

NASTANAK I MANIFESTACIJE TRANZIJENTNIH POJAVA U INDUSTRIJSKIM MREŽAMA

Vlado Tadić, "TING" d.o.o. Žepče, BiH
Saša Đekić, ZP "Elektro Doboj" a.d. Doboj, BiH

KRATAK SADRŽAJ

U predmetnom radu predstavljane su teorijski i empirijski tranzijentne pojave koje se najčešće javljaju na industrijskim mrežama. Modernizacija industrijskih postrojenja sa sobom sve više uvodi nelinearne komponente koje za posljedicu imaju složene prelazne pojave i tranzijente u mreži. Cilj izrade predmetnog rada bio je doprinos u sagledavanju postojećeg i prognoziranog stanja sa aspekta otkrivanja, analize i ublažavanja negativnog uticaja istih na distributivni sistem. U radu su detaljno izloženi rezultati mjerenja tranzijentnih pojava provedeni na niskonaponskoj industrijskoj mreži.

Ključne reči: Prelazne pojave, tranzijenti

ABSTRACT

In this paper we present the theoretical and empirically transient phenomena occurring on the industrial network. Modernization of industrial plants is increasingly introducing non-linear components that result in complex transitional phenomena and transients are transmitted. The aim of this paper was to contribute to the examination of the existing and the forecasted situation from the aspect of discovering, analyzing and mitigating the negative impact of the same on the distribution system. This paper present the also results of the measurements transients carried out on the low voltage industrial network.

Key words: transient phenomena, transients

tadic.vlado@gmail.com, sasa.b.djekic@elektrodoboj.net

UVOD

Pri eksploataciji, električna oprema i postrojenja izložena su radnom naponu (naizmjeničnom naponu ili jednosmjernom naponu), prenaponima i udarnim impulsnim prenaponima (atmosferskim i komutacionim prenaponskim udarima). Brze promjene amplitudno visokih napona mogu izazvati oštećenja i proboje izolacije i posljedično havarije i uništenje električnih mašina i druge opreme. Poseban problem prilikom eksploatacije predstavlja negativan uticaj na kvalitet električne energije koji izazivaju prelazne pojave i tranzijenti struja i napona.

Za potrebe izrade predmetnog rada korištena je jedinstvena inostrana literatura iz baza podataka međunarodne elektrotehničke asocijacije IEEE, s pozivanjem na IEC standarde. Teorijski dio je dodatno opisan primjenom prikladnog matematičkog aparata. U fizičkom smislu, za konkretne slučajeve, provedeni su praktični eksperimenti u kojima su fizički simulirane željene pojave i iste mjerene i snimane pomoću dostupne mjerne opreme. Poseban osvrt dat je na NN industrijskim postrojenjima naponskog nivoa 0,4 kV, na kojima su i provodena potrebna mjerenja, korištenjem specijalizovanih uređaja za snimanje i analizu naponskih i strujnih prilika u mreži.

TRANZIJENTNE POJAVE U EES

EES je veoma nelinearan i dinamičan sistem u kome se konstantno vrši preraspodjela elektromagnetne i elektromehaničke energije između komponenti sistema. Ova preraspodjela ne može se dešavati trenutno niti idealno nego tokom određenog vremenskog perioda uz prisustvo određene prelazne pojave. Izučavanje prelaznih pojava u EES uključuje opseg frekvencije do 50 MHz, u pojedinim slučajevima čak i više. Pri čemu se predmetne prelazne pojave definišu i proučavaju u dvije osnovne kategorije, kao elektromagnetne i elektromehaničke prelazne pojave. Elektromagnetne prelazne pojave nastaju pretežno interakcijom između električnih polja kapacitivnih elemenata i magnetnih polja induktivnih elemenata i manifestuju se kao oscilacije između kapaciteta i induktiviteta ili kao putujući talasi po EES-u. Elektromehaničke prelazne pojave nastaju kao posljedica interakcije električne energij pohranjene u sistemu i mehaničke energije rotacionih mašina pohranjene usljed inercije rotora generatora i motora.

Prenaponi čija je frekvencija veća od frekvencije sistema stvaraju i elektromagnetne pojave čiji je uticaj od značaja na sistem. Prenaponi u rasponu frekvencija od 100 kHz do 50 MHz nazivaju se veoma brzim prenaponima (VFT). Oni pripadaju najvišem rasponu prenapona u EES. Prema IEC 60071-1, oblik veoma brzih prenapona je obično jednosmjernan sa vremenom vrhunca manjim od 0,1 μ s, i ukupnim trajanjem manjim od 3 ms, i sa postavljenim oscilacijama pri frekvenciji od 30 kHz < f < 100MHz. Ovi prenaponi mogu nastati usljed atmosferskih pražnjenja, u gasom izolovanim trafostanicama, itd. prema IEC 60071-2. Atmosfersko pražnjenje proizvodi najbrže smetnje, od mikrosekundi do čak nanosekundi. Pri udara groma struje dosežu do 100 kA, čak i više, što uzrokuje pojavu i prostiranje značajnih elektromagnetnih talasa koje na različite načine mogu uticati na oblik napona, frekvenciju, nestabilnost napona, isključenja i prekide, rasprostiranje prenaponskih talasa po vodovima. Takođe, usljed prelaznih pojava u rotacionim mašinama dolazi do elektromagnetnih pojava frekvencije niže od frekvencije sistema.

Tabela 1 - Klasifikacija opsega frekvencija

Grupa	Opseg frekvencije za prikaz	Oblik	Prikaz za
I	0.1 Hz – 3kHz	Nisko frekvente oscilacije	Privremeni prenaponi
II	50/60 Hz – 20kHz	Spori čelni prenaponi	Prenaponi pri sklapanju
III	10 kHz – 3 MHz	Brzi čelni prenaponi	Atmosferski prenaponi
IV	100 kHz – 50 MHz	Veoma brzi čelni prenaponi	Udarni prenaponi, GIS ⁴

Tabela 2 - Raspon frekvencija za prijelazne pojave

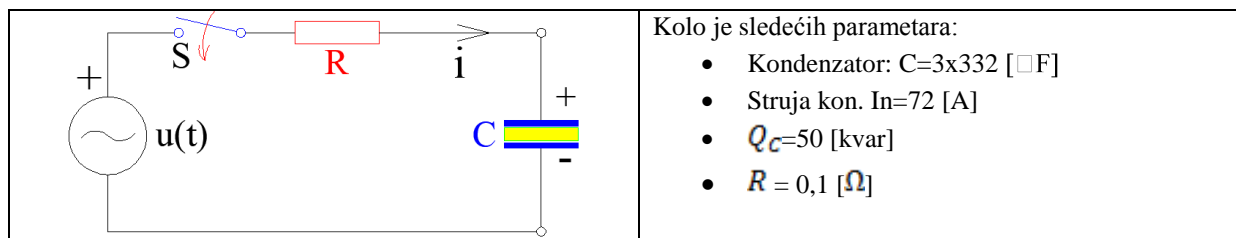
Porijeklo prijelazne pojave	Opseg frekvencije
Ponovni udar na rastavljače i greške u GIS	100 kHz – 50 MHz
Atmosferski prenaponi	10 kHz – 3 MHz
Višestruki udari u prekidačima	10 kHz – 1 MHz
Povratni napon prijelazne pojave:	
Krajnje greške	50/60 Hz – 20 kHz
Greške kratkih vodova	50/60 kHz – 100 kHz
Otklanjanje greške	50/60 Hz – 3 kHz
Iniciranje greške	50/60 Hz – 20 kHz
Energizacija greške	50/60 Hz – 3 kHz
Odbacivanje opterećenja	0.1 Hz – 3kHz
Energizacija transformatora	(dc) 0.1 Hz – 1 kHz
FeroRezonancija	(dc) 0.1 Hz – 1 kHz

Proučavanje prelaznih pojava u EES-u obuhvata prenapone različitog porijekla, prelazne pojave u sistemima upravljanja, dinamičku stabilnost EES, kratke spojeve, zaletanje motora, manipulacije rasklopnom opremom, prekidanje strujnih krugova, uzemljivačke sisteme, itd. Pri čemu se posebna pažnja mora posvetiti fizičkim karakteristikama specifičnih elemenata u EES-u te pažljivom matematičkom modelovanju istih.

U daljem tekstu rada dat je prikaz osnovnih uzročnika nastanka sklopnih prenaponskih tranzijenata u manjim industrijskim EES. Za potrebe izrade predmetnog rada provedeni su i brojni praktični eksperimenti na dostupnoj industrijskoj mreži. Rezultati dobijeni eksperimentalnim putem analizirani su te upoređeni sa rezultatima teorijsko-matematičkih analiza predmetnih pojava

UKLAPANJE KOMPENZACIONOG KONDENZATORA

Za potrebe izrade predmetnog rada na dostupnoj industrijskoj mreži proveden je praktični eksperiment uklapanja kompenzacionog kondenzatora. Na predmetni industrijski EES, poslije brojila, priključen je uređaj za kompenzaciju reaktivne snage, prosto RC kolo, kako je šematski prikazano na slici 1.



Slika 1 – Šematski prikaz uklapanja uređaja za kompenzaciju reaktivne snage

Otpornik i kondenzator u rednoj vezi pobuđeni pomoću sinusoidnog izvora predstavljaju važan izvor tranzijenata. Ova veza predstavlja osnove kola za kompenzaciju reaktivne snage i energije.

Prikazano kolo može se predstaviti sledećom jednačinom

$$RCi(t) + u_C(t) = u(t) \quad (1.1)$$

odnosno

$$RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = u(t) \quad (1.2)$$

Homogeno rešenje ove jednačine glasi:

$$u_C(t) = Ae^{\frac{-t}{RC}} \quad (1.3)$$

gdje je

$$A = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\theta - \varphi) \quad (1.4)$$

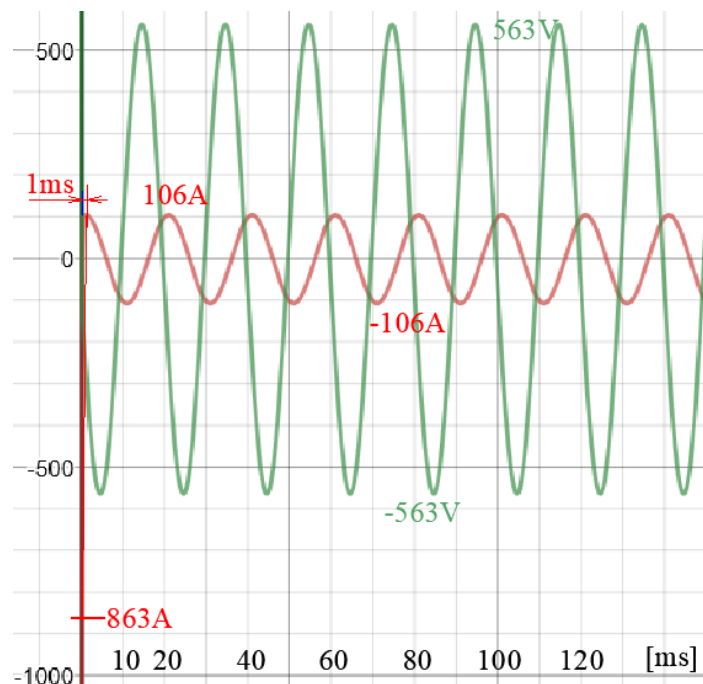
Odnosno, za ukupni napon na kondenzatoru u prelaznom režimu dobija se

$$u_c(t) = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \theta - \varphi) + \left[\frac{I_m}{\omega C} \cos(\theta - \varphi) + U_{C0} \right] e^{\frac{-t}{RC}} \quad (1.5)$$

Struja kola se određuje sa:

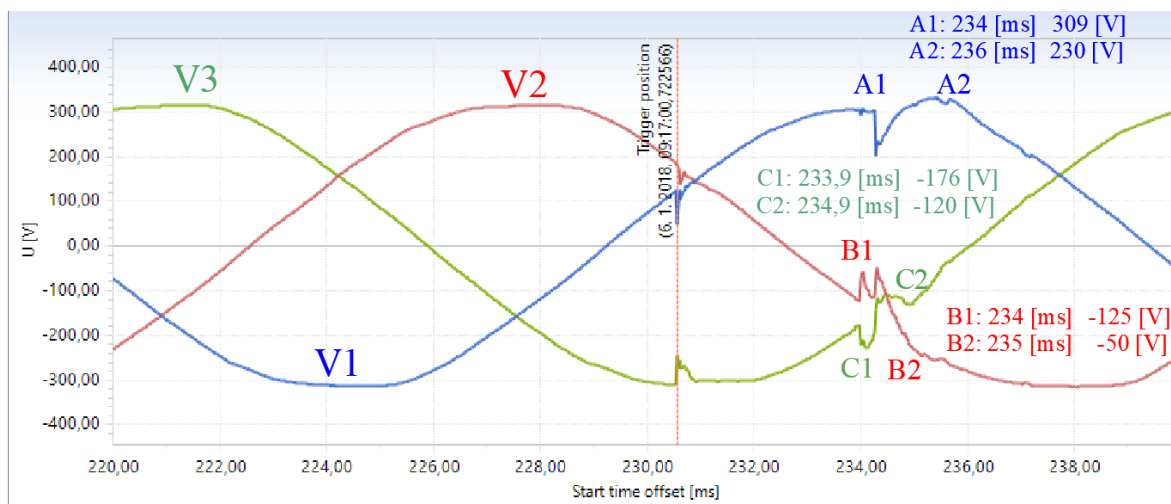
$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{564}{\sqrt{0,1^2 + \left(\frac{1}{514 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}\right)^2}} = 106 \text{ [A]} \quad (1.6)$$

Teorijski, za RC kolo sa dominantnom kapacitivnošću, kolo sa elementima opisanih karakteristika na slici 1, dobijaju se sledeći rezultati. U trenutku $t=0$, nakon uključenja kondenzatora, za trenutnu vrijednost napona od npr. -58 [V] simulacijom se dobija da tranzijent polazne struje dostiže vrijednost do 8,14 puta veću od vrijednosti struje u stacionarnom režimu rada kola. Za konkretan slučaj dobijamo -863 A za vrijednost tranzijenta struje. Ovakvo visok tranzijent struje u kolu možemo smanjiti povećanjem otpornosti R . Ovakvo rješenje se kod kompenzacionih kondenzatorskih baterija za manje snage, npr. do 50 [kVAr] nudi od strane proizvođača kao standardizovano rješenje. Za veće snage takvo rješenje obično nije praktično prihvatljivo. Druga mogućnost je da se pri uključenju na red sa kondenzatorima prvo priključi prigušnica, što se takođe nudi od strane proizvođača opreme za kompenzaciju reaktivne snage kao tipizovano rješenje. Takođe, simulacijama na opisanom primjeru pokazuje se da se pomjeranjem uključenja u trenutku kada prostoperiodična funkcija naponskog izvora prolazi kroz maksimalnu vrijednost. Međutim, ovo rješenje nije praktično zbog kaskadne izvedbe kondenzatorskih baterija u praktičnim primjenama.



Slika 2 – Prikaz simulacije strujnih i naponskih prilika pri uključenju kondenzatora

U svrhu fizičke provjere simuliranih pojava izvršen je i praktičan eksperiment pri čemu je na dostupnoj realnoj industrijskoj mreži vršeno uključenje kondenzatorske baterije snage 50 [kVAr]. Pri tome su korišteni instrumenti Multimetar: FLUKE 179, Otpor petlje: TESTER B41127KB4112 SIEMENS, Analizator mreže: METREL MI 2792 Fw11.0.731 i softver: PowerView V2.0.0.1055 (32-bit), za dužinu snimanja: 17 perioda.



Slika 3 - Naponski tranzijenti

Na Slici 3 prikazani su naponski tranzijenti napona V1, V2 i V3. U trenutku 230 [ms] pokrenut je okidač za snimanje tranzijenata. Zadana vrijednost okidača je da se aktivira kad nastane naponsko odstupanje (tranzijentna pojava) veće od 5 [V] na naponskoj sinusoidi. Vidimo da je snimanje počelo istovremeno u sve tri faze.

U fazi V1 start počinje sa unipolarnim negativnim tranzijentom koji ima vrijednost 124,4 [V] i koji pada na vrijednost 49,8 [V] za vrijeme od 20 [μs].

U fazi V2 start počinje sa unipolarnim negativnim tranzijentom koji ima vrijednost 174V i koji pada na vrijednost 136 [V] za vrijeme od 20 [μs].

U fazi V3 start počinje sa unipolarnim pozitivnim tranzijentom koji ima vrijednost 310 [V] i koji pada na vrijednost 242 [V] za vrijeme od 20 [μs].

Ovakav pad tranzijentnog napona je posljedica porasta struje kroz kondenzator odnosno grupisanje naelektrisanja prema pločama kondenzatora. Nadalje, poslije vremena $t=3,6$ [ms] od nastanka prvog tranzijenta pojavljuje se drugi naponski tranzijent za približno isto vrijeme.

U fazi V1, nakon $t=4$ [ms] od okidanja generiše se unipolarni negativni tranzijent koji ima trenutnu vrijednost 309 [V] i koji pada na vrijednost 262 [V] za vrijeme trajanja druge tranzijentne pojave od 2 [ms].

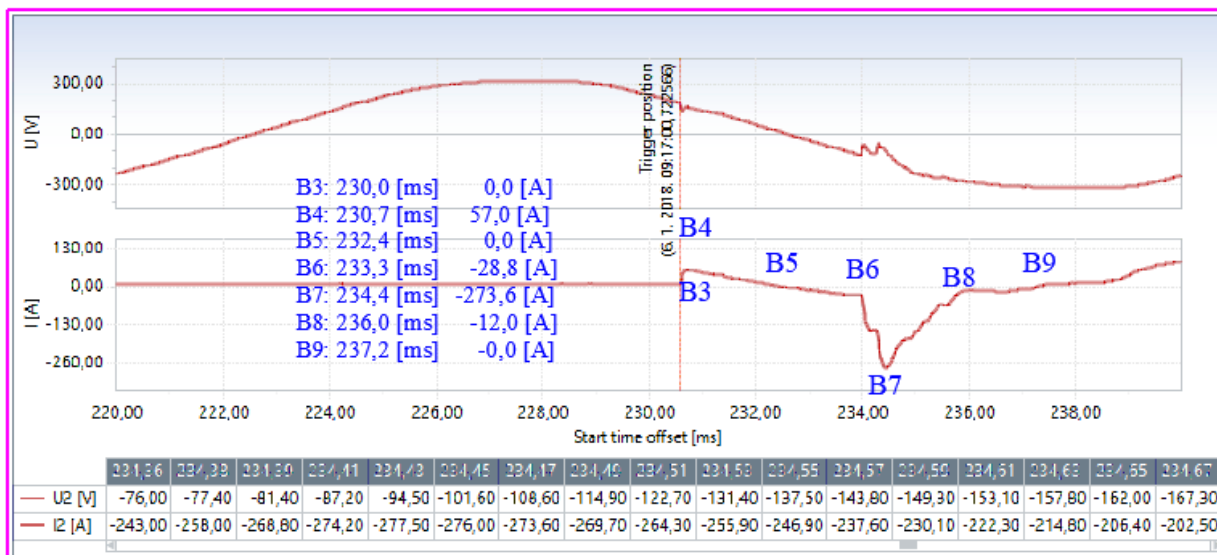
U fazi V2, nakon $t=3$ [ms] od okidanja generiše se unipolarni pozitivni tranzijent sa dvostrukim usjekom koji ima trenutnu vrijednost -125 [V] i koji raste na vrijednost -235 [V] za vrijeme trajanja druge tranzijentne pojave od 1 [ms].

U fazi V3, nakon $t=4$ [ms] od okidanja generiše se oscilirajući tranzijent koji ima trenutnu vrijednost -176 [V] i koji raste na vrijednost -226 [V] za vrijeme trajanja druge tranzijentne pojave od 1 [ms].

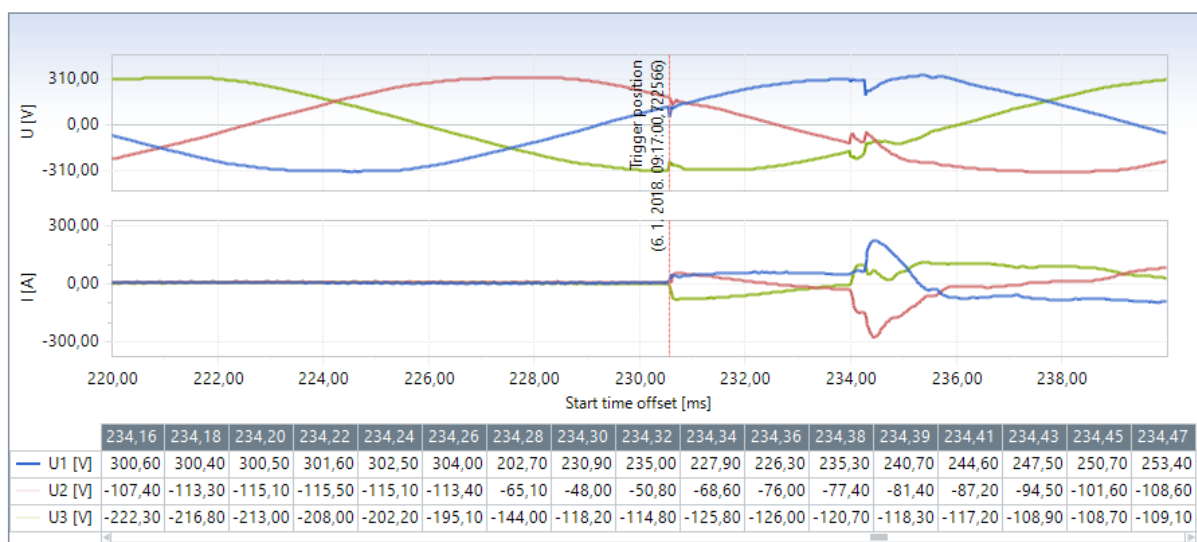
Na dalje, posmatrajmo tok struje u istom vremenskom intervalu kao i napon što prikazujemo na Slici 4.

Na slici 4 prikazani su strujni tranzijenti struje u fazi V2. U trenutku 230 [ms] pokrenut je okidač za snimanje tranzijenata.

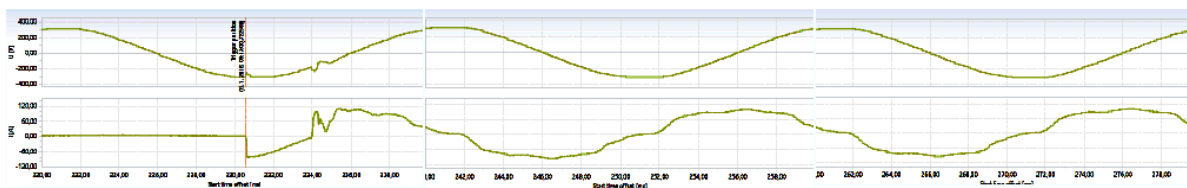
- U tački B3 start počinje sa vrijednošću struje 0,0 [A] i početno vrijeme $t=230$ [ms] koje proglašavamo kao početno sa $t=t_0=0,0$ [ms].
- Od tačke B3 do B4 pojavljuje se nagli rast struje od vrijednosti 0,0A na vrijednost 57 [A] u vremenskom intervalu od 0,4 [ms] računato od trenutka t_0 .
- U tački B5 struja ima vrijednost 0,0 [A] za vrijeme od 2,4 [ms] računato od trenutka t_0 .
- Od tačke B5 do B6 pojavljuje se lagani rast struje od vrijednosti 0,0 [A] na vrijednost -28,8 [A] u vremenu od 3,3 [ms] računato od trenutka t_0 .
- Od B6 do B7 pojavljuje se nagli rast struje u vidu negativnog unipolarnog tranzijenta od vrijednosti -28,8 [A] na vrijednost -273,6 [A] u vremenu od 4,4 [ms] računato od trenutka t_0 .
- Od tačke B7 do B8 pojavljuje se nagli pad struje od vrijednosti -273,6 [A] na vrijednost -12,0 [A] u vremenu od 6,0 [ms] računato od trenutka t_0 .
- Od tačke B8 do B9 pojavljuje se lagani pad struje od vrijednosti 12,0A na vrijednost 0,0 [A] u vremenskom intervalu od 7,2 [ms] računato od trenutka t_0 .



Slika 4 - Strujni tranzijenti



Slika 5 - Strujni i naponski tranzijenti u sve tri faze



Slika 6 - Napon i struja u trajanju od 3 periode

Za potrebe daljih mjerenja i proučavanja tranzijenih pojava u rednoj vezi sa kondenzatorom dodajemo induktivitet (prigušnicu) kako bi uticali na tranzijente i poništili neke od viših harmonika. Pri čemu je korišten dostupni industrijski sistem 10 [kV]; 630 [kVA]; $U=3 \times 230\sqrt{3}$ [V]; 50 [Hz]; $Z=0,17+j0,04$ [Ω].



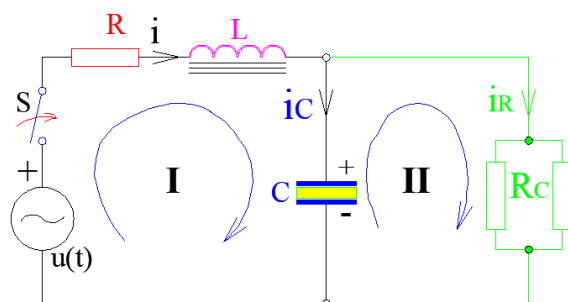
Slika 7 - Izgled 50 kvar kondenzatora

Kondenzator: $C = 3 \times 332 \text{ [}\mu\text{F]}$ $Q_C = 50 \text{ [kvar]}$

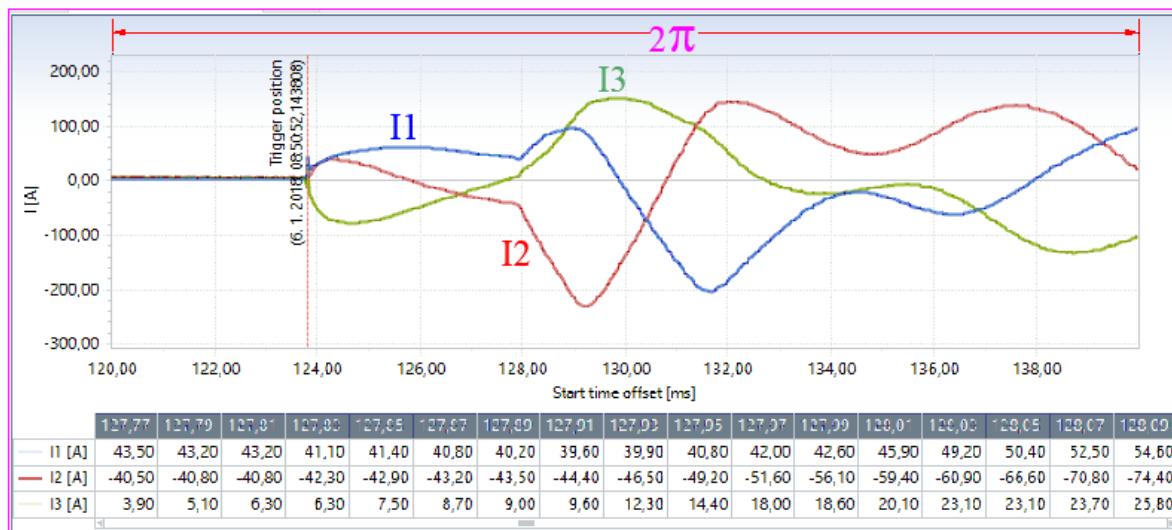


Slika 8 - Izgled 50 kvar prigušnice

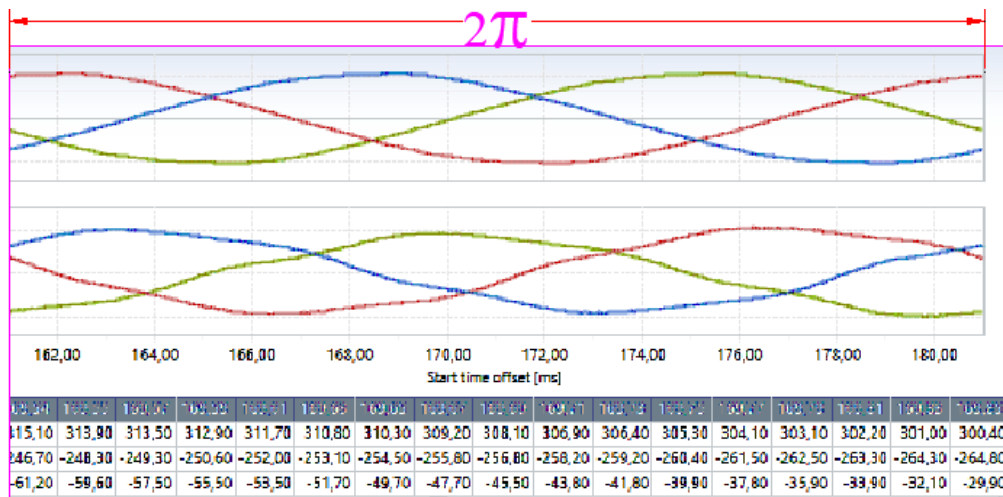
Induktivitet: $L = 0,77 \text{ [mH]}$ $Q_L = 50 \text{ [kvar]}$



Slika 9 - Dodavanje induktiviteta postojećem kondenzatoru



Slika 10 - Tranzijenti s dodatim induktivitetom u seriju kondenzatoru



Slika 11 - Prikaz sve tri struje i napona u trećoj periodu nakon okidanja

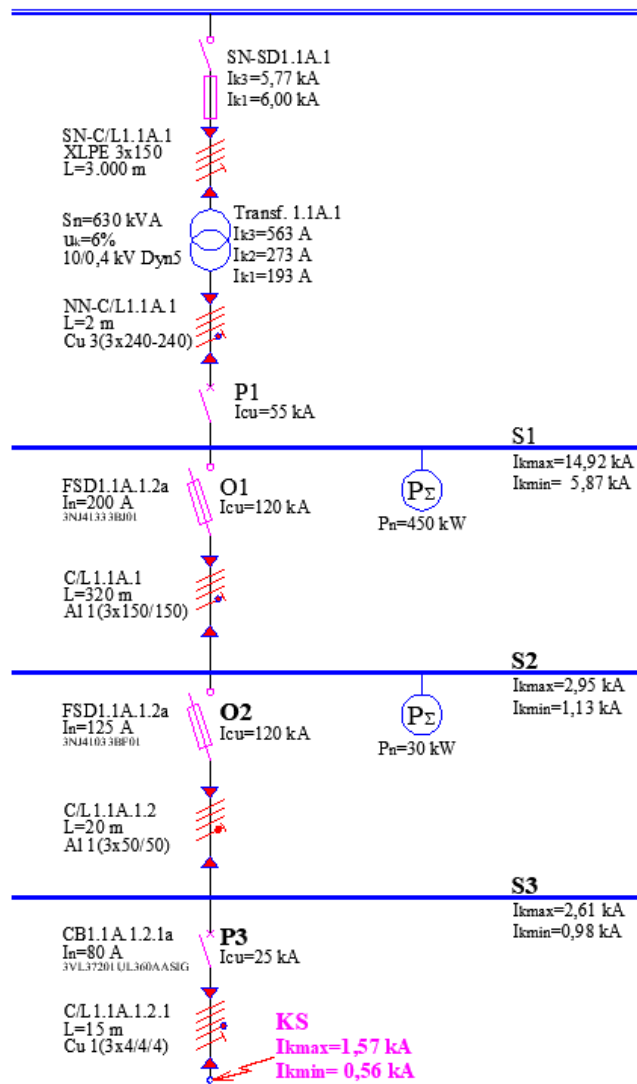
Na slici 10 prikazane su sve tri struje za vrijeme trajanja prve periode. Sa datog prikaza primjećujemo da oblici struja u prelaznom-tranzijentnom periodu nemaju više nagle promjene kao što je to bio slučaj sa prvim mjerenjem, odnosno nemaju zašiljenih oblika. Tranzijentne udarne struje su smanjene za cca 20% što za posljedicu ima veću trajnost kondenzatora i manji udar na energetski sistem. Daljim tokom eksperimenta dolazi do porasta napona na kondenzatoru pa se stoga mora i odabrati kondenzator za veće radne napone, 400 na 480V, (+20%). Na slici 11 prikazane su sve tri struje za vrijeme trajanja prve i druge periode. Sa datog prikaza može se primjetiti da oblici struja u stacionarnom periodu, druga perioda i dalje, nemaju više značajne više harmonike kao što je to bio slučaj prilikom prvog mjerenja.

EKSPERIMENT KRATKOG SPOJA

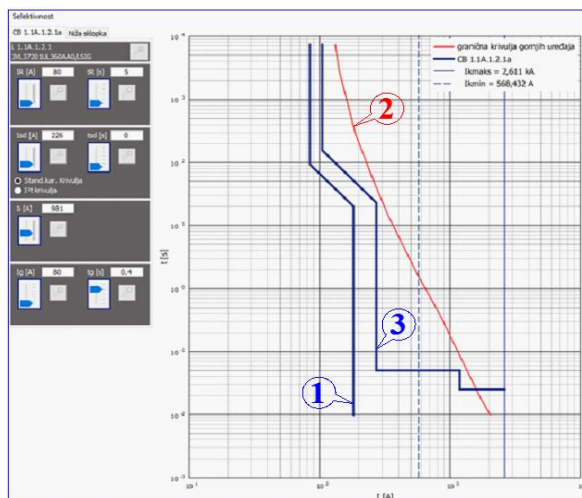
Za potrebe izrade predmetnog rada izveden je, takođe, kratak spoj u posmatranoj industrijskoj mreži. Da bi se izveo kratak spoj u nekom industrijskom postrojenju neophodno je izvršiti pripremni proračun kratkog spoja od trafostanice do mjerene točke gdje će se izvesti kratak spoj da se nebi ugrozili potrošači u industrijskim postrojenjima. Na slici 12 prikazani su rezultati proračuna, za koji je korišten softverski paket SIMARIS DESIGN. Prikazane su struje kratkog spoja za pojedine sabirnice S1, S2, S3. Na sabirnice S3 priključen je novi prekidač P3 na kojem će se izvršiti kratak spoj. Maksimalna struja kratkog spoja iznosi $I_{max}=1,57 [kA]$ dok je minimalna $I_{min}=0,56 [kA]$. Na slici 13 kriva ① predstavlja prvo uključjenje prekidača, kriva ② predstavlja zaštitni aparat (osigurač) ispred našeg prekidača označen sa slici 12 sa O_2 i kriva ③ predstavlja drugo uključjenje prekidača. Kako tražimo da prekidač P_3 izvrši automatsko isključenje za vrijeme manje od 10 [ms] gdje vidimo da na krivoj ①. Ovakvom analizom pokazalo se da se kratak spoj u tački KS, prema slici 12, može izvesti.

Na slici 14, posmatrajući vremensku osu, uočava se sledeće:

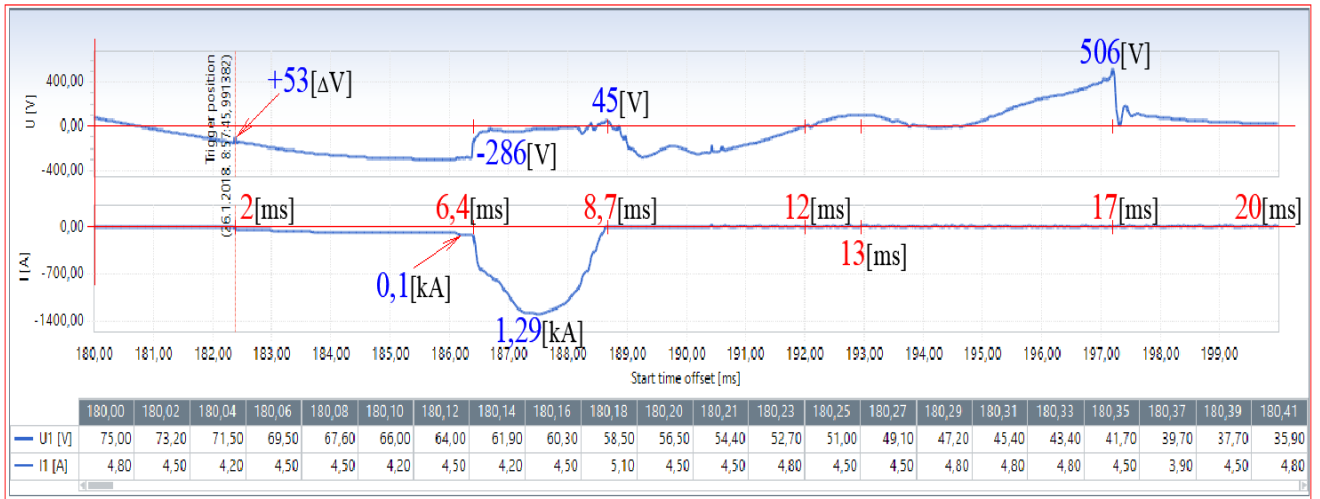
- Okidač se aktivirao u trenutku $T_1=2[ms]$
- Od vremena $T_1=2[ms]$ do $T_2=4,6[ms]$ struja ima lagani porast do $-0,1[kA]$
- Od vremena $T_2=4,6[ms]$ do $T_3=7,5[ms]$ struja ima nagli porast do $-1,29[kA]$ u kojem dijelu dolazi do naglog pada napona na približno $-20[V]$.
- Od vremena $T_3=7,5[ms]$ do $T_4=8,7[ms]$ struja ima nagli pad do $0,0[kA]$
- Od vremena $T_4=8,7[ms]$ do $T_5=17[ms]$ struja je jednaka nuli jer je nastupilo totalno isključenje (razdvajanje) EES i mreže u unutar industrijskog postrojenja. Napon u tom vremenskom intervalu počinje oscilovati i tako da za vrijeme $T_5=17[ms]$ dostiže maksimum od $506 [V]$ što je veće od napona EES ($314 < 506$).



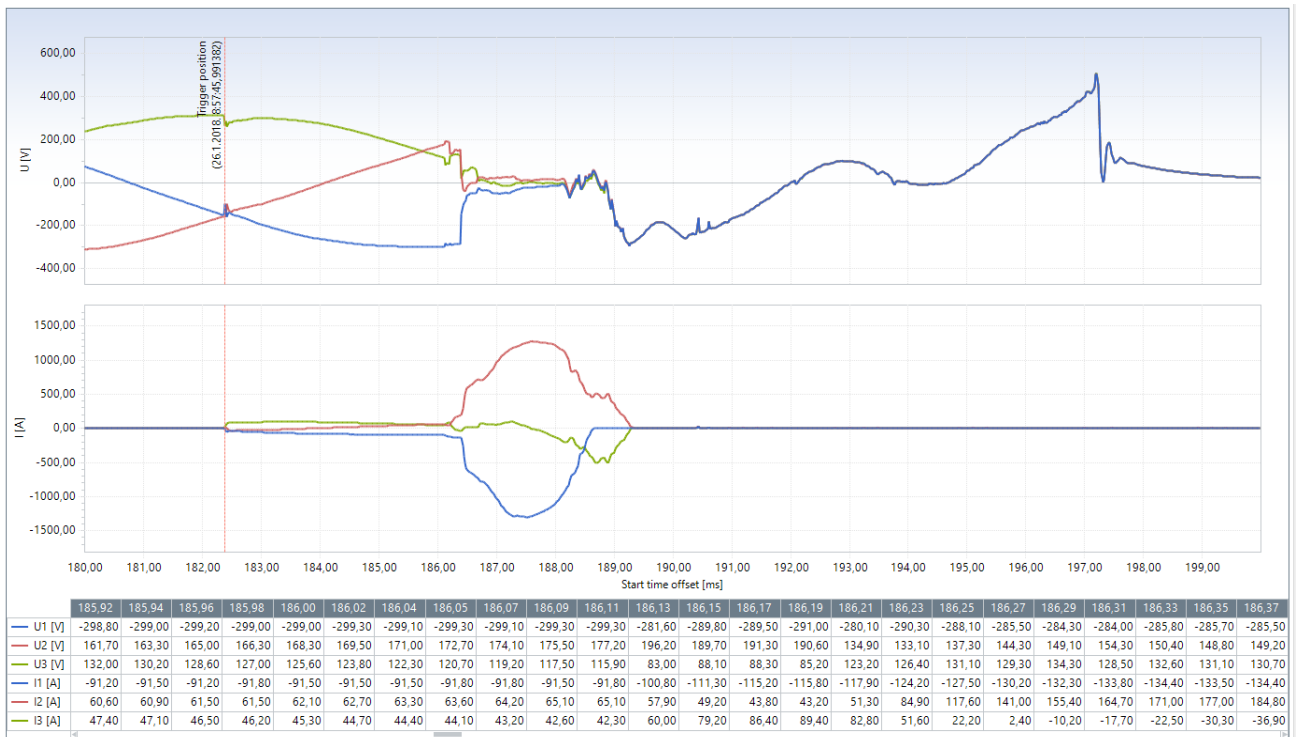
Slika 12 – Prikaz rezultata proračuna kratkog spoja



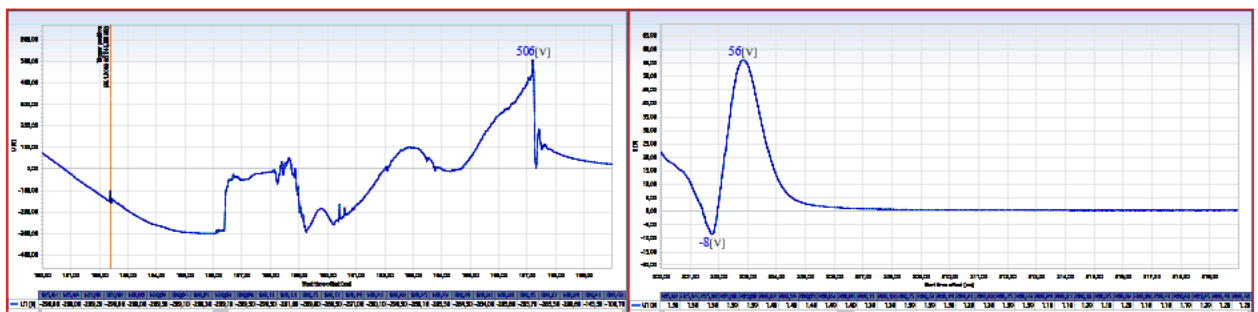
Slika 13 - Simulacija namještenja prekidača P3



Slika 14 - Kratki spoj, prikaz napona i struje u fazi A



Slika 15 - Prikaz napona i struje u fazama A,B i C



Slika 16 - Prikaz napona u fazi A intervalu dvije periode

ZAKLJUČAK

Sa slike 3 i slike 4 vidimo da promjene struje izazivaju pad napona za vrijeme trajanja tranzijentnog perioda. Takođe, iz navedenih grafičkih prikaza može se primjetiti da tranzijentne pojave završavaju za vrijeme jedne poluperiode, što baš i nije strogo pravilo. Za vrijeme trajanja tranzijentnih pojava dolazi do pomaka struje i napona, u slučaju prvog mjerenja struja prednjači naponu za 90° . Za oba prikazana slučaja može se zaključiti da se stacionarno stanje uspostavlja za vremenski interval od 10[ms].

Sa grafičkog prikaza datog na slici 6 vidimo da strujna sinusoida u stacionarnom stanju ima značajnu distorziju koja se može objasniti prisutnošću viših harmonika.

Da se primjetiti da je napon na sistemu porastao za 2 [V] nakon priključenja kondenzatora odnosno, može se potvrditi da kapacitivna oprerećenje u EES podižu napon sistema.

Sa slike 10 i 11 može se primjetiti da oblici struja u prelaznom-tranzijentnom periodu nemaju više nagle promjene nakon dodavanja induktivnosti u red sa kondenzatorom, odnosno da oblici struja u stacionarnom periodu, druga perioda i dalje, nemaju više značajne više harmonike kao što je to bio slučaj prije dodavanja induktiviteta. Tranzijentne udarne struje su smanjene za cca 20% što za posljedicu ima veću trajnost kondenzatora i manji udar na energetske sistem.

Visok naponski tranzijent koji se pojavio nakon automatskog isključenja u kratkom spoju na dovodnoj sabirnici S3 prikazanoj slici 12 je posljedica nedovoljnog sagledavanja unutrašnje mreže unutar industrijskog kompleksa, odnosno odabira vrste automatske kompenzacije. Na postojeću automatsku kompezaciju treba dodati u seriju induktivitet kako je to obrazloženo u prethodnoj cjelini.

Generalni zaključci koji se mogu izvesti iz predmetnog rada glase. Brze promjene amplitudno visokih napona mogu izazvati oštećenja i proboje izolacije i posljedično havarije i uništenje električnih mašina i druge opreme. Poseban problem prilikom eksploatacije predstavlja negativan uticaj na kvalitet električne energije koji izazivaju prelazne pojave i tranzijenti struja i napona. Uzroci i manifestacija tranzijenata nije dovoljno proučena u BiH zbog izuzetne kompleksnosti predmetne materije te kompleksnosti, cijene i nedostupnosti potrebne mjerne opreme za isto. Može se, na osnovu mjerenja dostupnom mjernom opremom i specijalizovanim analizatorima i osciloskopima, utvrditi postojanje tranzijenata u mreži i izdvojiti ih od harmonijskih i drugih izobličenja električnih veličina u sistemu. Može se, primjenom teorijske i matematičke analize, utvrditi priroda nastanka tranzijenata i izvršiti klasifikacija istih. Primjenom opisanih postupaka u radu može se uticati na smanjenje nastanka tranzijentnih pojava i uticati na ublažavanje manifestacije istih.

LITERATURA

1. D. L. Beeman, ed., Industrial Power System Handbook, McGraw-Hill, New York, 1995.
2. J. O. Bird, Electrical Circuit Theory and Technology, Butterworth, Heinemann, Oxford, UK, 1997.
3. J. A. Cadzow, Discrete Time Systems, Addison-Wesley Publishing Co., New York, 1959.
4. J. C. Das, Power System Analysis, Marcel and Dekker, New York, 2002.
5. J. A. Edminster, Theory and Problems of Electrical Circuits, 2d ed., Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, New York, 1983.
6. O. I. Elgord, Electrical Energy System Theory-An Introduction, McGraw-Hill, New York, 1971.
7. S. Fisch, Transient Analysis in Electrical Engineering, Prentice Hall, New York, 1971.
8. A. Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, 2d ed., John Wiley, New York, 1991.
9. W. R. LePage and S. Scely, General Network Analysis, McGraw-Hill, New York, 1952.
10. W. E. Lewis and D. G. Pryce, The Application of Matrix Theory to Electrical Engineering, E and FN Spon, London, 1965.
11. CIGRE Report, Electra, no. 22, pp. 139–147, 1972.
12. BBC Research Center—Surges in High-Voltage Networks, BBC Symp. on Surges in High-Voltage Networks, Beden, Švicarska, 1979.
13. Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, 2006.
14. H. Glavitsch, "Problems Associated with Switching Surges in EHV Networks," BBC Review, vol. 53, pp. 267–277, April/Maj 1966.

16. Pigini, L. Thione, K. H. Week, C. Menemenlis, G. N. Alexandrov i Y. A. Gersimov,
17. E. W. Boehne and G. Carrara, "Switching Surge Insulation Strength of EHV Line and Station Insulation Structures," CIGRE Report 415, 1964.
18. IEC 60071-1
19. IEC 60071-2
20. IEEE data base