

Eksperimentalni simulator za testiranje novog uređaja za povećanje energetske efikasnosti niskonaponske elektrodistributivne mreže

Aleksandar Lemez
Energio-Group d.o.o.
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
energio.group@teol.net

Aleksandar Simović
Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
aleksandar.simovic@etf.ues.rs.ba

Zlatan Stojković
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
zstojkovic@etf.rs

Sažetak - Elektrodistributivna preduzeća susreću se sa problemom lošeg kvaliteta isporučene električne energije, koji je definisan kroz standard EN 50160. Područje sa narušenim kvalitetom isporučene električne energije često se definiše pojmom „Sive zone“. Inovativno, jednostavno i investiciono isplativo rješenje problema „Sivih zona“ može biti ugradnja niskonaponskog regulacionog transformatora „sistem VROT-18“. U okviru istraživanja koje je u toku, radi se na poboljšanju verzije „sistema VROT-18“ i razvija se novi uređaj, primjenom savremenih tehnoloških rješenja. U ovom radu opisan je eksperimentalni simulator za testiranje novog uređaja. Prikazani su i upoređeni rezultati simulacije prije i poslije ugradnje novog uređaja. Ispitivanje primjenom eksperimentalnog simulatora predstavlja veoma važan korak prije ugradnje samog uređaja u realnu mrežu.

Ključne riječi - eksperimentalni simulator; regulacioni transformator; energetska efikasnost; elektrodistributivna mreža

I. UVOD

Današnji elektroenergetski sistem je mnogo složeniji u odnosu na onaj od prije pedesetak godina. Porastom broja potrošača električne mreže postajale su sve složenije. Osnovni zadatak koji se postavlja elektrodistributivnim preduzećima je kvalitetna isporuka električne energije, što primarno podrazumjeva da frekvencija i napon budu uvijek u okviru dozvoljenih intervala odstupanja u odnosu na nazivne vrijednosti. Ovo je neophodan uslov za ispravan rad električnih aparata.

Kvalitet isporuke električne energije definisan je kroz standard EN 50160 [1]. Prirast monofaznih trošila veće snage osnovni je razlog koji dovodi do ugrožavanja kvaliteta isporuke električne energije i ta područja definišu se pojmom „Sive zone“. Ovi potrošači imaju za posljedicu prirast opterećenja i unose velika nesimetrična opterećenja na niskonaponskom elektroenergetskomvodu.

„Sive zone“ obuhvataju potrošačke grupe maksimalne snage do 50 kVA u kojima se usljed nesimetrije opterećenja pojavljuje istovremeno prenapon i previsok napon na fazama. Nesimetrična opterećenja u elektrodistributivnoj mreži stvaraju pad napona kroz fazni i nulti (neutralni) provodnik što dovodi

do sniženog napon na potrošačima priključenim na opterećenu fazu (185 V), a istovremeno dolazi do povećanja napona na 253 V kod potrošača priključenih na neopterećenu ili slaboopterećenu fazu.

Kao jedno od rješenja za loše naponske prilike na niskonaponskomvodu je simetriranje opterećenja po fazama. Dosadašnji pokušaji simetriranja opterećenja po fazama koji se provodio kroz sistematsko prebacivanje faza priključaka na elektrodistributivnu mrežu u cilju uravnoteženja opterećenja nije dalo rezultate, s obzirom da se i nakon te aktivnosti dešava da u jednom vremenskom intervalu jedna faza bude više opterećena od druge dvije, a već u sljedećem vremenskom intervalu faza koja je bila najviše opterećena bude neopterećena, a druga faza preopterećena i tako ciklično. Nemoguće je kod trofaznih priključaka na elektrodistributivnoj mreži, gdje je sve veći broj monofaznih trošila kod potrošača, ostvariti uravnoteženost opterećenja po fazama metodom mješanja faza. Neuravnoteženost opterećenja po fazama ima posljedicu stvaranja previsokog napona na slaboopterećenim fazama i može izazvati oštećenje trošila kod potrošača. Iz tog razloga potrebno je spuštati napon na trafo stanici, a prenapon utiče na vrijeme (dužinu trajanja) završetka određenog tehnološkog procesa.

Dosadašnji klasični metodi rješavanja problema „Sivih zona“ pokazali su se dosta neučinkoviti. Izgradnja sredjenaponskog elektroenergetskog voda sa pripadajućom trafostanicom vezana je za stepen izgrađenosti ostale infrastrukture u naseljenom području. To znači da za naseljeno područje zahtjevalo bi se pribavljanje odgovarajućih odobrenja od nadležnih institucija, a takođe moralo bi se pristupiti rekonstrukciji kompletne infrastrukture, što dovodi do veoma dugotrajne i jako skupe investicije. Takođe, trafo stanice 10(20)/0,4 kV u gradskim i prigradskim naseljima obično imaju devet i više niskonaponskih izlaza. Na svakom niskonaponskom izlazu vremenom može biti formirana „Siva zona“. Takođe, i ovaj način rješavanja „Sivih zona“ nije ekonomski isplativ. Kao najjednostavnije i investiciono najisplativije rješenje problema je ugradnja „sistema VROT-18“ [2], [3]. Nakon završetka projektovanja i konstrukcije prototipa novog uređaja neophodno je izvršiti eksperimentalna

Rezultati koji su predstavljeni u ovom radu su dio istraživanja na zajedničkom projektu naučnoistraživačke zajednice i privrede Pilot-program „Sinergija“, kojeg sufinansira Ministarstvo za naučnotehnološki razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske, broj 19.032/961-68/19, projektne aktivnosti 2020-2021.

ispitivanja prije same ugradnje uređaja u realnu mrežu. U te svrhe neophodna je realizacija eksperimentalnih simulatora. U oblasti elektroenergetike eksperimentalni simulatori su tradicionalno razvijani pomoću skaliranih fizičkih modela elemenata [4], [5].

U današnje vrijeme sve više se koriste moderni simulatori zasnovani na kombinovanoj primjeni softvera i hardvera za simulacije radnih režima u realnom vremenu [6], [7]. U ovom radu razvijen je eksperimentalni simulator specifične namjene u analognoj tehnologiji. Osnovna namjena simulatora je ispitivanje prototipa niskonaponskog regulacionog transformatora.

II. REGULACIONI TRANSFORMATOR ZA POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI NISKONAPONSKE ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE

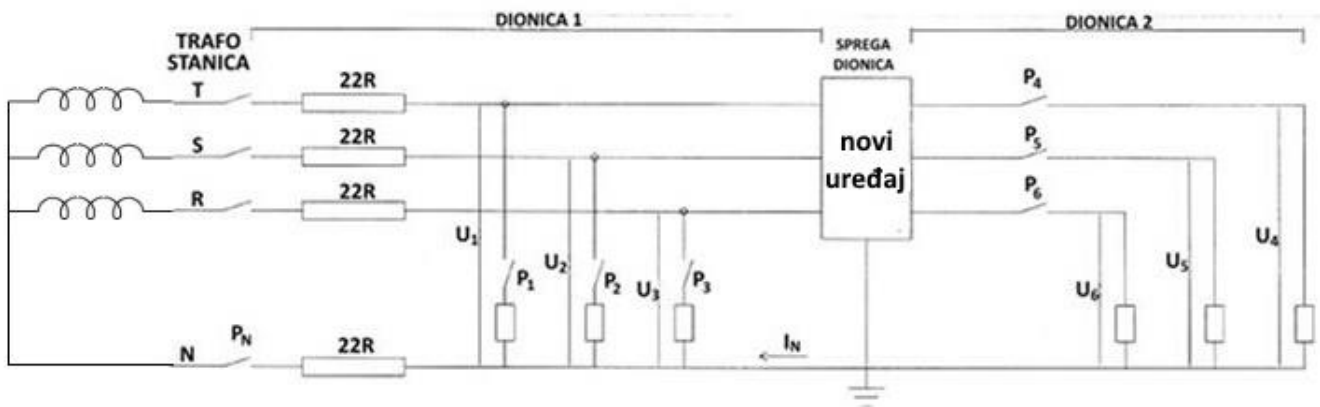
U ruralnim sredinama, elektrodistributivne mreže izvedene su sa monofaznim priključcima, gdje su potrošačke grupe na velikoj udaljenosti od pripadajuće trafo stanice, gdje u značajnoj mjeri dolazi do odstupanja napona (165 V) od standarda EN 50160. Rekonstruktivni zahvat, izgradnja sredjenaponskog voda sa trafostanicom, bi zahtjevao značajan investicioni poduhvat, a i nakon toga ponovo je za očekivati da dođe do problema sa odstupanjem napona od standarda EN 50160, s obzirom da su monofazne potrošačke grupe međusobno na velikim udaljenostima. Kao najjednostavnije svrsishodno rješenje, gdje bi se ostvarile značajne uštede u investiranju i vremenu realizacije, je ugradnja regulacionog transformatora „sistem VROT-18”. Sistem rada zasnovan je na simetriranju opterećenja, a svojom pogodnom spregom omogućava eliminisanje harmoničnih izobličenja koje generišu potrošači na dionici niskonaponskog voda koje napaja „sistem VROT-18“, dok sa druge strane omogućava povećanje selektivnosti i osjetljivosti reagovanja zaštitom. Korištenjem

„sistema VROT-18“ postoji niz prednosti, koje omogućavaju uštedu u investiranju od 60% do 700%.

U okviru zajedničkog projekta naučnoistraživačke zajednice i privrede Pilot-program „Sinergija“, između firme Energo-Group d.o.o. Istočno Sarajevo i Univerziteta u Istočnom Sarajevu, Elektrotehničkog fakulteta, trenutno se radi na poboljšanju verzije „sistema VROT-18“ i razvija se novi uređaj. Razvojem nove poboljšane verzije uređaja dolazi se do novog dostignuća u oblasti energetske efikasnosti i „Pametnih mreža“. Jedna od aktivnosti prije dobijanja završnog proizvoda je da se izvrše testiranja novog uređaja na eksperimentalnom simulatoru. Ovaj rad se ne bazira na objašnjavanju rada novog uređaja, kao ni na objašnjavanju razlika između novog uređaja i „sistema VROT-18“. Rad je baziran na objašnjavanju funkcija novog uređaja u niskonaponskoj mreži u pogledu simetriranja opterećenja. Struja kroz nulti provodnik jednaka je nuli, što je osnovni uslov simetričnog rada mreže napajane novim uređajem. Podatak za cijenu novog uređaja u odnosu na snagu niskonaponskog izvoda u koji se ugrađuje je komercijalni i nije relevantan za analizu provedenu u ovom radu.

III. EKSPERIMENTALNI SIMULATOR ZA TESTIRANJE NOVOG UREĐAJA

Simulaciono poređenje rezultata danas predstavlja veoma važan korak u razvijanju novih uređaja. Kroz simulaciona testiranja potrebno je izvršiti poređenje rezultata bez i sa ugrađenim novim uređajem. Osnovna uloga eksperimentalnog simulatora je da omogući neophodne vrijednosti električnih signala (napona i struje) na ulaznim i izlaznim priključcima novog uređaja, pomoću kojih je moguće ispitati različite režime njegovog rada i da se pokažu prednosti primjene novog uređaja u poboljšanju naponskih prilika potrošača. Na Sl. 1 prikazana je šema eksperimentalnog simulatora, dok je na Sl. 2 prikazan i fizički izgled simulatora za testiranje novog uređaja.



Slika 1. Električna šema eksperimentalnog simulatora za testiranje trofaznog novog uređaja

Osnovni elementi eksperimentalnog simulatora su:

- trofazni izvor napajanja (trafostanica),
- visokonaponski otpornici 22R,
- promjenjive otočne impedanse ulaznog kola,
- promjenjive impedanse trofaznog potrošača,
- šest prekidača P za kontrolu različitih režima rada,
- tri fazna i jedan neutralni provodnik,
- trofazni novi uređaj za regulaciju napona.

Parametri eksperimentalnog modela uređaja (skalirani model) su: $U_n = 420/242 \text{ V/V}$, $U_{\text{sek}} = 230 \text{ V}$, $S_n = 0,25 \text{ kVA}$, $u_k = 4\%$ i $\cos\varphi = 0,96$. Vrijednosti snaga za sve potrošače su jednake: $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = 128 \text{ VA}$.



Slika 2. Fizički izgled eksperimentalnog simulatora za testiranje novog uređaja

U istraživanjima, prvo su vršena ispitivanja za slučaj kada novi uređaj nije povezan u električno kolo simulatora. Ispitane su sve smislene kombinacije uklopnih stanja prekidača, koje su prikazane u Tabeli I. Sa 1 označen je prekidač kada je uključen, a sa 0 kada je isključen.

S obzirom da se u radu analizira regulacija napona u normalnom (bez kvara-kratkog spoja ili prekida) stacionarnom radnom režimu, na primjer analizirajući Tabelu I, za kombinacije od 11 do 13 prekidač PN je isključen, U tim slučajevima nije dozvoljen režim rada sa prekinutim

neutralnim provodnikom, ali je to realno stanje u distributivnoj mreži, kada dolazi do prekida nultog provodnika. I tu je izvršena analiza kako novi uređaj štiti potrošače od prisustva linijskog napona, što je prikazano u Tabeli II i Tabeli III, redni broj kombinacija od 11 do 13.

Pad napona na niskonaponskoj mreži je simuliran proticanjem struje u zavisnosti od opterećenja kroz otpornike 22R. Vrijednosti struje su u direktnoj srazmjeri sa padom napona na otporniku i prikazani su u Tabeli II. Simulacija je rađena za rad mreže $\cos\varphi = 1$ (sve su aktivni otpori).

Na osnovu različitih uklopnih stanja prekidača i njihovih kombinacija eksperimentalni simulator omogućava prilagođenje električnih uslova u testnoj električnoj šemi. Pomoću specijalnih uklopnih stanja prekidača u testnom električnom kolu moguće je stvoriti simetrične i nesimetrične signale napona i struje. U okviru simulatora postoji i mjerni sistem pomoću koga se mjere vrijednosti napona i struja na ulazu i izlazu novog uređaja, gdje se prati i vrijednost struje u neutralnom provodniku.

Na osnovu dobijenih rezultata moguće je utvrditi slučajeve u kojima naponske prilike odstupaju od propisanih vrijednosti prema zvaničnim standardima u vezi sa kvalitetom električne energije, gdje su od posebnog značaja slučajevi nesimetričnog napajanja, jer se njihov sve veći uticaj očekuje u distributivnim mrežama u budućnosti.

Na primjer, u Tabeli II, za redni broj kombinacije 11, naponi U_1 i U_4 jednaki su nuli za direktnu vezu bez novog uređaja, kada su prekidači P_1 i P_4 uključeni, a došlo je do prekida nultog provodnika. Pri prekidu nultog provodnika opterećeni potrošači na jednoj fazi imaju vrijednost napona nula, dok ostali neopterećeni ili opterećeni u različitim fazama bivaju na linijskom naponu.

TABELA I. UKLOPNA STANJA PREKIDAČA EKSPERIMENTALNOG SIMULATORA

Uklopna stanja prekidača eksperimentalnog simulatora							
Redni broj kombinacije	Oznake prekidača						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	PN
1.	0	0	0	0	0	0	1
2.	1	0	0	0	0	0	1
3.	1	1	0	0	0	0	1
4.	1	1	1	0	0	0	1
5.	1	1	1	1	0	0	1
6.	1	1	1	1	1	0	1
7.	1	1	1	1	1	1	1
8.	1	0	0	1	0	0	1
9.	1	1	0	1	0	0	1
10.	1	1	0	1	1	0	1
11.	1	0	0	1	0	0	0
12.	1	1	0	1	1	0	0
13.	0	0	0	1	1	1	0
14.	0	0	0	1	0	0	1
15.	0	0	0	1	1	0	1
16.	0	0	0	1	1	1	1

TABELA II. IZMJERENI NAPONI BEZ NOVOG UREĐAJA

Redni broj kombinacije	Izmjereni naponi bez novog uređaja						
	Oznake električnih veličina						
	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	U4 [V]	U5 [V]	U6 [V]	IN [A]
1.	229,8	231,0	229,6	229,7	230,3	228,7	0,000
2.	200,3	237,4	237,3	200,2	236,7	236,4	0,000
3.	207,3	207,8	243,6	207,2	207,2	242,7	0,000
4.	213,3	213,5	215,3	213,2	212,9	214,4	0,000
5.	190,8	218,1	220,4	190,4	217,5	219,6	0,606
6.	195,8	194,9	224,6	195,4	194,3	223,8	0,582
7.	200,6	199,1	201,1	200,2	198,5	200,2	0,000
8.	177,8	242,9	243,7	177,4	242,2	242,9	0,562
9.	185,1	213,7	248,4	184,7	213,2	247,5	0,585
10.	191,0	190,8	252,7	190,6	190,3	251,8	0,512
11.	0,00	396,7	398,2	0,00	395,6	396,9	0,000
12.	173,4	173,5	345,6	173,0	173,0	344,4	0,000
13.	215,8	213,5	213,7	215,4	212,9	212,9	0,000
14.	198,9	237,6	237,4	198,4	212,7	236,5	0,626
15.	206,3	208,2	242,7	205,8	212,7	241,9	0,600
16.	212,6	214,0	213,5	212,1	212,7	212,7	0,000

Nakon izvršenih ispitivanja kada novi uređaj nije povezan u električno kolo simulatora, prelazi se na drugi dio ispitivanja sa povezanim novim uređajem. Osnovni cilj je izmjeriti vrijednosti svih napona na priključcima uređaja, nakon njegove ugradnje, i to za različite režime rada. Rađena su mjerenja

napona na priključcima novog uređaja za smislene kombinacije uklopnih stanja prekidača. Rezultati ispitivanja dati su u Tabeli III. Referentna vrijednost je vrijednost u skladu sa standardom EN 50160.

TABELA III. IZMJERENI NAPONI SA NOVIM UREĐAJEM

Redni broj kombinacije	Izmjereni naponi sa novim uređajem						
	Oznake električnih veličina						
	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	U4 [V]	U5 [V]	U6 [V]	IN [A]
1.	227,3	227,6	227,6	236,6	235,5	235,3	0,000
2.	197,6	235,4	235,2	228,9	235,5	227,4	0,000
3.	204,7	205,8	240,1	235,0	242,8	226,9	0,000
4.	210,4	211,6	211,6	234,7	234,0	233,3	0,000
5.	203,0	203,7	211,1	217,4	231,0	230,5	0,000
6.	203,2	195,4	203,1	214,7	213,9	227,4	0,000
7.	195,5	195,6	195,2	211,9	211,1	210,7	0,000
8.	189,6	224,4	235,3	220,1	248,3	239,6	0,000
9.	197,2	196,8	241,2	217,5	240,9	240,1	0,000
10.	196,9	189,8	230,8	214,8	222,2	235,9	0,000
11.	0,00	372,3	386,5	233,1	248,3	247,1	0,000
12.	170,6	173,2	325,4	214,9	225,7	239,2	0,000
13.	190,8	192,8	223,9	226,3	226,0	224,4	0,000
14.	219,3	218,6	230,6	233,5	234,5	234,7	0,000
15.	219,5	208,3	220,2	230,1	221,9	230,5	0,000
16.	210,3	208,5	211,9	226,5	227,6	227,7	0,000

Poredeći rezultate iz Tabele II sa rezultatima iz Tabele III primjećuje se da na dionici voda 2, na kojoj su napajani potrošači preko novog uređaja, vrijednosti napona na potrošačima su u skladu sa standardom EN 50160. Sa druge strane vrijednosti napona na potrošačima dionice 2 bez novog uređaja nisu u skladu sa standardom EN 50160. Zaključuje se sljedeće:

a) Primjena novog uređaja blokira uspostavljanje struje u neutralnom provodniku na primarnoj strani kola. Na ovaj način su smanjeni gubici električne energije u neutralnom provodniku u slučajevima napajanja nesimetričnih potrošača koji izazivaju uspostavljanje struje u neutralnom provodniku.

b) Vrijednosti napona na priključcima potrošača ostaju u propisanim granicama u slučajevima značajnog smanjenja

napona na primarnoj strani novog uređaja (uključenje prekidača P1, P2 i P3).

c) Primjena novog uređaja omogućava značajno veću simetriju napona napajanja potrošača. Čak i u slučaju kada je vrijednost napona jedne od faza na primarnoj strani jednak nuli, na sekundarnoj strani novog uređaja postoje značajne vrijednosti napona uz značajno smanjenu naponsku nesimetriju.

IV. ZAKLJUČAK

Za elektrodistributivni sistem jako bitno je voditi računa o kvalitetu isporuke električne energije, što podrazumjeva da su napon i frekvencija u okviru dozvoljenih odstupanja od nazivnih vrijednosti i oblika. Loš kvalitet isporuke električne energije najizraženiji je kod najudaljenijih potrošača od pripadajuće transformatorske stanice. Predlaganjem novog tehnološkog rješenja, za dobijanje konačnog proizvoda, potrebno je proći kroz niz aktivnosti, od kojih je jedna od vrlo bitnih aktivnosti eksperimentalno simulaciona testiranja. Za te potrebe projektovan je i realizovan eksperimentalni simulator. Poređenjem dobijenih rezultata bez novog uređaja i sa novim uređajem pokazano je niz prednosti njegove primjene. Sve aktivnosti za razvijanje novog uređaja usklađuju se sa relevantnim tehno-ekonomskim analizama. Očekivanja su da primjenom novog tehnološkog rješenja u elektrodistributivnim mrežama dođe do kvalitetnije isporuke električne energije, kao i do smanjenja vremena trajanja beznaponske pauze, a sve usklađeno sa relevantnim standardom EN 50160. Biće omogućena integracija proizvoda u „Pametne mreže“, što je u skladu sa politikama svjetskih distributivnih preduzeća.

LITERATURA

- [1] EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, International Standard, 1999.
- [2] A. Lemez, A. Simović, „Jednostavno i efikasno rješenje za sanaciju naponskih prilika u distributivnoj mreži,“ 10. Savetovanje CIRED Srbija, Vrnjačka Banja 2016, Ref. EE 1.03.
- [3] Energo-Group Canada Inc. and Energo-Group d.o.o. East Sarajevo, VROT-18-X, Available online: <https://www.egcanada.ca/PDF/VROT-%2018%20English.pdf>.

- [4] M. S. Chen, R. R. Shoultz, W. J. Lee, „Physical simulation power system laboratory,“ *1991 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91.*, Hong Kong, 1991, pp. 859-864.
- [5] G. Tu, Z. Wen, H. Hu, „Principle and application of power system dynamic simulation,“ *1993 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-93.*, Hong Kong, 1993, pp. 639-643
- [6] G.F. Lauss, M.O. Faruque, K. Schoder, C. Dufour, A. Viehweider, J. Langston, „Characteristics and design of power hardware-in-the-loop simulations for electrical power systems,“ *IEEE Trans. Indust. Electron.* vol. 63, no. 1, pp. 406-417, 2016.
- [7] V.H. Nguyen, Y. Besanger, Q.T. Tran, C. Boudinnet, T.L. Nguyen, R. Brandl, T.I. Strasser, „Using power-hardware-in-the-loop experiments together with co-simulation for the holistic validation of cyber-physical energy systems,“ *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1-6, 2017.

ABSTRACT

Distribution system companies are often faced with the problem of low power quality delivered, which is defined by standard EN 50160. Area with violated power quality is often called „Gray zone“. Modern, simple and economic solution for the „Gray zone“ problem could be the installation of low voltage regulating transformer „system VROT-18“. Modern technological solutions are used for the improvement of „system VROT-18“ and development of the new device as a part of ongoing research. Physical simulator for testing of the new device is presented in this paper. The simulation results are shown for the cases with and without the installation of the new device. The application of physical simulator for experimental testing represents an important step prior to installation of the device in real network.

PHYSICAL SIMULATOR FOR TESTING OF THE NEW DEVICE FOR LOW VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEM ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT

Aleksandar Lemez
Aleksandar Simović
Zlatan Stojković