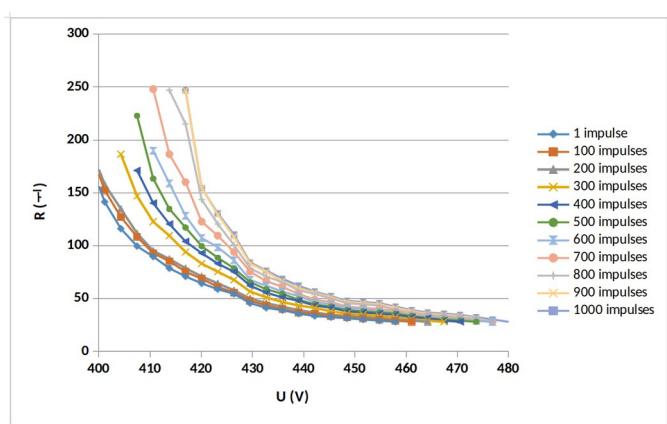
a)



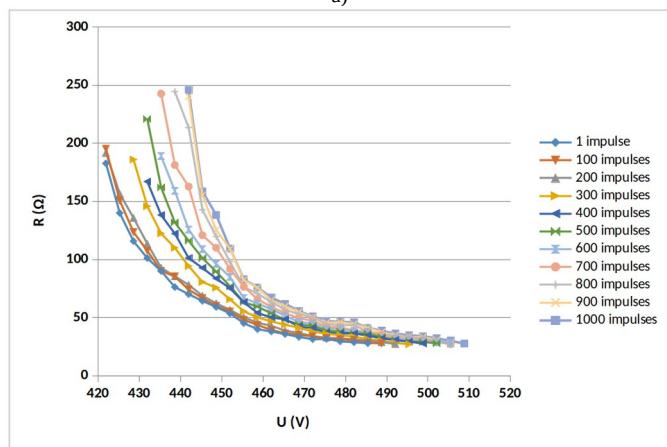
b)



Slika 4: Promene volt-amperске karakteristike u zavisnosti od broja prorada (impulsa) i fluensa neutronskog i gama zračenja.



a)

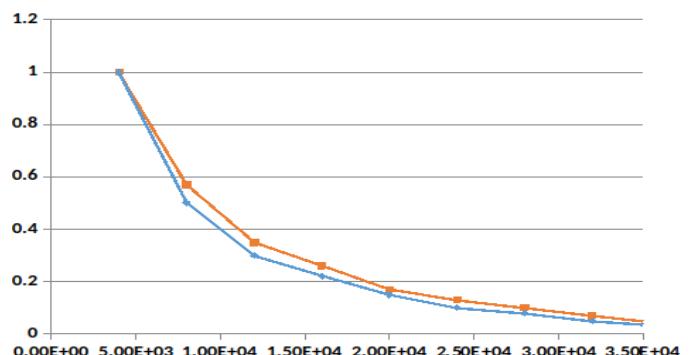


b)

Slika 5: Promene volt-omske karakteristike u zavisnosti od broja prorada (impulsa) i fluensa neutronskog i gama zračenja.

Na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem efekata dejstva neutronskog i gama zračenja i broja impulsa na varistorima i kondenzatorima, izračunati su efekti najgoreg slučaja na ekvivalentne komponente hibridnog zaštitnog kola.

Dobijeni su sledeći rezultati: 1- povećanje dinamičke otpornosti varistora sa 4.5Ω na 10Ω ; 2- smanjenje probognog napona varistora sa 388 V na 378 V; 3- smanjenje kapaciteta kondenzatora sa $0.2 \mu F$ na $0.14 \mu F$; 4- povećanje otpornosti kondenzatora sa 0.2Ω na 2.5Ω . Sa ovakvim promenama određen je numeričkom simulacijom uticaj najgoreg slučaja sinergije neutronskog i gama zračenja i broja impulsa na napon na varistoru, slika 5 i na normalizovani frekventni spektar na opterćenju, slika 6.



Slika 6: Promena normalizovanog frekventnog spektra pre delovanja i promene u najgorem slučaju.

Na slikama 5 i 6 prikazane su promene napona varistora i normalizovanog frekventnog spektra pre delovanja promena i promena u najgorem slučaju. Na slici 5 kriva 1 daje oblik napona na varistoru pre nastalih promena, kriva 2 daje oblik napona na kondenzatoru pre nastalih promena, kriva 3 daje oblik napona na varistoru posle nastalih promena najgoreg slučaja i kriva 4 daje oblik napona na kondenzatoru posle nastalih promena u najgorem slučaju. Sa krive 2 se može uočiti povećanje vrednosti preostalog napona na varistoru usled povećanja njegove dinamičke otpornosti koje je naročito vidljivo u oblasti većih napona i struja. Na izlazu filtera se takođe povećava vrednost napona koja je posledica povećanja napona na ulazu, ali i sadržaja viših harmonika (slika 6 daje normalizovani sadržaj harmonika u odnosu na 4 kHz) koji je prouzrokovao povećanjem gubitaka i smanjenjem kapaciteta kondenzatora. Obe pojave (povećanje napona i povećano prisustvo viših harmonika na izlazu) predstavljaju opasnost po štićeni sistem u smislu lakšeg prodiranja viših harmonika prenapona u njegova kola, čime se povećava mogućnost poremećaja ili kvara.

V. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja sinergije neutronskog i gama zračenja i broja impulsa na hibridno zaštitno kolo je pokazalo da je sinergija negativna. Naime, pokazuje se da promene na komponentama hibridnog zaštitnog kola usled dejstva neutronskog i gama zračenja i broja impulsa povećavaju broj i intenzitet viših harmonika na izlazu. Ta pojava predstavlja realnu opasnost po štićeni element ili sistem što može dovesti do njegove disfunkcije ili uništenja. Ovo se mora imati u vidu prilikom primene hibridnih zaštitnih kola u poljima neutronskog i gama zračenja pošto efekti ovog zračenja

izazivaju dominantno uočene pojave. Iz tog razloga se preporučuje izbor komponenata hibridnog zaštitnog kola koje su otpornije na dejstvo neutronskog i gama zračenja. To su komponente izrađene na bazi molekula veće mase pošto je u tom slučaju manje moguć efekat izmeštanja molekula (što je glavni efekat interakcije neutronskog i gama zračenja sa materijalom).

ZAHVALNICA

Rad je realizovan i podržan od strane Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja, ugovor broj: 451-03-47/2023-01/200017

LITERATURA

1. Standler, R. B., Protection of Electronic Circuits from Overvoltages, Dover Publications, 2002
2. Beyer, M., Boeck, W., Hochspannungstechnik, Theoretische und Praktische Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin, 1986
3. Osmokrović, P., et al., Investigation of The Optimal Method for Improvement of the Protective Characteristics of Gas-Filled Surge Arresters - With/Without The Built-In Radioactive Sources, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30 (2002), 5 I, pp. 1876-1880
4. Howard, C., New Avalanche Diode for Transient Protection, Electronic Product Design, 1983
5. Vujišić, M., et al., Influence of Working Conditions On Over-Voltage Diode Operation, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 9 (2007), 12, pp. 3881-3884
6. Saranya, A., et al., Role of Hexamine in ZnO Morphologies at Different Growth Temperature with Potential Application in Dye Sensitized Solar Cell, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 92 (2019), pp. 108-115
7. Frigura-Illias, F. M., et al., Case Study About the Energy Absorption Capacity of Metal Oxide Varistors with Thermal Coupling, *Energies*, 12 (2019), 3, art. no. 536
8. Stanković, K. D., Perazić, L., Determination of Gas-Filled Surge Arresters Lifetime, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47 (2019), 1, art. no. 8515076, pp. 935-943
9. Metwally, I. A., Heidler, F. H., Lightning Transients in Low-Voltage Installations Inside Different Types of Class II Lightning Protection Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (2009), 2, pp. 930-938
10. Metwally, I. A., Computation of Transient Overvoltages in Low-Voltage Installations During Direct Strikes to Different Lightning Protection Systems, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49 (2007), 3, pp. 602-613
11. Osmokrović, P., et al., Stability of The Gas Filled Surge Arresters Characteristics Under Service Conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11 (1996), 1, pp. 260-266
12. Osmokrović, P., et al., Influence of The Electrode Parameters On Pulse Shape Characteristic of Gas-Filled Surge Arresters at Small Pressure and Inter-Electrode Gap Values, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33 (2005), 5 II, pp. 1729-1735
13. Metwally, I. A., Heidler, F. H., Reduction of Lightning-Induced Magnetic Fields and Voltages Inside Struck Double-Layer Grid-Like Shields, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 50 (2008), 4, pp. 905-912
14. Lončar, B., et al., Radioactive Reliability of Gas Filled Surge Arresters, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50 (2003), 5 III, pp. 1725-1731
15. Geibig, K. F., et al., Use of Fiber-Reinforced Composite Materials in Sparking Gaps, *Zeitschrift fuer Werkstofftechnik/Materials Technology and Testing*, 14 (1983), 6, pp. 197-201
16. A. Jusić, et al., Synergy of Radioactive ^{241}Am and the Effect of Hollow Cathode in Optimizing Gas-Insulated Surge Arresters Characteristics, *Nucl Technol Radiat* 33 (2018) 3, pp. 260-267
17. Stankovic K., Osmokrović P., The Model for Calculating the Type a Measurement Uncertainty of GM Counters from The Aspect of Device Miniaturization, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61 (2014), 3, art. no. 6819052, pp. 1316 - 1325
18. Osmokrović, P., et al., Mechanism of Electrical Breakdown Left of Paschen Minimum, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1 (1994), 1, pp. 77-81
19. Osmokrović, P., et al., Mechanism of Electrical Breakdown of Gases for Pressures from 10^{-9} To 1 Bar and Inter-Electrode Gaps from 0.1 To 0.5 mm, *Plasma Sources Science and Technology*, 16 (2007), 3, art. no. 025, pp. 643-655
20. Osmokrović, P., et al., Electrical Breakdown of SF₆ at Small Values of the Product pd, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4 (1989), 4, pp. 2095-2099
21. Osmokrović, P., et al., Determination of Pulse Tolerable Voltage in Gas-Insulated Systems, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47 (2008), 12, pp. 8928-8934
22. Raizer, Y. P. Gas Discharge Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1991
23. Pejović, M., et al., Processes in Insulating Gas Induced by Electrical Breakdown Responsible for Commercial Gas-Filled Surge Arresters Delay Response, *Vacuum*, 137 (2017), pp. 85-91
24. Pejović, M. M., et al., Kinetics of Positive Ions and Electrically Neutral Active Particles in Afterglow in Neon at Low Pressure, *Physics of Plasmas*, 21 (2014), 4, art. no. 042111
25. Čaršimamović, A. S., et al., Low Frequency Electric Fielded Radiation Level Around High-Voltage Transmission Lines and Impact of Increased Voltage Values on the Corona Onset Voltage Gradient, *Nucl Technol Radiat* 33 (2018), 2, pp. 201-207
26. Doličanin, E. Ć., Fetahović, I. S., Monte Carlo Optimization of Redundancy of Nanotechnology Computer Memories in The Conditions of Background Radiation, *Nucl Technol Radiat* 33 (2018), 2, pp. 208-216
27. Obrenović, M. D., et al., Statistical Review of the Insulation Capacity of the Geiger-Mueller Counter, " *Nucl Technol Radiat* 33 (2018), 4, pp. 369-374
28. Pejović, M. M., Stanković, K., Experimental Investigation of Breakdown Voltage and Electrical Breakdown Time Delay of Commercial Gas Discharge Tubes, *Japanese Journal of Applied Physics*, 50 (2011), 8 PART 1, art. no. 086001
29. Osmokrović, P., et al., The New Method of Determining Characteristics of Elements for Overvoltage Protection of Low-Voltage System, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55 (2006), 1, pp. 257-265
30. Pejović, M. M., et al., Investigation of Breakdown Voltage and Electrical Breakdown Time Delay in Air-Filled Tube in Presence of Combined Gas and Vacuum Breakdown Mechanism, *Vacuum*, 86 (2012), 12, pp. 1860-1866
31. Osmokrović, P., et al., The Validity of the General Similarity Law for Electrical Breakdown of Gases, *Plasma Sources Science and Technology*, 15 (2006), 4, art. no. 015, pp. 703-713
32. Rajović, Z., et al., Influence of SF₆-N₂ Gas Mixture Parameters on the Effective Breakdown Temperature of the Free Electron Gas, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (2013), 12, art. no. 6645459, pp. 3659-3665

THE INFLUENCE OF THE SYNERGY OF NEUTRON AND GAMMA RADIATION AND FUNCTIONAL AGING ON THE EFFICIENCY OF A HYBRID PROTECTION CIRCUIT

Alja R. Jusić, Dušan P. Nikezić, Član ETRAN, Milić M. Pejović, Uzahir R. Ramadani, član ETRAN