Analiza utjecaja vjetroelektrane snage 10 MW na distribucijsku mrežu

Jaredić, Krunoslav

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:242606

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

ANALIZA UTJECAJA VJETROELEKTRANE 10 MW NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU

Diplomski rad

Krunoslav Jaredić

Osijek, 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Zadatak diplomskog rada 1
2. TEORIJSKA ANALIZA UTJECAJA VJETROELEKTRANE NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU 2
2.1. Regulacija napona 2
2.2. Kvaliteta injektirane elektirčne energije 5
2.2.1. Naponski propadi 5
2.2.2. Naponski harmonici 6
2.2.3. Flikeri 8
2.3. Stabilnost napona i kuta 9
2.3.1. Stabilnost kuta 9
2.3.2. Stabilnost napona 10
2.4. Kompenzacija jalove snage 11
2.5. Regulacija frekvencije 13
2.6. Regulacija snage 14
2.7. Zaštita 15
2.8. Pouzdanost i raspoloživost 17
3. SIMULACIJSKI DIO ANALIZE UTJECAJA VJETROELEKTRANE 10 MW NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU 18
3.1. Opis vjetroelektrane „Kom-Orjak-Greda“ 18
3.2. Opis okolne distribucijske mreže 21
3.3. Proračun opterećenja trafostanica 10/0,4 kV 23
3.4. Simulacija utjecaja vjetroelektrane 10MW na distribucijsku mrežu 24
4. ZAKLJUČAK 38
POPIS LITERATURE 39
SAŽETAK 40
ABSTRACT 40
ŽIVOTOPIS 41
POPIS SLIKA 42
POPIS TABLICA 43

1. UVOD

Napredovanjem i stalnim usavršavanjem tehnologija u elektronici i elektroenergetici sve više raste trend instaliranja vjetroelektrana kako u Hrvatskoj tako i u Europskoj Uniji. Instaliranjem vjetroelektrana dobivamo čistu, jeftinu i za okoliš prihvatljivu energiju, ali ona sa sobom donosi i brojne nedostatke koje ne smijemo zanemariti, već ih dobro proučiti i omogućiti da se elektrana može priključiti na mrežu. Energija vjetra je promijenjiva, stoga energija koju dobivamo iz vjetroelektrana nije konstantna nego je stalno promjenjiva što nam donosi stalne promjene iznosa napona, iznosa frekvencije, kvalitete električne energije i brojnih utjecaja. Ograničenja koja postoje za priključenje vjetroelektrane na distribucijsku mrežu propisana su mrežnim pravilima, zbog toga rad vjetroelektrane moramo prilagoditi istim pravilima kako bi elektrana mogla nesmetano raditi i što bolje i efikasnije iskoristiti energiju vjetra.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je dati teorijski pregled utjecaja vjetroelektrane na distribucijsku mrežu. Nadalje, u računalnom programu potrebno je modelirati promatranu elektranu s okolnom distribucijskom mrežom. Uz to, potrebno je izvršiti analizu utjecaja vjetroelektrane na strujno-naponske prilike u mreži u uvjetima minimalnog i maksimalnog opterećenja mreže

2. TEORIJSKA ANALIZA UTJECAJA VJETROELEKTRANE NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU

Povećanjem integracije vjetroelektrana na distribucijsku mrežu, stvaraju se brojni problemi u elektroenergetskom sustavu. Na osnovu vremenskih prognoza unaprijed se mogu odrediti brzine vjetra u kratkom razdoblju, ali se ne mogu predvidjeti velike i male dinamičke promjene koje nastaju oko predviđene srednje brzine vjetra. Te dinamičke promjene imaju utjecaj na iznos i kvalitetu predane energije u mrežu što ima za posljedicu probleme pri regulaciji napona mreže, frekvencije mreže i kvalitete injektirane električne energije. Prilikom priključenja vjektroelektrane na distribucijsku mrežu treba obratiti pozornost na sljedeće tehničke aspekte:

- Regulacija napona
- Kvaliteta injektirane električne energije
- Stabilnost napona i kuta
- Kompenzacija jalove snage
- Regulacija frekvencije
- Regulacija snage
- Zaštita
- Pouzdanost i raspoloživost

2.1. Regulacija napona

Kolebanja distribucijskih napona i jalove snage jedan su od najčešćih problema u radu vjetroelektrana budući da na unutarnji napon unutar vjetroelektrane mogu utjecati parametri mreže i brzina vjetra pod radom u normalnim uvjetima. Potreba za automatskom regulacijom napona vjetroelektrane može nastati kod generatora velike snage, ali u slučaju kada su vjetroelektrana i kupci povezani na iste sabirnice trafostanice. Kako bi se smanjile promjene napona zbog rada vjetroelektrane, može se zahtijevati ugradnja trenutne kompenzacije na regulatore napona u trafostanici. Utjecaj naponskih kvarova na generatorima mogu dovesti do izvanrednih događanja u sustavima za proizvodnju energije vjetra, stoga stabilizacija distribuiranih napona duž vodova i sigurnosni pogon vjetroelektrana u slaboj mreži izmjenične struje postali su glavna briga za autonomnu energetsku mrežu. [3]

Slučaj kada generator preko nadzemnog voda napaja veliki sustav prikazan je na slici 1. Pretpostavka je da je sustav dovoljno velik te da je napon fiksan. Potrebno je promatrati promjene napona generatora s generiranom aktivnom i reaktivnom snagom. Napon generatora opisan je izrazom:

$$\vec{V}_g = \vec{V} + (R + jX)\vec{I} \tag{2-1}$$

Gdje je:

$\vec{V}_g$– napon generatora

$\vec{V}$– napon mreže

R – reaktancija nadzemnog voda

X – impedancija nadzemnog voda

$\vec{I}$– struja nadzemnog voda

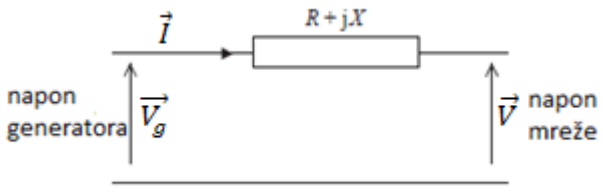
Promatrat će se učinak aktivne i jalove snage zasebno. Prvo s obzirom na aktivnu snagu, struja će biti u fazi s naponom generatora. Odnos između napona generatora i napona mreže može se vidjeti iz fazorskog dijagrama prikazanog na slici 2, na kojoj je vidljivo da je povećanje napona zbog proizvodnje aktivne energije približno jednako izrazu:

$$\Delta\vec{V_a} \approx R\vec{I} = \frac{R\vec{V_g}\vec{I}}{\vec{V_g}} = \frac{RP}{\vec{V_g}} \tag{2-2}$$

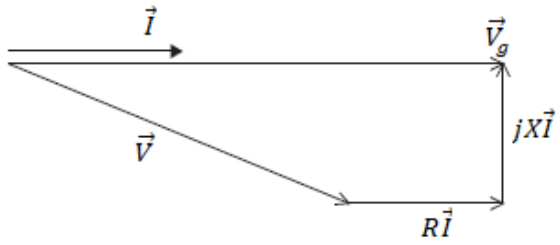
Gdje je:

$\Delta\vec{V_a}$ – povećanje napona zbog proizvodnje aktivne energije

P – aktivna snaga

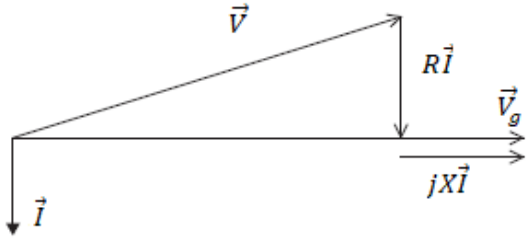


Slika 1: Shema generatora koji napaja veliki sustav preko nadzemnog voda[3]



Slika 2: Regulacija napona za aktivnu snagu[3]

Kod regulacije napona za reaktivnu snagu pozitivna potrošnja reaktivne energije za opterećenje ima za posljedicu kašnjenje struje za naponom generatora za 90°. Ovaj slučaj prikazan je fazorskim dijagramom na slici 3.



Slika 3: Regulacija napona za reaktivnu snagu[3]

Na slici 3 vidljiv je porast napona uslijed proizvodnje jalove snage. Porast napona možemo aproksimirati izrazom:

$$\Delta\overrightarrow{V_r} \approx X\vec{I} = \frac{X\overrightarrow{V_g}\vec{I}}{\overrightarrow{V_g}} = \frac{XQ}{\overrightarrow{V_g}} \tag{2-3}$$

Gdje je:

$\Delta\overrightarrow{V_r}$ – promjena napona uslijed povećanja reaktivne snage

X – impedancija nadzemnog voda

Q – reaktivna snaga

Ukupni porast napona koji je generiran daje se izrazom:

$$\Delta\vec{V} = \Delta\overrightarrow{V_a} + \Delta\overrightarrow{V_r} \approx \frac{RP + XQ}{\overrightarrow{V_g}} \tag{2-4}$$

U prijenosnim mrežama R je malen u odnosu na X, a napon je uglavnom određen samo reaktivnim tokovima. Vjetroelektrane često se spajaju na distribucijske razine napona. Kontrola napona unutar distribucijske mreže obično se provodi pomoću automatske kontrole izmjenjivača unutar transformatorske stanice. Svi sinkroni generatori imaju mogućnost daljinskog upravljanja uključujući sve jedinice koje šalju tržišni operateri. Tamo gdje su dostupne vjetroturbine tipa III ili tip IV koje prihvaćaju podešavanja reaktivne snage također mogu biti uključene u proces kontrole napona.

Kontrola napona organizirana je u dvije razine:

- Na unutarnjoj razini vjetroturbine kontroliraju sve napone prema zadanim točkama. Ovo je brza kontrola.
- Vanjska razina koja podešava i koordinira izlazni napon iz pojedinih turbina kako bi zadovoljili potrebne uvijete na kontrolnom mjestu. Ova metoda sporija je od prethodne metode. Uobičajeno je da vjetroelektrane reguliraju napon sabirnica na mjestu međusobnog povezivanja. Ukoliko napon mreže padne ispod 85% nazivnog napona, tada to odgovara pod uzbuđenom radu generatora, a vjetroturbina mora biti odvojena od mreže najkasnije s vremenom kašnjenja od 0,5 s

2.2. Kvaliteta injektirane električne energije

S obzirom na kvalitetu napona možemo razmatrati nekoliko utjecaja, a to su:

- naponski propadi,
- harmonici,
- flikeri.

2.2.1. Naponski propadi

Definirani su prema normi EN50160 kao kratkotrajno, nepredviđeno smanjenje opskrbnog napona u elektroenergetskom sustavu na vrijednost od 90% pa do 1% nazivnog napona nakon čega slijedi ponovno stabiliziranje prvobitne vrijednosti nazivnog napona. Naponski propadi u mreži najčešće se javljaju zbog kvarova i velikih industrijskih opterećenja. Dozvoljeni broj propada u jednoj godini kreće se u opsegu od nekoliko desetaka pa do tisuću, ovisno o vremenu

trajanja i amplitudi naponskog propada. Pokretanje turbine vjetroelektrane može dovesti do smanjenja napona nakon kojeg slijedi stabilizacija u trajanju od nekoliko sekundi. Ako pretpostavimo da svaka vjetroturbina karakterizira čimbenik faktora promjene napona $k_u(\psi_k)$, može se procijeniti iznenadno smanjenje napona:

$$d = 100k_u(\psi_k)\frac{S_n}{S_k} \tag{2-5}$$

Budući da se veći broj vjetroturbina u vjetroelektranama vjerojatno neće pokrenuti istovremeno gore navedena funkcija ne predstavlja funkciju broja vjetroturbina te iz tog možemo zaključiti da na primjeru sustava padovi napona ne predstavljaju ograničenje za daljnje širenje vjetroelektrane.[1]

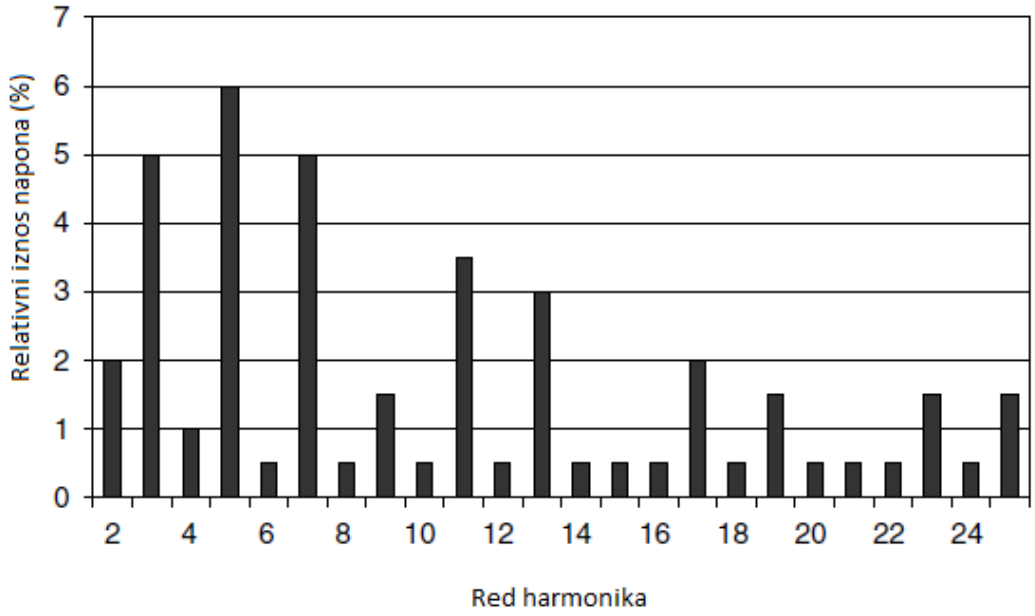
2.2.2. Naponski harmonici

Nelinearna opterećenja, odnosno opterećenja koja troše struju koja nije linearna funkcija napona, iskrivljuju valni oblik napona i mogu u nekim slučajevima uzrokovati pregrijavanje nultog vodiča i transformatora električne distribucije, kvarove elektroničke opreme te narušavanje komunikacijskih sustava. Najbolji primjeri nelinearnih opterećenja su elektroenergetski pretvarači, lučne peći, elektrolučni aparati za zavarivanje, fluorescentne svjetiljke i još mnogi drugi. Iskrivljeni valni oblik može se definirati kao zbroj sinusnog valnog oblika s različitim frekvencijama i amplitudama primjenom Fourierove transformacije. Sinusoide s frekvencijama jednakima cijelom broju osnovne frekvencije označavamo kao harmonike. Harmonijski napon U_h, gdje h označava harmonijski redoslijed, odnosno višekratnik broja 50, može se pojedinačno procijeniti njihovom relativnom amplitudom.

$$u_h = \frac{U_h}{U_n} \tag{2-6}$$

Prema normi EN50160, 10 min srednje vrijednosti svakog u_h bit će manje od granica prikazanima na slici tijekom 95% tjedna. Ukupna harmonijska distorzija THD napona računa se prema slijedećoj jednadžbi i iznosi 8%

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40}(u_h)^2} \tag{2-7}$$



Slika 4: Vrijednosti pojedinih harmonijskih napona (postotak od nazivnog napona prema normi EN50160)

Izvor: izrada autora

Obično se očekuje da će vjetroturbine s indukcijskim generatorom spojene na mrežu bez intervencijskog pretvarača električne energije i takvim načinom spajanja narušiti valni oblik napona. Energetska elektronika koja se primjenjuje za soft-start može u mrežu kratkotrajno injektirati struje viših harmonika. Dakle, za sustav s fiksnim brzinama vjetra ne postoje ograničenja za harmonike. Međutim ako razmatramo turbine s promjenjivim brzinama vjetra koje koriste energetske pretvarače, trebali bi procijeniti emisiju harmonijskih struja prema definiranim ili proračunatim granicama. Pretvarači temeljeni na tiristorskoj tehnologiji emitiraju struje viših harmonika koje mogu utjecati na naponske harmonike, za koje su granice postavljene u normi EN50160. Takvi pretvarači se rijetko koriste u novim vjetroagregatima. Pretvarači temeljeni na tranzitorskoj tehnologiji rade pri sklopnim frekvencijama iznad 3 kHz, te one obično imaju zanemariv utjecaj na valni oblik napona i kao takve ne predstavljaju ograničenje za razvoj vjetroelektrane. Povezivanje elektroničke opreme mijenja harmonijsku impendanciju mreže; npr. kondenzatorske baterije ugrađene u vjetroelektrane mogu mijenjati rezonantnu frekvenciju harmonijske impedancije. Zbog toga za mreže s značajnim harmonijskim izvorima, priključenje novih vjetroelektrana s kondenzatorskim baterijama treba pažljivo projektirati kako bi se izbjegao negativan utjecaj harmonijske impedancije. [1]

2.2.3. Flikeri

Predstavljaju brze promjene napona koji su obično posljedica brzih promjena opterećenja ili prekida rada u sustavu. Norma EN50160 ukazuje da bi za niski napon brzina promjene napona općenito bila manja od 5% nazivnog napona, iako u nekim situacijama može doći do promjene i do 10% nazivnog napona. Takva promjena može se pojaviti nekoliko puta dnevno. Za srednji napon norma označava granice 4% i 6 % nazivnog napona. Ozbiljnost treperenja može se definirati kao kratkotrajni P_{st} mjeren tijekom razdoblja od 10 minuta ili kao dugoročna vrijednost P_{lt} koja se mjeri u razdoblju od 2 sata. Prema EN50160 dugoročna jakost treperenja mora biti P_{lt} <1 tijekom 95% tjedna. Vjetroelektrane emitiraju treperenje uslijed prekidačkih operacija kao što su pokretanje i brze promjene izlazne snage tijekom kontinuiranog rada.

Prekidačko djelovanje:

- postupak za procjenu emisije treperenja tijekom prekidačkih operacija pretpostavlja da svaka vjetroturbina karakterizira faktor treperenja $k_f(\psi_k)$ što je normalizirana mjera emisije treperenja uslijed jednostrukog postupka komutacije. Najčešći postupak komutacije je stavljanje u pogon. Za svaku turbinu moguće je na osnovu podatka o maksimalnom broju pokretanja izračunati emisijsko treperenje. Emisija treperenja zbog pokretanja može biti ograničenje za rad vjetroelektrane, ali se s drugom vrstom vjetroturbine koja ima manji faktor k_f može prevladati ovo ograničenje.

Kontinuirano djelovanje:

- postupak za procjenu emisije treperenja zbog kontinuiranog rada pretpostavlja da svaku vjetroturbinu karakterizira koeficijent $c(\psi_k, v_a)$ što je normalizirana mjera maksimalne očekivane emisije treperenja tijekom kontinuiranog rada vjetroturbine. Kako bi se pronašla emisija treperenja iz jedne vjetroturbine, koeficijent treperenja s relativno $\psi_k \; i \; v_a$ jednostavno se pomnoži s S_n/S_k. [1]

2.3. Stabilnost napona i kuta

Nakon povezivanja vjetroelektrane na mjestu priključka potrebno je analizirati stabilnost napona i kuta distribucijskog sustava. Vjetroelektrana koja je spojena na distribucijski sustav mora imati mogućnost izdržati sljedeće kvarove bez gubitka stabilnosti rada:

- trofazni kratki spoj na bilo kojem vodu, kabelu ili transformatoru s dužim vremenom isklopa kvara i bez ponovnog automatskog uklopa oštećenog elementa. Redoslijed događaja prilikom pojave kvara je slijedeći: pojava kratkog spoja, detekcija i uklanjanje elementa na kojem je došlo do kratkog spoja (bez ponovnog automatskog uklopa). Vrijeme uklanjanja kvara najčešće iznosi 0,5 *s*; a na nekim mjestima moguće je čak i više.
- dvofazni kratki spoj na bilo kojem vodu ili kabelu s neuspješnim ponovnim automatskim uklopom. Redoslijed događaja prilikom pojave kvara je slijedeći: pojava kratkog spoja, detekcija i isklop elementa na kojemu je došlo do kratkog spoja, neuspješan automatski ponovni uklop i trajni isklop elementa koji je u kvaru. Vrijeme otklanjanja kvara obično iznosi 0,5 *s*; a u slučaju neuspješnog automatskog ponovnog uklopa može biti u intervalu od 0,1 *s* do 0,15 *s*.

Ovi zahtjevi ne primjenjuju se kod kvarova koji nastaju na elementima radijalnog razdjelnika preko kojeg je vjetroelektrana spojena na sabirnicu. U takvim situacijama vjetroelektrana ostaje izolirana od ostatka sustava, a rotor generatora povećava svoju brzinu iz razloga što se električna energija ne isporučuje u mrežu. Stabilnost se treba procijeniti s obzirom na kvarove koji se događaju u različitim stanjima normalnog rada kao i u stanju koje se javlja zbog redovitog održavanja sustava. Vjetroelektrana bi trebala bez diskontinuiteta u uvjetima priključenja podnijeti najmanje tri greške tijekom dvije minute. Ovaj zahtjev uglavnom je usmjeren na osiguravanje dovoljne pomoćne opskrbe vjetroelektrane.

2.3.1. Stabilnost kuta

Stabilnost kuta rotora je sposobnost sinkronih strojeva međusobno povezanog elektroenergetskog sustava da održe sinkronizam nakon poremećaja. Sinkronizacija kuta rotora ovisi o različitim fizičkim čimbenicima u elektroenergetskom sustavu, uglavnom o komponenti

sinkronizacijskog momenta i komponenti prigušnog okretnog momenta. Budući da se snaga vjetra uvodi u elektroenergetske sustave, konvencionalna generacija će biti zamijenjena kako bi se prilagodila rastućoj razini porasta vjetrogeneratora. Konvencionalna generacija ima veliku inerciju sustava, što osigurava sinkronizacijski zakretni moment i prigušni zakretni moment u sustavu. Nedostatak sinkronizacijskog okretnog momenta rezultira aperiodnom ili neoscilarnom nestabilnošću, dok nedostatak prigušnog momenta rezultira oscilatornom nestabilnošću.
Stabilnost kuta rotora može se podijeliti u dvije potkategorije:

- stabilnost kuta rotora malog poremećaja ili stabilnost malog signala
- stabilnost kuta rotora velikog poremećaja ili prijelazna stabilnost

Klasifikacija stabilnosti kuta rotora malog poremećaja i velikog poremećaja zahtijeva različite analitičke pristupe koji koriste dinamičke i statičke komponente elektroenergetskog sustava. Stabilnost malog poremećaja procjenjuje stabilnost sustava linearizacijom oko signalne radne točke, dok prijelazna stabilnost procjenjuje stanje sustava kroz analizu vremenske domene. [1]

2.3.2. Stabilnost napona

Drugi aspekt stabilnosti elektroenergetskog sustava je stabilnost napona elektroenergetskog sustava pod visokim prodorom vjetra (većim od 30%). Poput stabilnosti kuta rotora, stabilnost napona elektroenergetskog sustava može se razložiti u detaljnije aspekte. U ovom slučaju promatrat će se stabilnost napona vezana s malim i velikim poremećajima. Mali poremećaji nastaju uslijed stalnog oscilacijskog opterećenja i u slučaju proizvodnje energije vjetra, variraju aktivnu snagu. Veliki poremećaji nastaju kada dođe do gubitka proizvodnje, grešaka ili slučajnih događaja. Stabilnost napona može se promatrati i kroz dva različita vremenska okvira: kratkoročno i dugoročno. Kratkotrajna stabilnost napona uključuje dinamiku komponenata brzog djelovanja opterećenja kao što su indukcijski motori, elektronski upravljana opterećenja i HVDC pretvarači. Kratkotrajna stabilnost napona događa se u vremenskom okviru *sekundi* i općenito se bilježi kroz simulaciju vremenske domene pomoću odgovarajućeg softvera. Dugotrajna stabilnost uključuje sporo djelovanje opreme u sustavu kao što su kolebanje opterećenja i snage, mijenjanje preklopki transformatora i generator ograničenih struja. Dugotrajna stabilnost napona dobiva se analizom i simulacijom protoka struje.

2.4. Kompenzacija jalove snage

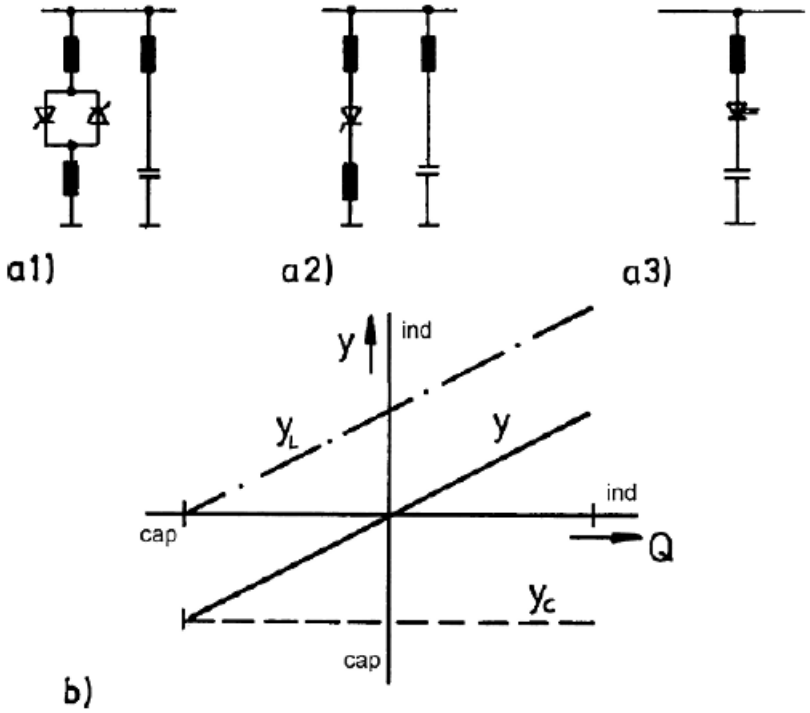
Asinkroni strojevi razvijaju svoj tok privlačenjem reaktivne snage preko terminala. U slučaju sinusoidalnih struja i napona faktor snage može se prikazati kao:

$$cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \tag{2-8}$$

gdje je Q_1 jalova snaga, a S_1 prividna snaga. U opskrbnim mrežama $cos\varphi$ može se poboljšati (povećati) pomoću kompenzacijskog uređaja. U slučaju samostalnog rada sve potrebne jalove snage moraju se isporučiti samostalno. U izmjeničnim mrežama poznato je da se dio induktivne reaktivne snage kompenzira korištenjem kondenzatora paralelno s namotom statora, kako bi se postigao faktor snage 0,9-0,95. U trofaznom krugu u spoju zvijezda, korištenjem kapaciteta *C* po fazi, reaktivna snaga može se iskazati kao:

$$Q = 3 \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C \tag{2-9}$$

Pomoću kondenzatorskih baterija može se postići stupnjevano podešenje jalove snage. Da bi se dobila neprekidna podesiva kompenzacija, primjenjuju se različiti pojmovi. [2]



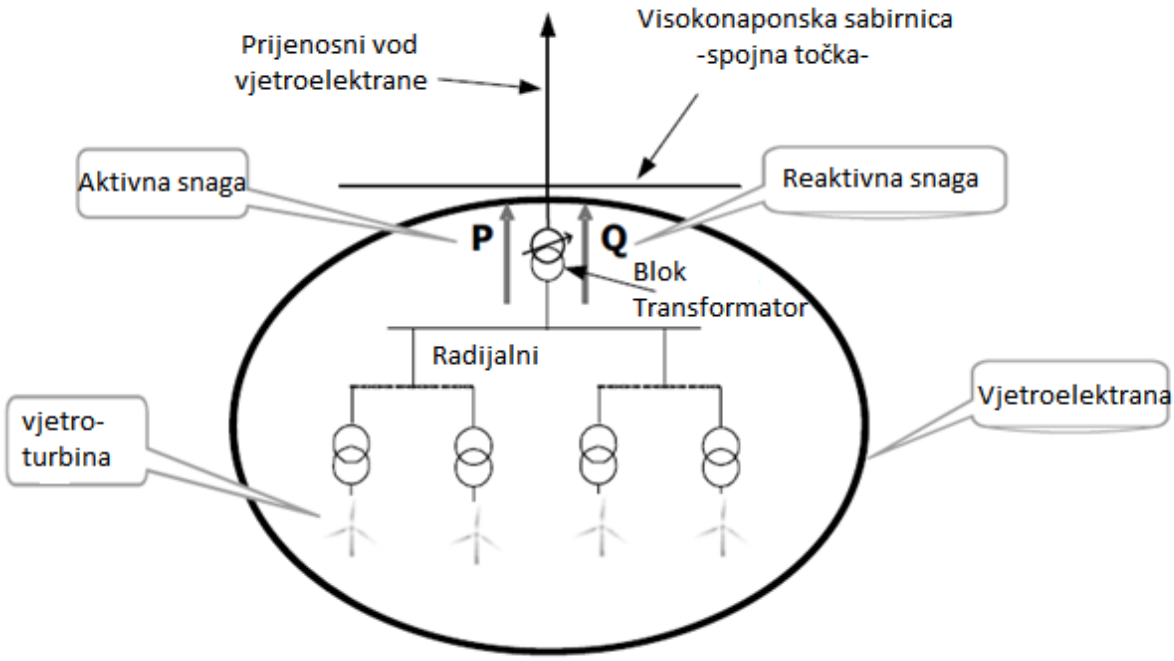
Slika 5: Koncepti kompenzacijskih uređaja: a) osnovni sklopovi; b) ulazna karakteristika [2]

- fazno kontrolirano A.C. induktivno opterećenje kondenzatora. Napon preko induktivnosti je podesiv po faznoj kontroli, dajući željenu reaktivnu (induktivnu) snagu. Zajedno s

reaktivnom (kapacitivnom) snagom kondenzatora zadane vrijednosti, rezultirajućem jalova snaga je podesiva i može biti dizajnirana tako da pokrije oba znaka reaktivne snage (A_1).

- Fazno upravljivi ispravljač s induktivnom pohranom energije i kondenzatorom. Na D.C. strani ispravljača iduktivitet je skladišni element. Pod faznom kontrolom, ispravljač troši reaktivno opterećenje koje je podesivo i utječe zajedno s kondenzatorom zadane vrijednosti na rezultirajuću jalovu snagu kao i u prethodnom slučaju (A_2).
- Samostalni pretvarač s kapacitivnim skladištem energije. Aktivni prednji pretvarač s iduktivitetom na A.C. strani i kapacitet kao uređaj za pohranu na D.C. strani može isporučiti i apsorbirati jalovu snagu (A_3).

Uređaje za kompenzaciju reaktivne snage treba instalirati na mjestu spajanja vjetroelektrane u slučajevima kada kapacitet kompenzacije Q nije dovoljan. Za vjetroelektranu koja je izravno priključena na javnu mrežu, kapacitet kapacitivne jalove snage trebao bi nadoknaditi ne samo gubitak reaktivne snage kolektivnog sustava vjetroelektrane i transformatora već i polovicu jalovih gubitaka nastalih u prijenosnim vodovima vjetroelektrane kao što je prikazano na slici.



Slika 6: Definicija vjetroelektrane i tokove snage

Induktivna reaktivna snaga trebala bi nadoknaditi polovicu pune jalove snage predviđenog prijenosnog voda. Za vjetroelektranu unutar velikih vjetroparkova iznos kapacitivne jalove snage trebao bi nadoknaditi sve gubitke jalove snage predodređenog prijenosnog voda, a iznos induktivne reaktivne snage mora nadoknaditi svu punu jalovu snagu prijenosnog voda.[1]

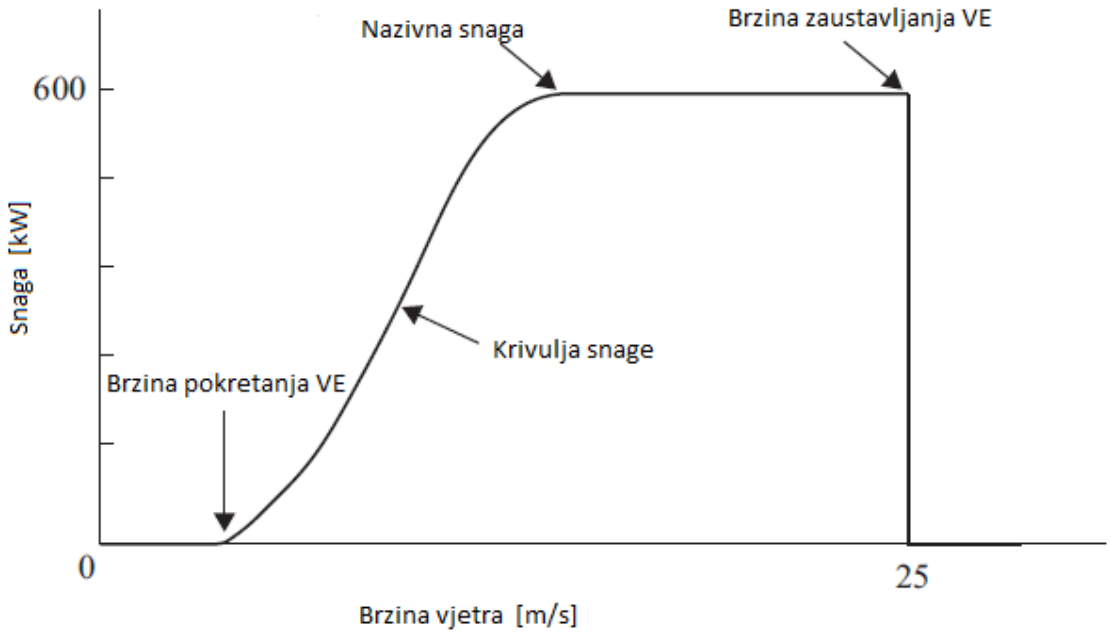
2.5. Regulacija frekvencije

Sve većom integracijom vjetroelektrana na mrežu susrećemo se sa sve manjom inercijom mreže koja je izvedena iz konvencionalnih elektrana. Stoga je uloga primarne regulacije frekvencije vjetroturbina i vjetroelektrana izrazito potrebna kako bi smo održali iste razine stabilnosti sustava. Regulacijom frekvencije smatra se kontrola iznosa frekvencije sustava održavanjem stalne ravnoteže snage koja se proizvodi i troši u stvarnom vremenu. Kada se u mreži pojavi nekakav iznenadni poremećaj, dolazi do razlike između proizvedene i utrošene djelatne energije, te se javlja neravnoteža što ima za posljedicu odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti.
Za vjetroturbine s fiksnim i varijabilnim brzinama regulacija frekvencije može se izvesti laganim povećanjem nominalnog kuta nagiba noža. Strojevi s fiksnim brzinama imaju tendenciju da budu osjetljivi na promjene u kutu nagiba u usporedbi sa strojevima s promjenjivom brzinom. Dakle, izlazne veličine vjetroturbine mogu se podesiti u ovisnosti s varijacijama frekvencije, slično upravljanju regulatorom na konvencionalnom generatoru. U ovakvim slučajevima smanjenje frekvencije (potrošnja veća od proizvodnje) uzrokuje smanjenje kuta nagiba noža lopatice a samim time povećanje izlazne električne energije. Suprotno tome povećanje frekvencije (proizvodnja veća od potrošnje) uzrokuje povećanje kuta nagiba noža lopatice i smanjenje proizvodnje električne energije.
Za turbine s promjenjivom brzinom regulacija snage može se postići i promjenom brzine rotora – malo smanjenje brzine vrtnje od optimalnog omjera brzine uzrokovat će smanjenje proizvedene električne energije. Na taj način postiže se kontrola brzine vrtnje primjenom energetske elektronike i nisu potrebni pokretni dijelovi. Ovaj način suprotan je od regulacije nagona lopatica, pa je stoga kontrola brzine prikladna za kontinuirano, fino reguliranje frekvencije. Kontrola nagiba lopatica može pružiti brzo djelovanje, grubu kontrolu, kako za regulaciju frekvencije tako i za rezervu u slučaju nužde. [3]

Mnoge dvostrano napajane vjetroturbine mogu prilagoditi svoje snage u realnom vremenu kao odgovor na promjene frekvencije u mreži. Ovakva kontrola provodi se u vjetroelektranama gdje se smatra da je nužno sudjelovati u regulaciji frekvencije mreže.[1]

2.6. Regulacija snage

Primarni cilj dizajna kontroliranog sustava vjetroturbine je optimizirati proizvodnju snage koja se predaje u mrežu. Krivulja snage vjetroagregata prikazana slikom 7 pokazuje odnos između početne brzine vjetroagregata i brzine vjetra kojim se postiže dobivanje maksimalne snage iz energije vjetra koji prelazi preko lopatica rotora.



Slika 7: Krivulja snage i vjetroturbine

Vjetroturbine s fiksnim brzinama su one koje koriste asinkroni generator izravno spojen na mrežu i one mogu koristiti jednu od brojnih tehnika za regulaciju snage pri povećanim brzinama vjetra:

- Pitch regulacija – noževi lopatica se fizički zakreću oko njihove uzdužne osi
- Kontrola lopatice – kut noža je fiksan, ali aerodinamički učinak je modeliran tako da se lopatica zaustavlja pri velikim brzinama
- Pomoćna regulacija lopatice – razvijena je tako da se lopatice polako okreću oko svoje uzdužne osi a glavni upravljački mehanizam zaustavlja
- Zakretna kontrola – kompletna gondola se rotira oko tornja kako bi se rotor odmaknuo od kritične brzine vjetra. Ovakav način regulacije rijetko se koristi.

Vjetroturbine s promjenjivim brzinama vjetra spojene su na mrežu pomoću energetske elektronike te obično koriste regulaciju noževa lopatice pri velikim brzinama vjetra. Vjetroelektrane snagu reguliraju i prema nalogu koji šalje dispečerski centar mrežnog operatora i to u sljedećim slučajevima:

- U slučaju kvara mreže ili posebnog načina rada
- U slučaju kada je frekvencija mreže viša od 50,2 Hz
- U slučaju situacije u kojoj rad vjetroelektrane ugrožava stabilnost i sigurnost elektroenergetske mreže [1]

2.7. Zaštita

Zaštitom distribucijske mreže smatra se sposobnost vjetroturbine da zadovolji granične vrijednosti zaštite mreže koje su definirane mrežnim pravilima operatora. Opseg i vrsta električnih zaštitnih funkcija u vjetroturbini može se podijeliti u dvije skupine. Jedna je potreba za zaštitom vjetroturbine, a druga za sigurno funkcioniranje mreže u svim okolnostima. Kvarovi vezani za prvom skupinom su kratki spojevi u vjetroturbini, prekomjerna proizvodnja koja uzrokuje toplinska opterećenja, kvarovi koji uzrokuju visoke i eventualno opasne prenapone. Druga skupina služi za prikaz učinkovitosti. Cilj je odvojiti vjetroturbinu od mreže kada postoji opasnost za druge potrošače ili operativno osoblje. Kvarovi vezani za ovaj sustav su događaji s

nedopustivim odstupanjima napona ili frekvencije i gubitak jedne ili više faza u distribucijskoj mreži. Za zaštitu vjetroturbine potrebne su sljedeće funkcije:

- Nadfrekvencija
- Podfrekvencija
- Prenaponi
- Podnaponi
- Ispad mreže iz sustava
- Kratki spoj
- Toplinsko preopterečenje
- Zemljospoj

Ovisno o dizajnu vjetroturbine, tj. ako može funkcionirati kao autonomna jedinica, relej za brzu promjenu frekvencije (ROCOF) može biti korišten za otkrivanje promjena u iznosu frekvencije. Ukoliko su otkrivene promjene frekvencije tada vjetroturbina radi u izoliranom dijelu mreže primjerice kod ispadanja daljinske mreže koja napaja područje.[4]

2.8. Pouzdanost i raspoloživost

Uvođenjem vjetroelektrana u elektroenergetski sustav mijenjaju se i ekonomski troškovi između troškova pouzdanosti i troškova potrošača zbog nedovoljne pouzdanosti. Neki od kompromisa odnose se samo na vjetroelektrane (utječu na prihode vlasnika vjetroelektrane, ali ne i kupca), a neke utječu na cijeli sustav. Važan problem pouzdanosti nekog sustava je taj da mora postojati dovoljna količina kapaciteta u elektroenergetskom sustavu za pokrivanje vršnog opterećenja. Moramo uzeti u obzir da uvijek postoji mogućnost da raspoložive elektrane nisu dovoljne za pokretanje vršnog opterećenja. Ukoliko se u sustav instalira određen broj vjetroelektrana za koje postoji vjerojatnost da će za vrijeme vršnog opterećenja raditi sa određenom količinom energije smanjit će se rizik od manjka kapaciteta te na taj način može se smanjiti instalirani kapacitet konvencionalnih elektrana bez da se narušava pouzdanost sustava. Neke vjetroturbine imaju mogućnost pružati dinamičku ili poludinamičku, reaktivnu podršku prijenosnim sustavima. Postoji mogućnost potrebe za nadogradnjom postojeće prijenosne i distribucijske sustave kako bi se osiguralo da energija vjetra ne utječe na lokalna pitanja pouzdanosti sustava.

Pojam raspoloživost kako se koristi u industriji vjetra mjera je potencijala vjetroelektrane za proizvodnju električne energije. Ukoliko je turbina raspoloživa i priključena na mrežu, a vjetar i drugi uvijeti zadovoljavaju specifikacije turbine, tada će ona moći uspješno raditi i generirati energiju. Dostupnost se upotrebljava u brojne svrhe kao što su: procjene energije, projekcije prihoda, procjena performansi dizajna turbine, jamstva i bonuse ili kazne za izvedbu.

U današnje vrijeme novi vjetroagregati imaju jako veliku raspoloživost koja se kreče u rasponu od 95% do 99% što spada u industrijski standard koji iznosi oko 97%. Raspoloživost vjetroelektrana mijenja se tijekom njihovog životnog ciklusa. Vjetroelektrana u početku rada ima najmanju raspoloživost (oko 93%), a nakon par godina rada ustali se na vrijednost od 98%. Raspoloživost vjetroelektrana iako ima visok postotak, po priličan broj kvarova tijekom životnog vijeka uzrokuje neplanirane ispade vjetroelektrana iz sustava kojih može biti i do 10-ak ispada godišnje, što ima za posljedicu velike novčane gubitke, gubitke u proizvodnji i velike troškove održavanja. [5]

3. SIMULACIJSKI DIO ANALIZE UTJECAJA VJETROELEKTRANE 10 MW NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU

U simulacijskom dijelu razmatra se analiza utjecaja vjetroelektrane „Kom-Orjak-Greda“ na distribucijsku mrežu Elektrodalmacije Split.

3.1. Opis vjetroelektrane „Kom-Orjak-Greda“

Vjetroelektrana „Kom-Orjak-Greda“ smještena je na istočnim obroncima planine Mosor koja se nalazi na području grada Omiša u Spitsko-dalmatinskoj županiji. Vjetroelektrana se sastoji od pet vjetroagregata nazivne snage 2 MW i planiranom godišnjom proizvodnjom električne energije od 27.900,00 MWh, dok je planirana godišnja potrošnja električne energije iz distribucijske mreže 500.000,00 kWh. Cilj izgradnje ove vjetroelektrane je proizvodnja električne energije kojom se napaja elektroenergetski sustav Republike Hrvatske. Njenim radom smanjit će se potreba za radom konvencionalnih elektrana, a time i potrošnja fosilnog goriva u Republici Hrvatskoj. Vjetroelektrana je smještena na vrhovima Kom, Orjak, Greda koji se nalaze na nadmorskoj visini između 450 i 525 metara spomenute planine Mosor. Očekivane srednje godišnje brzine vjetra na lokaciji gradnje izmjerene na visini 10 metara od tla iznose 4,9 m/s, dok se maksimalne 10-minutne brzine vjetra kreću u intervalu od 36,2 m/s do 38,6 m/s iz smjera sjeveroistoka. Linija vjetroagregata planirana je da se proteže u jednoj liniji koja prati konfiguraciju terena i ima smjer zapad-istok.[8]
Glavni dijelovi vjetroelektrane su:

- 5 samostojećih proizvodnih jedinica vjetroagregata
- Odgovarajuće trafostanice uz svaku proizvodnu jedinicu
- Podzemna kabelska mreža za povezivanje pojedinih proizvodnih jedinica
- Kabelska trasa do točke priključka na mrežu

Vjetroturbine u sebi imaju integriranu turbinu tipa MM92 njemačke kompanije Senvion. Nazivna snaga turbine iznosi 2 MW pri brzinama vjetra od 12,5 m/s što ju čini idealnom za srednje i male brzine vjetra. Turbine u sebi imaju integriran dvostrano napajan asinkroni generator, pretvarač frekvencije i DC sustav upravljanja.

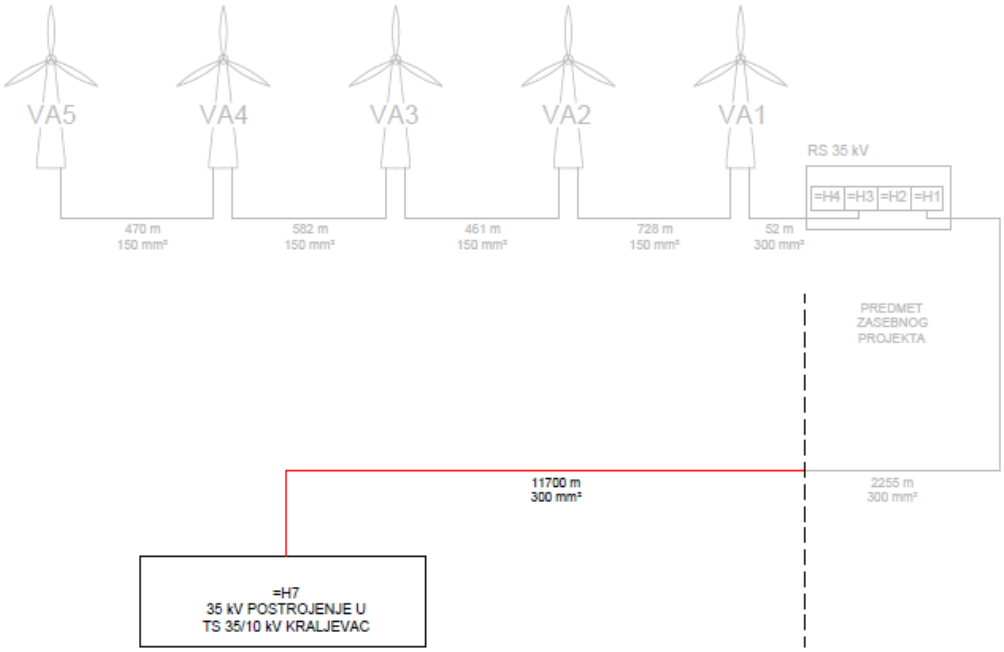
Nazivna snaga	2 MW
Brzina vjetra za pokretanje vjetroturbine	3 m/s
Nominalna brzina vjetra	12,5 m/s
Brzina vjetra pri kojoj se vjetroturbina zaustavlja	24 m/s
Operativni raspon temperatura	Od -20 do +35 °C
Nazivni napon	690 V
Nazivna frekvencija	50 Hz
Promjer rotora	92,5 m

Tablica 1: Osnovne specifikacije vjetroturbine MM92

Tip transformatora	Trofazni,uljni,dvonamotni
Nazivni primarni napon	35 kV ±2,5% ±5%
Nazivni sekundarni napon	0,69 kV
Nazivna snaga transformatora	2000-2300 kVA
Frekvencija	50 Hz
Grupa spoja	Dyn5
Broj blok transformatora	5 kom

Tablica 2: Osnovne specifikacije blok transformatora smještenih unutar svake proizvodne jedinice

Vjetroagregati su međusobno povezani srednjenaponskim energetskim vodom u radijalnom rasporedu, a povezivanje vjetroelektrane s distribucijskim sustavom izvedeno je srednjenaponskim kabelom i priključuje se na 35 kV postrojenje u transformatorskoj stanici 35/10 kV hidroelektrane Kraljevac, a nakon izgradnje trafostanice 110/20 kV Kraljevac vjetroelektrana će se prespojiti u novo vodno polje 20 kV.



Slika 8: Raspored vjetroagregata te priključni vod do TS 35/10 kV Kraljevac

Elektrana mora biti opremljena za paralelan rad s distribucijskom mrežom u situacijama redovnih i izvanrednih pogonskih aktivnosti bez ikakvog negativnog povratnog djelovanja na distribucijsku mrežu i njene korisnike. Ukoliko se javi povratno djelovanje, ono mora biti u dopuštenim granicama, ako se dopuštene granice premaše operator distribucijskog sustava može onemogućiti daljnji paralelni rad elektrane i mreže.

3.2. Opis okolne distribucijske mreže

Spomenuta vjetroelektrana spaja se na trafostanicu stanicu 35/10 kV Kraljevac iz koje se napaja većina konzuma. Instalirana snaga trafostanice je 2x4 MVA. Na području koje se napaja iz trafostanice Kraljevac nalazi se oko 60 trafostanica 10/0,4 kV koje su većinom stupne trafostanice, dok je konzum pretežno prigradskog i seoskog karaktera.

TIP TRANSFORMATORA	UKUPNO [kom]	POSTOTAK [%]
1000 kVA	2	3,03
630 kVA	10	15,15
400 kVA	11	16,67
250 kVA	9	13,64
160 kVA	5	7,58
100 kVA	22	33,33
50 kVA	7	10,61

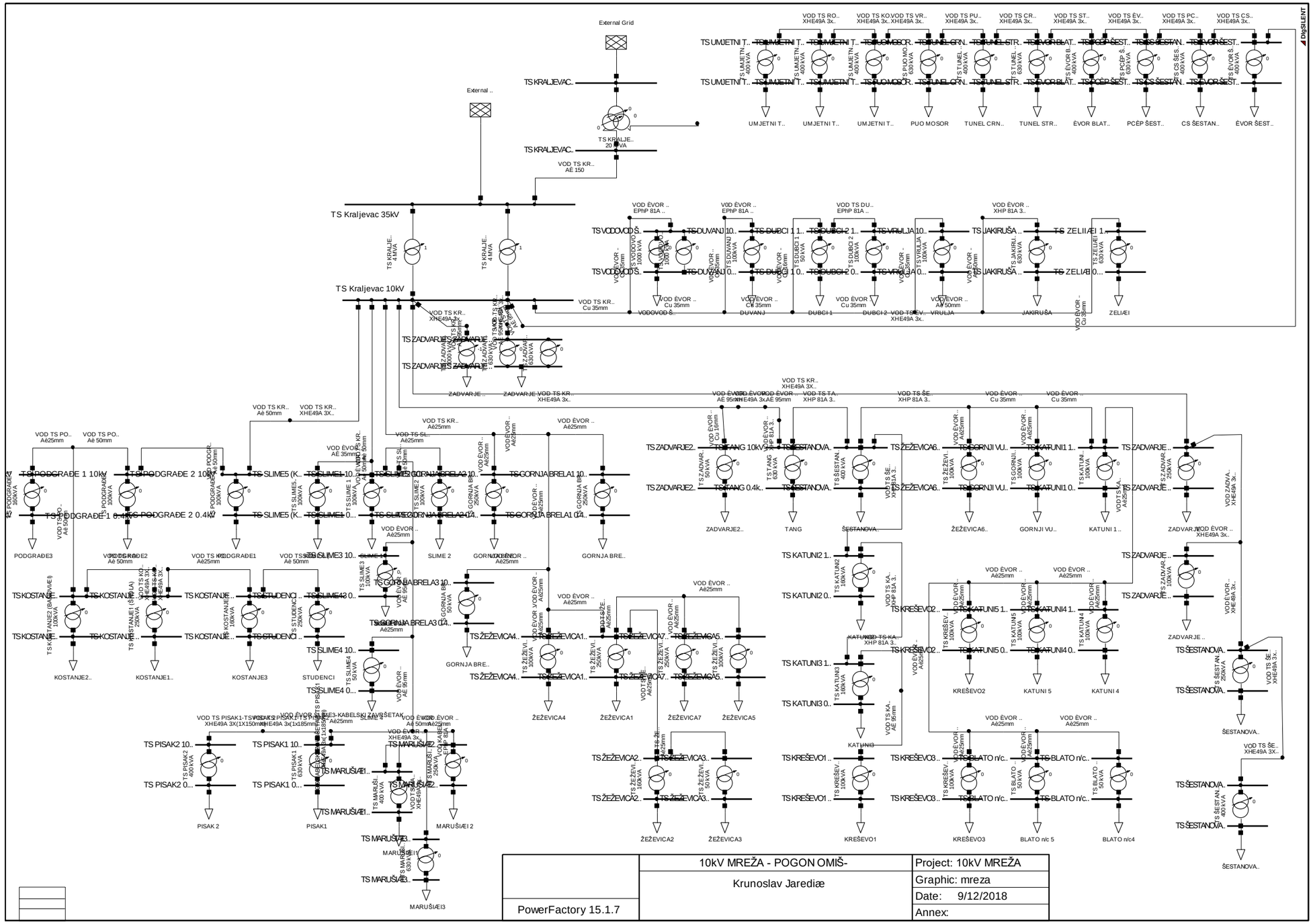
Tablica 3: Udio pojedinih trafostanica u cjelokupno promatranoj 10 kV mreži

Distribucijska 10 kV mreža izvedena je uglavnom pomoću zračnih vodova, različitih presjeka ali na pojedinim dijelovima nije dovoljno dimenzionirana. Od zračnih vodova najveći udio oko 30% ima Al/č 25 mm^2.

TIP VODIČA	DULJINA [km]	POSTOTAK [%]
Al/č25mm	31,38	29,65
Al/č 35mm	0,03	0,02
Al/č 50mm	10,64	10,05
Al/č 95mm	6,43	6,08
Cu 16mm	3,90	3,68
Cu 35mm	6,21	5,87
XHE49A 3X(1X150mm)	1,54	1,45
XHE49A 3x(1x185mm)	37,73	35,65
XHP 81A 3X150mm	0,19	0,18
XHP 81A 3x185mm	5,68	5,37
EPhP 81A 3x150mm	2,12	2,00

Tablica 4: Udio pojedinih vodova u cjelokupno promatranoj 10 kV mreži

Izgradnjom autoceste izvršila se djelomična rekonstrukcija 10 kV mreže na promatranom području. Tako je npr. odrađena rekonstrukcija cjelokupnog 10 kV dalekovoda Pranjčevići-Šestanovac na čeličnorešetkastim stupovima Al/č 95 mm^2, te su za potrebe napajanja autoceste i planirane gospodarske zone Omiš-Blato na Cetini položeni 20 kV kabeli iz trafostanice 35/10 Kraljevac. Položeni kabeli većinom su tipa XHE49A 3x(1x185mm) za koje se može vidjeti da imaju udio od oko 36% u cjelokupnoj 10 kV mreži[9]


External Grid
TS KRALJEVAC..
TS KRALJE.. 20 MVA
VOD TS KR.. AE 150
TS Kraljevac 35kV
TS Kraljevac 10kV
TS KRALJE.. 4 MVA
TS KRALJE.. 4 MVA
VOD TS KR.. Cu 35mm
VOD TS KR.. XHE49A 3x..
VOD TS KR.. AE 95mm
VOD TS KR.. XHE49A 3x..
VOD TS KR.. Aë 50mm
VOD TS KR.. XHE49A 3X..
VOD TS KR.. Aë25mm
VOD TS KR.. XHE49A 3X..
VOD TS KR.. XHE49A 3X..
VOD TS KR.. XHE49A 3X..

3.3. Proračun opterećenja trafostanica 10/0,4 kV

Za potrebe simulacije cijelog sustava potrebno je izračunati minimalna i maksimalna opterećenja trafostanica 10/0,4 kV. Budući da se trafostanica Kraljevac ne nalazi u sustavu daljinskog vođenja, nije moguće dobiti iznose opterećenja po pojedinom izvodu. Od strane Elektrodalmacije Split dostavljena su mjerenja snage za oba transformatora 35/10kV trafostanice Kraljevac. Iz dobivenih mjerenja dobivena je maksimalna prividna snaga koja je zabilježena 10 kolovoza 2017. u 21:30h te iznosi S_{max}=6023,8209 kVA, a minimalna prividna snaga istih transformatora zabilježena je 11. svibnja 2017. u 6:00h i iznosila je S_{min}=1009,6258 kVA. Sljedeći korak je izračun snage transformatora po pojedinim izvodima te je na osnovu postotnog udjela u ukupnom opterećenju moguće dobiti minimalna i maksimalna opterećenja po svakom izvodu.

Naziv izvoda	Snaga izvoda [MVA]	Postotni udio [%]	S_{max} izvoda [kVA]	S_{min} izvoda[kVA]
KOSTANJE	1,12	5,86	352,996	58,56
SLIME	2,76	14,44	869,839	145,789
GORNJA BRELA	1,40	7,33	441,546	74,006
ŠESTANOVAC	2,30	12,04	725,268	121,559
ZADVARJE	2	10,47	630,694	105,708
AUTOCESTA	5,95	31,14	1875,818	314,397
BAŠKA VODA	3,61	18,73	1128,262	189,103

Tablica 5: Proračunate minimalne i maksimalne vrijednosti snage za svaki izvod

Nakon izračuna opterećenja po pojedinim izvodima potrebno je proračunati opterećenja distribucijskih transformatorskih stanica u svakom izvodu. Proračun se izvršava pomću sljedećeg izraza uz pretpostavku da je raspodjela izračunatih opterećenja izvoda po transformatorskim stanicama 10/0,4 kV linearna odnosno da je opterećenje pojedine transformatorske stanice (uz cosφ=0,95) približno jednako:

$$S_{TSij} = S_{IZVODj} \times \frac{S_{nTSij}}{\sum_{i=1}^{n_j} S_{nTSij}} \times k_{g_{ij}} \quad [kVA] \tag{3-1}$$

gdje je:

S_{TSij}-izračunato opterećenje transformatorske stanice $_i$ na izvodu $_j$ [kVA]
S_{IZVODj}-izmjereno opterećenje izvoda $_j$ [kVA]
S_{nTSij}-nazivna snaga transformatorske stanice $_i$ na izvodu $_j$ [kVA]
n_j-broj transformatorskih stanica na izvodu $_j$
k_g-faktor gubitaka (k_g<1).

Faktorom gubitaka k_g uzeti su u obzir gubici u mreži i transformatorima ovisni o topologiji mreže i naponskim prilikama u mreži.
Očekivani gubici kreću se u rasponu oko 10% odnosno faktor k_g iznosi 0,9 za gubitke djelatne snage 10 %.

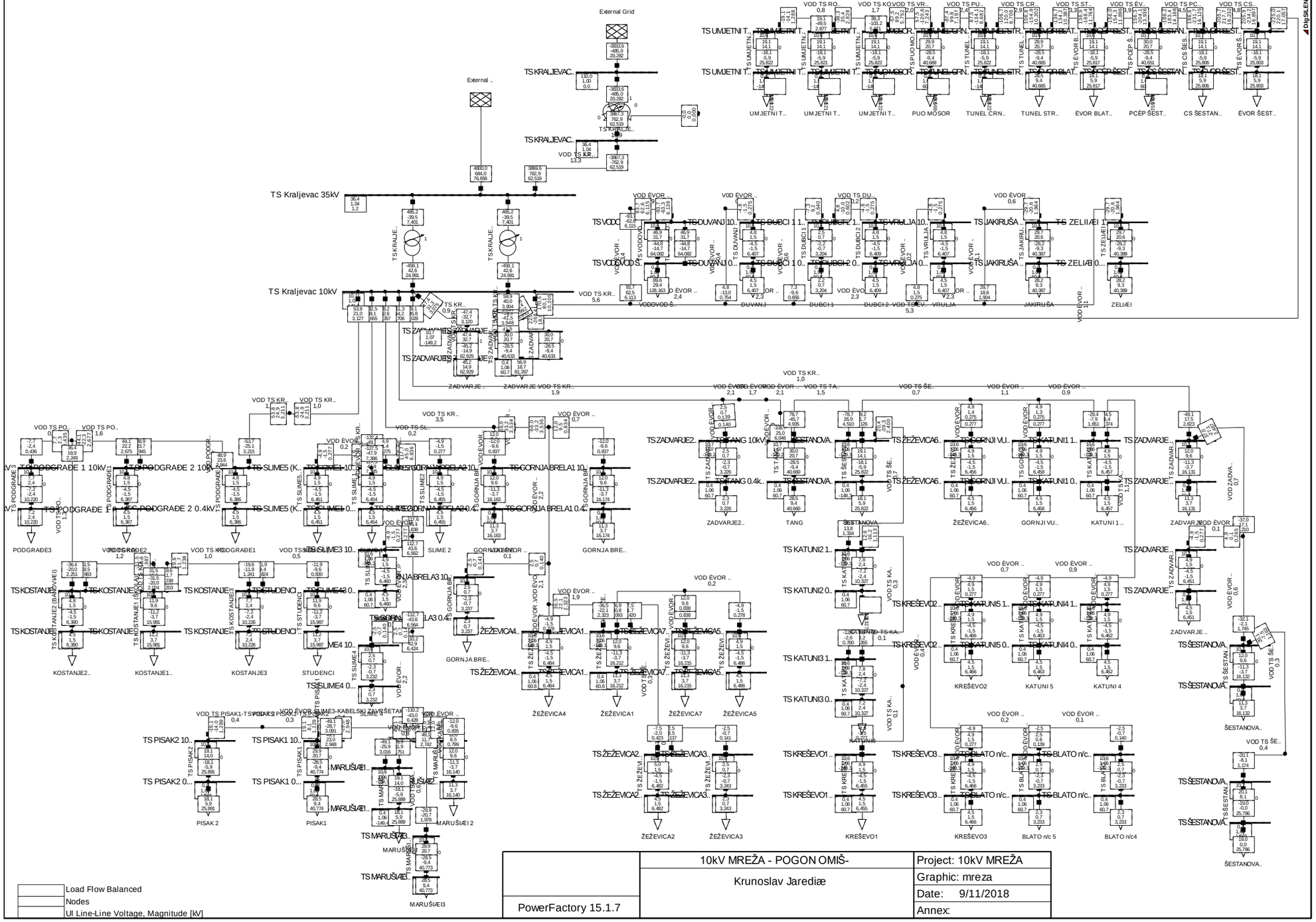
3.4. Simulacija utjecaja vjetroelektrane 10MW na distribucijsku mrežu

Simulacijski dio razmatra se u nekoliko različitih događaja:

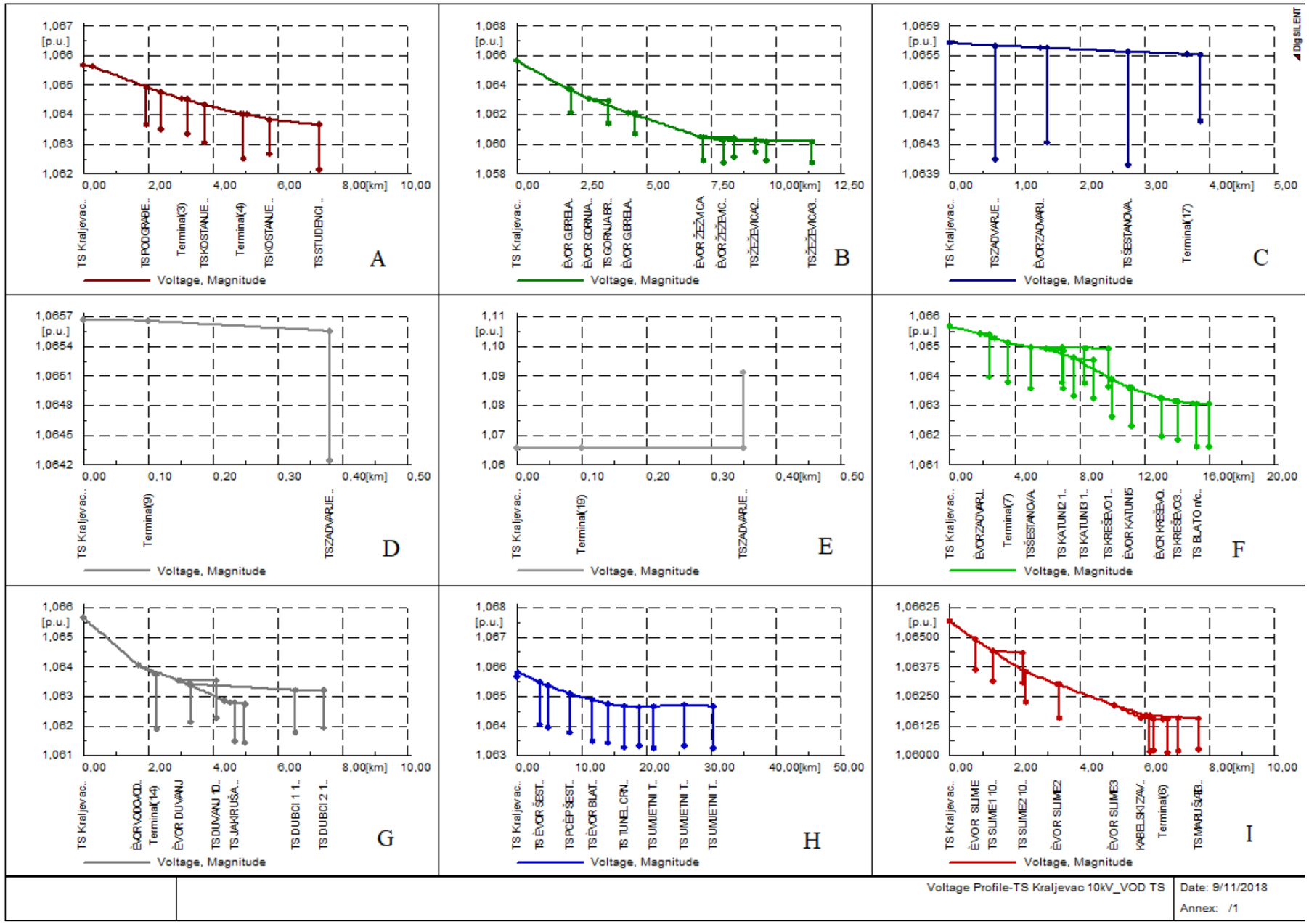
- Bez priključene VE kada je opterećenje u mreži minimalno
- Bez priključene VE kada je opterećenje u mreži maksimalno
- Sa priključenom VE kada je opterećenje u mreži minimalno($\cos\varphi=1$)
- Sa priključenom VE kada je opterećenje u mreži maksimalno($\cos\varphi=1$)
- Sa priključenom VE kada je $\cos\varphi=0,95$ induktivno

Rezultati simulacije prikazani su u obliku slike na kojoj se nalaze dijagrami naponskih profila pojedinih izvoda na 10 kV sabirnici trafostanice Kraljevac. Na slici je svaki naponski profil označen slovom što predstavlja oznaku izvoda.
Izvodi su sljedeći:

- Graf A- predstavlja naponski profil izvoda Kostanje
- Graf B- predstavlja naponski profil izvoda Gornja Brela
- Graf C- predstavlja naponski profil izvoda Zadvarje
- Graf D- predstavlja naponski profil TS Zadvarje(vodovod) koja se napaja iz izvoda Autocesta
- Graf E- predstavlja naponski profil TS Zadvarje 11 koja se napaja iz izvoda Zadvarje
- Graf F- predstavlja naponski profil izvoda Šestanovac
- Graf G-predstavlja naponski profil izvoda Baška Voda
- Graf H- predstavlja naponski profil izvoda Autocesta
- Graf I- predstavlja naponski profil izvoda Slime

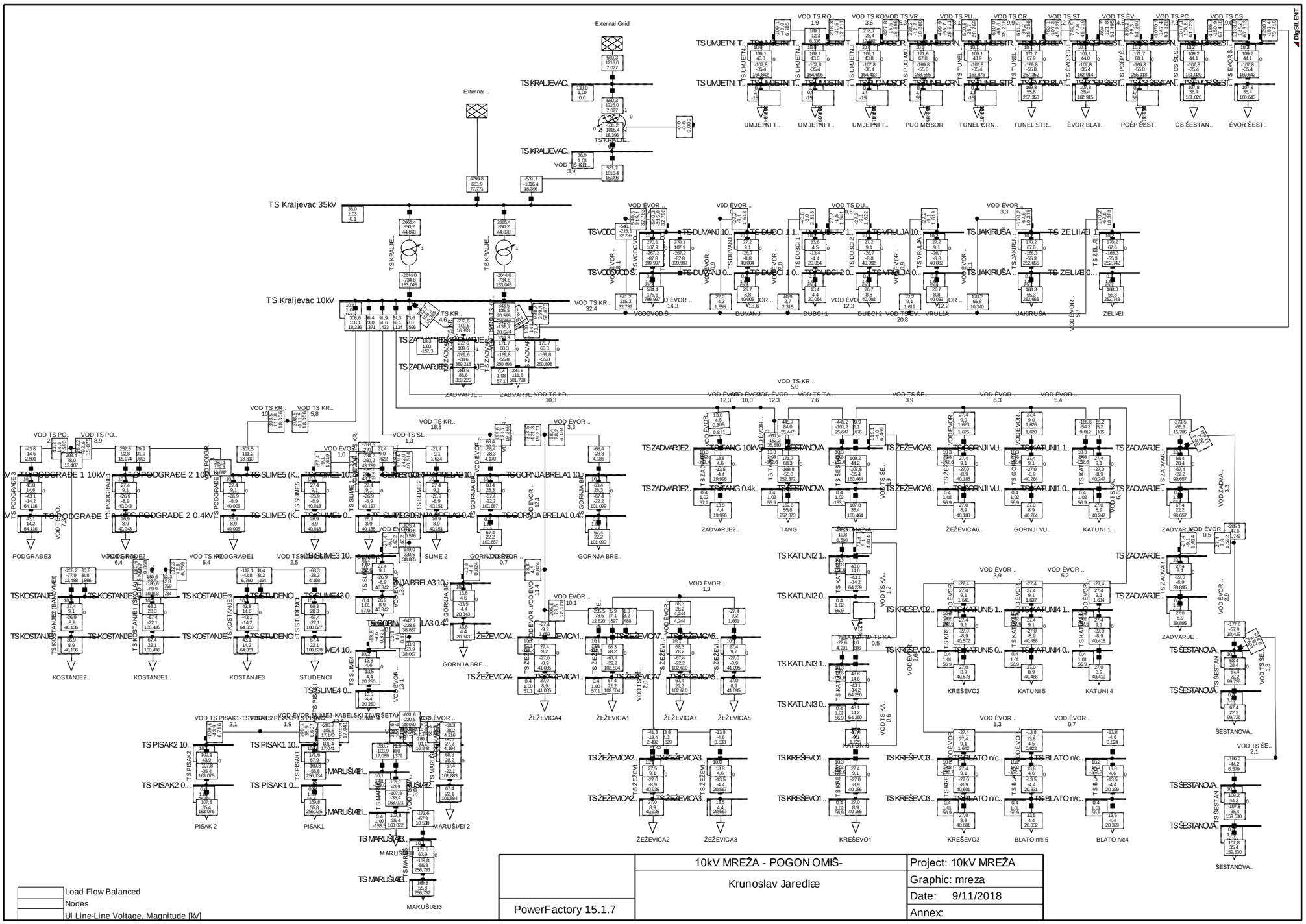


Slika 10: Tokovi snaga u distributivnoj mreži bez elektrane s minimalnim opterećenjem

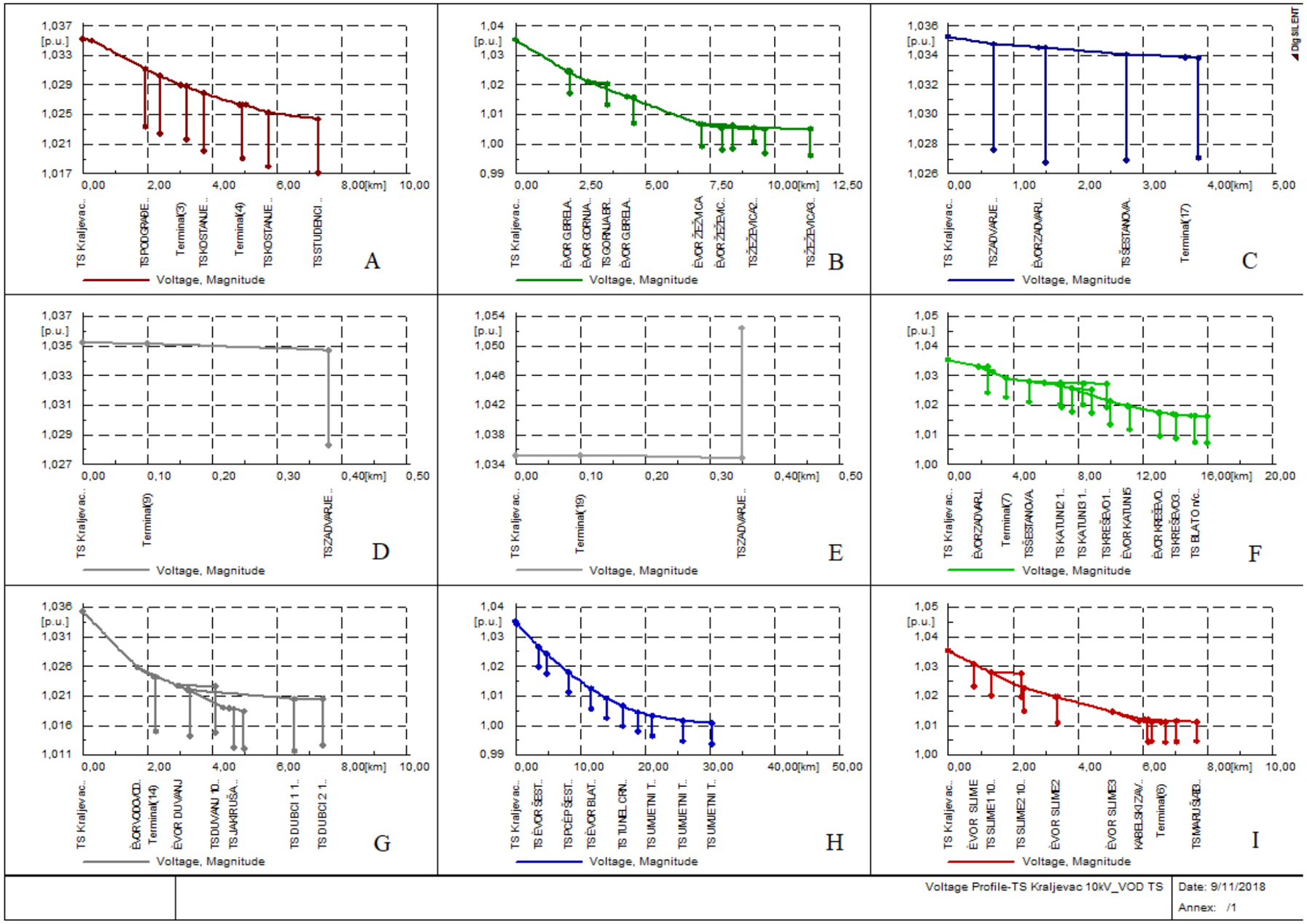


Slika 11: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu bez elektrane s minimalnim opterećenjem

Simulacijom sustava bez priključene vjetroelektrane s minimalnim opterećenjem vidljivo je da u distribucijskoj mreži ne dolazi do preopterećenja transformatora i vodova. Gubici koji se javljaju u mreži iznose 102,65 kW što je i prihvatljivo s obzirom da je opterećenje minimalno pa mrežom teku niske vrijednosti struja. Iz naponskih profila vodljivo je da se najveći napon javlja na izvodu Kostanje te iznosi 1,066 p.u., a najmanji iznos napona zabilježen je na izvodu Gornja Brela i iznosi 1,059 p.u.

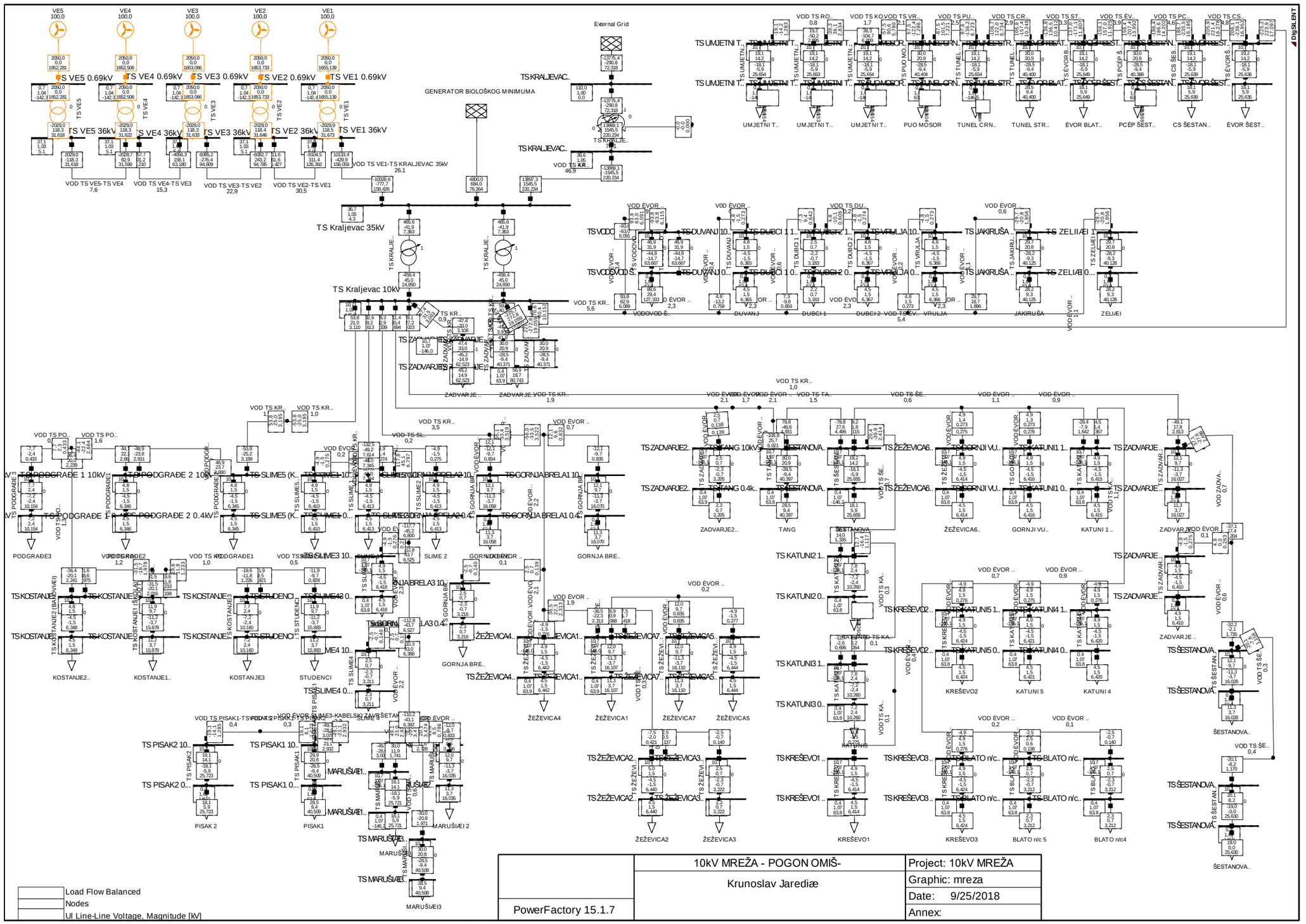


Slika 12: Tokovi snaga u distributivnoj mreži bez elektrane s maksimalnim opterećenje

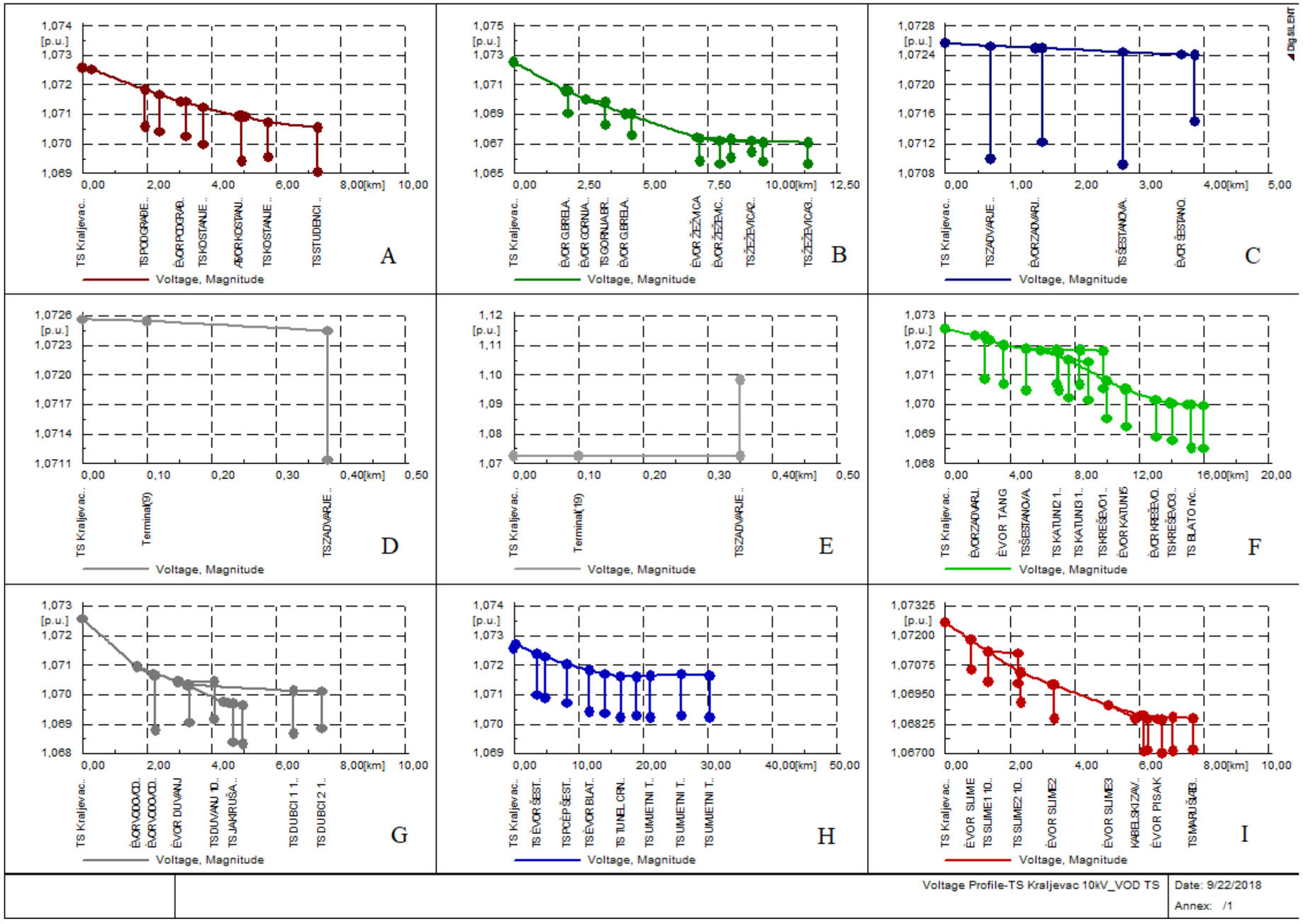


Slika 13: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu bez elektrane s maksimalnim opterećenjem

Simulacija sustava bez priključene vjetroelektrane s maksimalnim opterećenjem dokazuje da u distribucijskoj mreži nema nikakvih preopterećenja. Gubici zabilježeni tijekom simulacije iznose 209,45 kW. Mrežni gubici su veći nego kod prethodnog slučaja s minimalnim opterećenjem što je prihvatljivo s obzirom da maksimalno opterećenje iz mreže povlači veće struje koje povećavaju gubitke u mreži. Iz naponskih profila vidljivo je da se najveći napon javlja na TS Zadvarje 11 koja se napaja iz izvoda Zadvarje, a napon iznosi 1,053 p.u. Najmanji napon zabilježen je na krajnjem dijelu izvoda Autocesta, a iznosi 0,995 p.u.

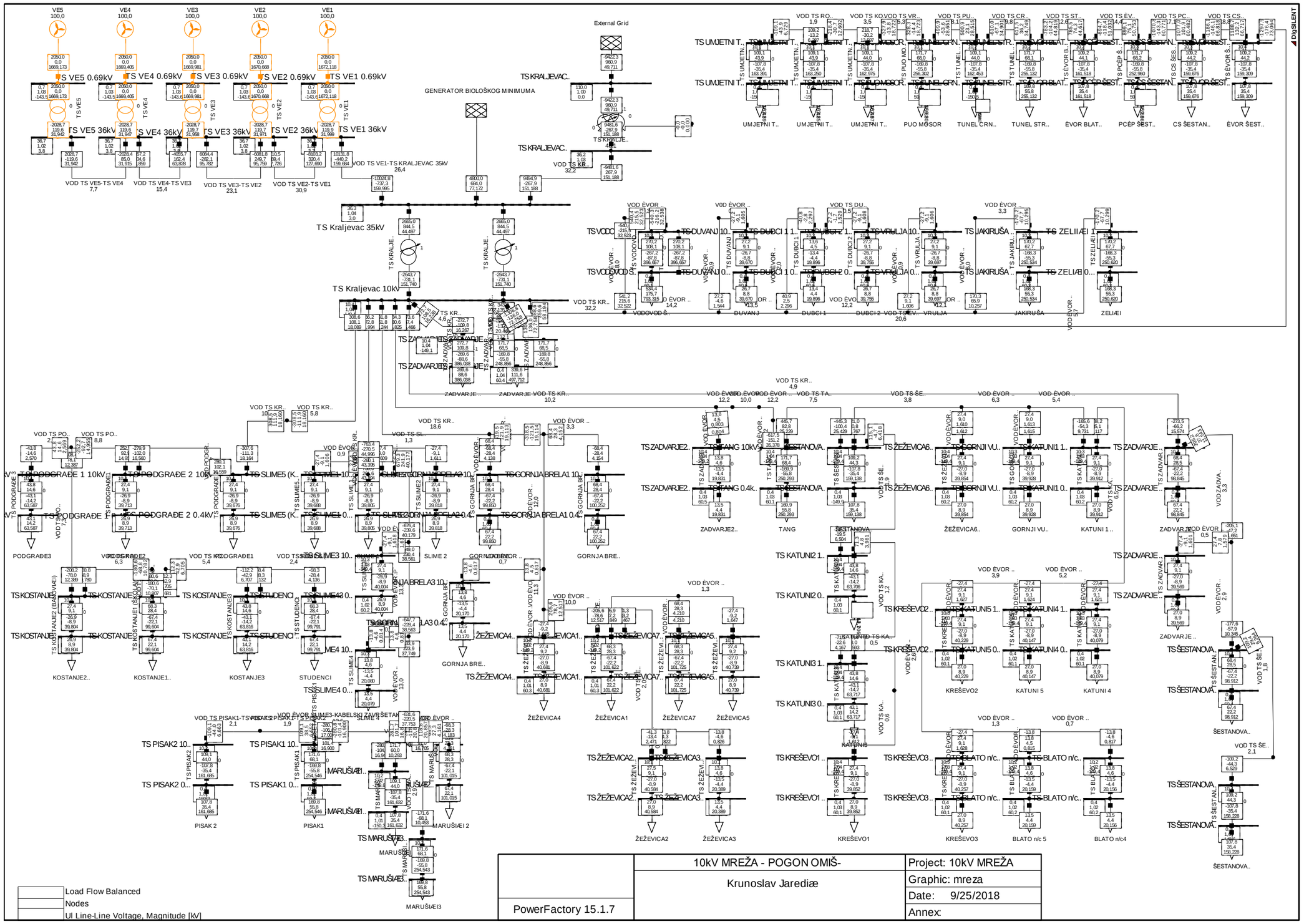


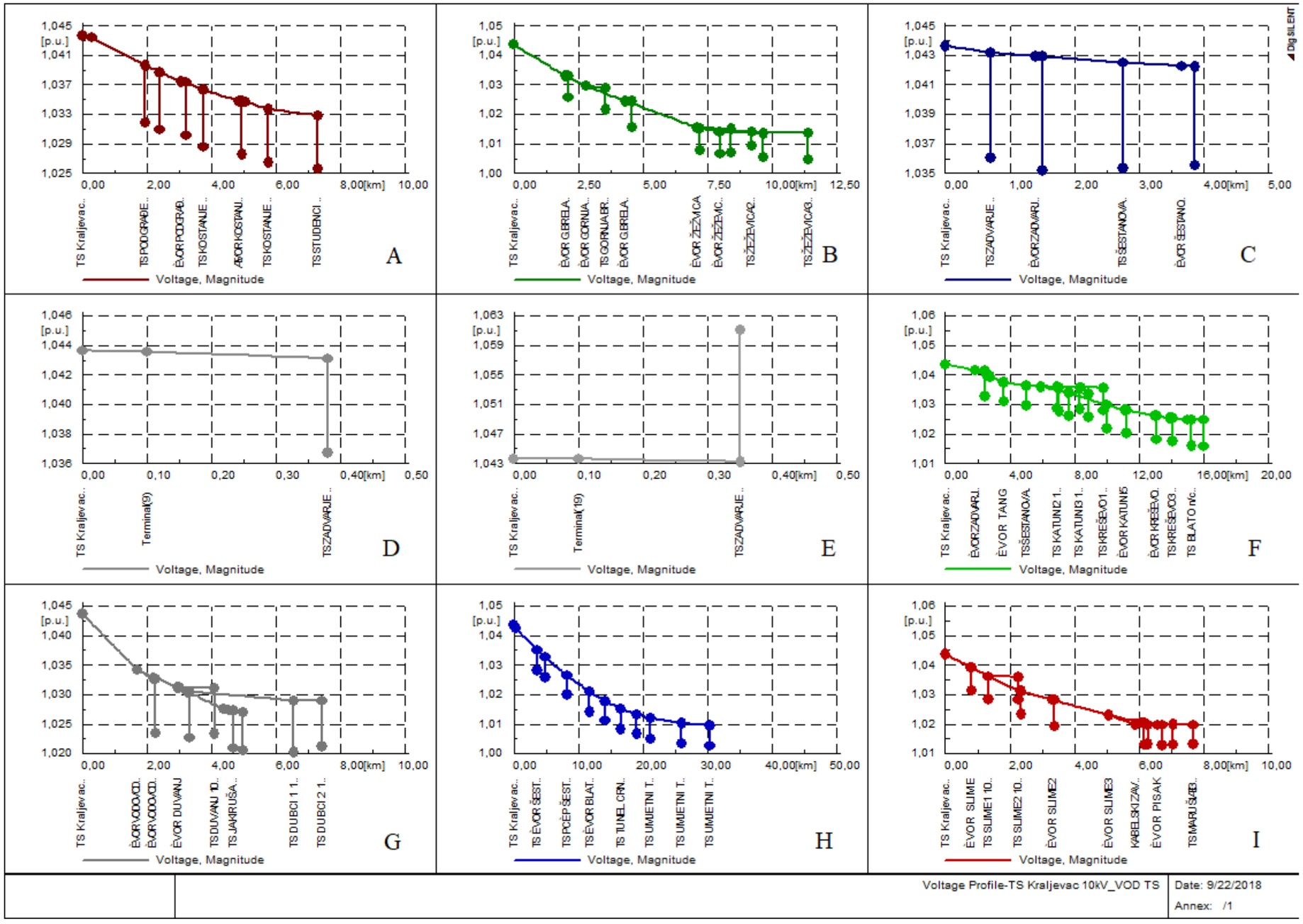
Slika 14: Tokovi snaga u distributivnoj mreži s priključenom elektranom (cosϕ=1) s minimalnim opterećenjem



Slika 15: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=1) s minimalnim opterećenjem

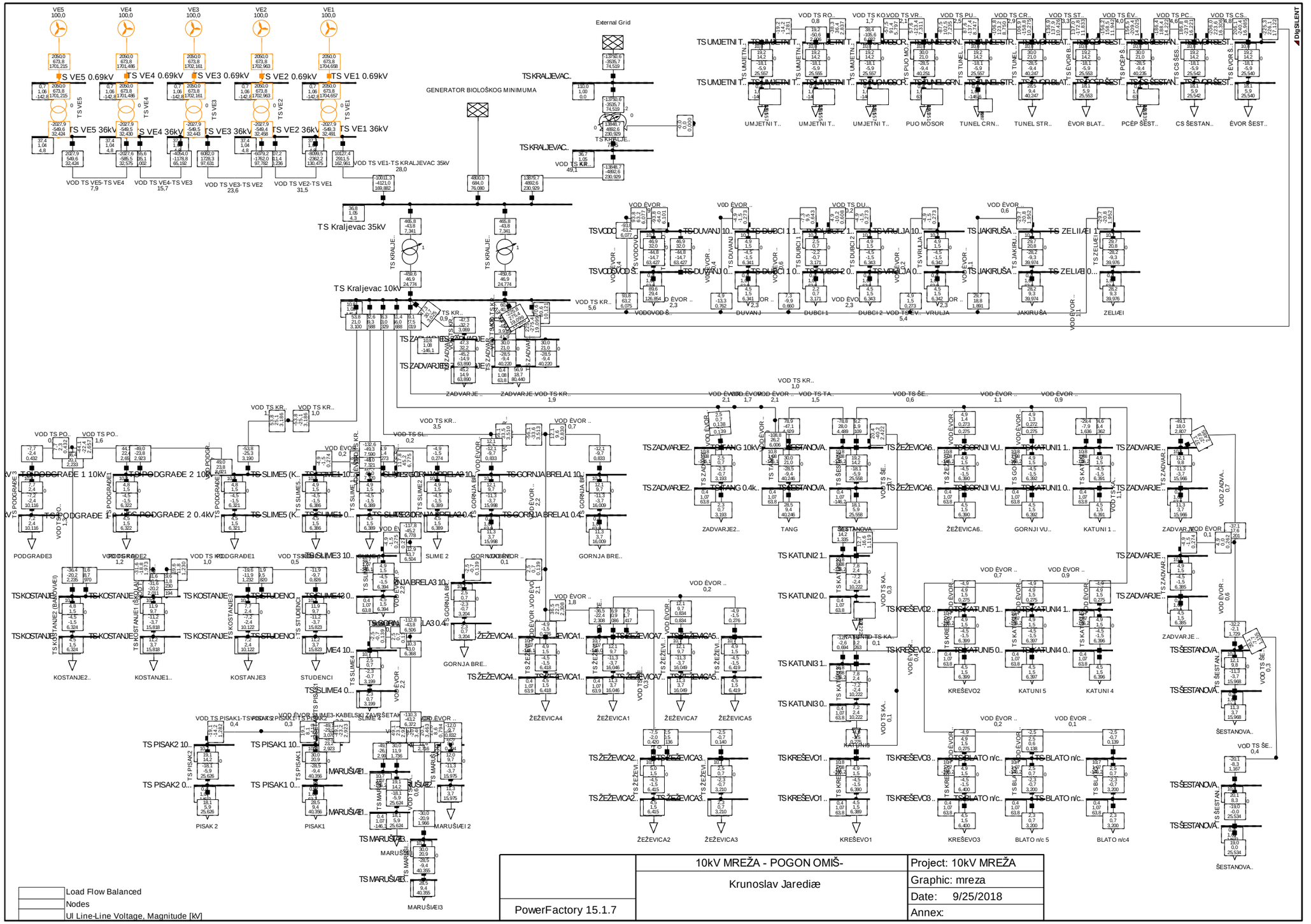
Simulacijom sustava sa priključenom vjetroelektranom (cosϕ=1) s minimalnim opterećenjem u sustavu, generira se dodatna djelatna snaga u mrežu koja će pri minimalnom opterećenju dodatno povećati vrijednosti napona u mreži. Najveća vrijednost napona zabilježena je na TS Zadvarje 11 koja se napaja iz izvoda Zadvarje,a iznosi 1.098 p.u. Minimalna vrijednost napona iznosi 1,066 p.u., a zabilježena je na krajnjem dijelu izvoda Gornja Brela. Gubici u mreži iznose 410,73 kW. U Mreži se ne javljaju nikakva preopterećenja.

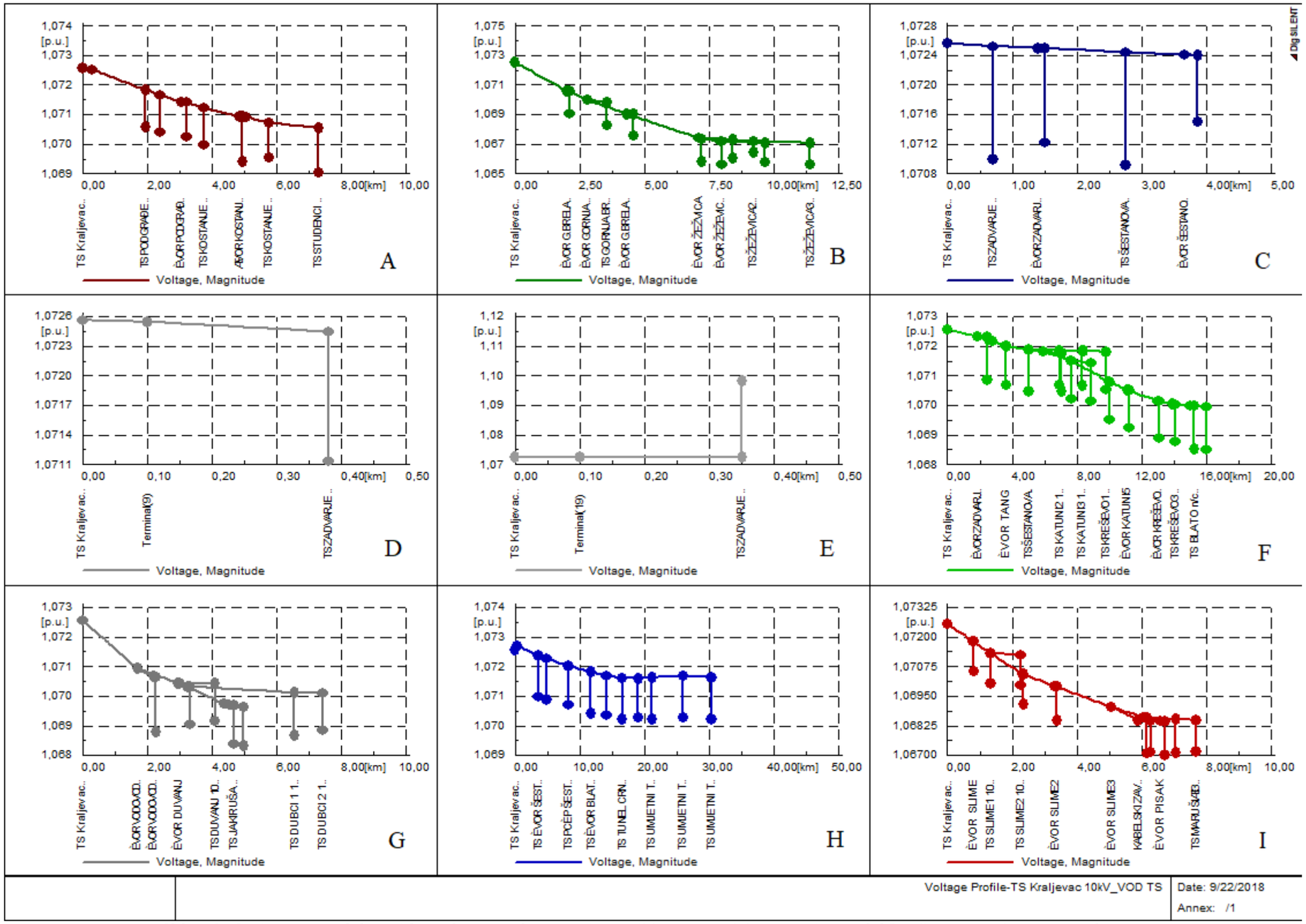

DIgSILENT
External Grid
GENERATOR BIOLOŠKOG MINIMUMA
TS Kraljevac 35kV
TS Kraljevac 10kV
TS KRALJEVAC..
TS KRALJEVAC..
TS KRALJE..
VOD TS VE1-TS KRALJEVAC 35kV
26,4
VOD TS VE5-TS VE4
7,7
VOD TS VE4-TS VE3
15,4
VOD TS VE3-TS VE2
23,1
VOD TS VE2-TS VE1
30,9
VOD TS KR..
32,2
VOD TS KR..
18,6
VOD TS KR..
4,9
VOD TS KR..
10,2
VOD TS KR..
5,8
VOD TS KR..
10,2
VOD TS KR..
4,6
VOD TS SL..
1,3
VOD TS PO..
2,2
VOD TS PO..
8,8
VOD TS PISAK1-TS PISAK2
2,1
VOD TS PISAK2-TS SLIME3
1,9
VOD ŠETALIŠTE-TS SLIME3
VOD ŠETALIŠTE-KABELSKI ČVOR
VOD ŠETALIŠTE-KABELSKI ČVOR
VOD ŠETALIŠTE-KABELSKI ČVOR



Slika 17: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=1) s maksimalnim opterećenjem

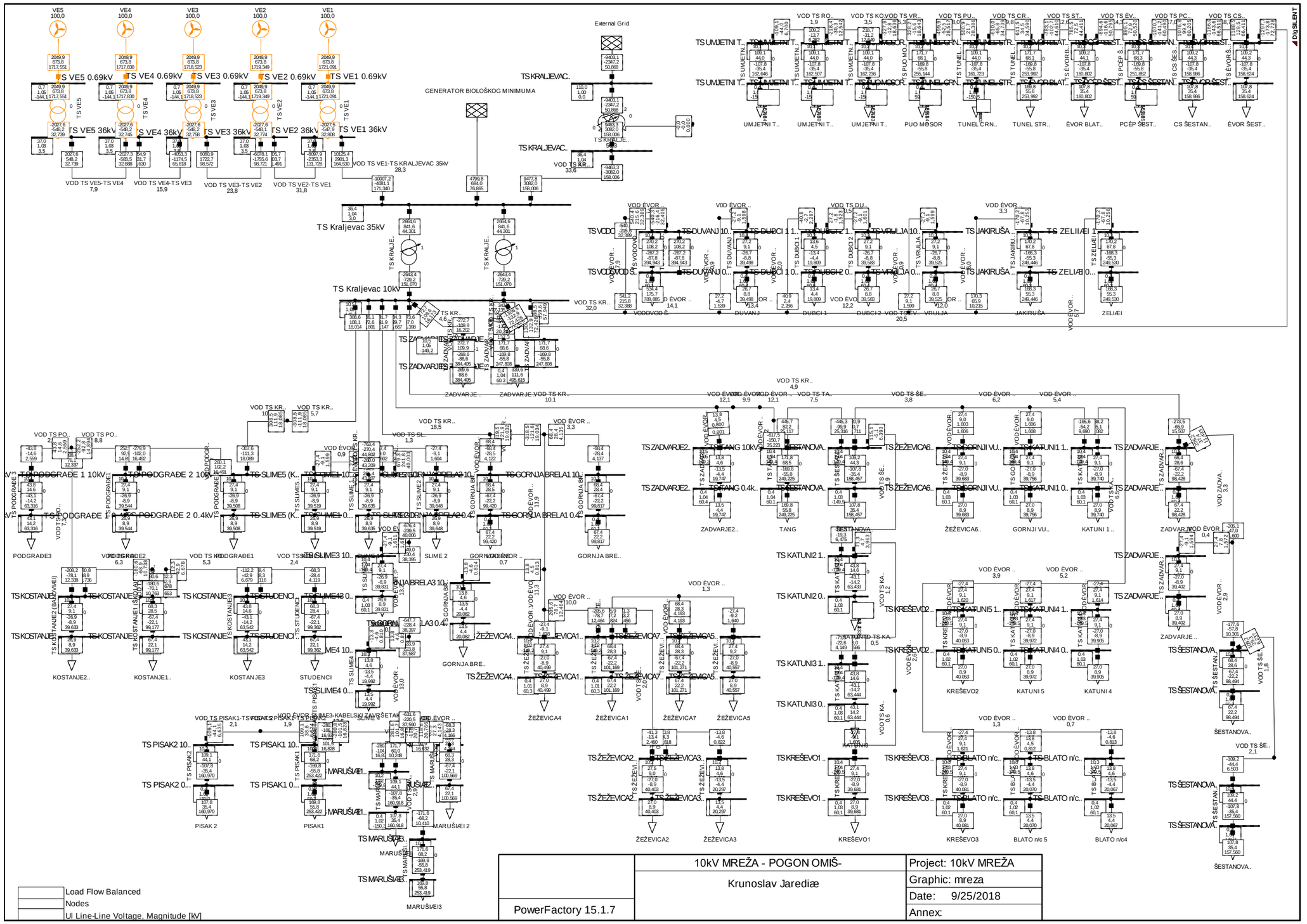
Simulacijom sustava sa priključenom vjetroelektranom (cosϕ=1) s maksimalnim opterećenjem, generira se dodatna djelatna snaga u mrežu koja će pri minimalnom opterećenju dodatno povećati vrijednosti napona u mreži. Najveća vrijednost napona zabilježena je na TS Zadvarje 11 koja se napaja iz izvoda Zadvarje,a iznosi 1.061 p.u. Minimalna vrijednost napona iznosi 1,002 p.u., a zabilježena je na krajnjem dijelu izvoda Autocesta. Gubici u mreži iznose 476,73 kW. U Mreži se ne javljaju nikakva preopterećenja.


DIgSILENT
External Grid
GENERATOR BIOLOŠKOG MINIMUMA
TS KRALJEVAC..
TS KRALJEVAC..
VOD TS KR..
TS Kraljevac 35kV
TS Kraljevac 10kV
VOD TS VE1-TS KRALJEVAC 35kV
28,0
VOD TS VE5-TS VE4
7,9
VOD TS VE4-TS VE3
15,7
VOD TS VE3-TS VE2
23,6
VOD TS VE2-TS VE1
31,5
VE5 100,0
VE4 100,0
VE3 100,0
VE2 100,0
VE1 100,0
TS VE5 0.69kV
TS VE4 0.69kV
TS VE3 0.69kV
TS VE2 0.69kV
TS VE1 0.69kV
TS VE5 36kV
TS VE4 36kV
TS VE3 36kV
TS VE2 36kV
TS VE1 36kV
TS KRALJE..
TS KR..
ZADVARJE..
ZADVARJE
VOD TS KR..
1,9
VOD TS KR..
2,1
VOD TS KR..
1,0
VOD TS KR..
3,5
VOD TS KR..
1,0
VOD TS PO..
1,6
VOD TS PO..
0
VOD TS SL..
0,2
VOD ĐVOR ..
0,2
VOD ĐVOR ..
0,7
VOD ĐVOR ..
1,8
VOD ĐVOR ..
2,2
VOD ĐVOR ..
0,2
VOD ĐVOR ..
0,7
VOD ĐVOR ..
0,9
VOD ĐVOR ..
0,2
VOD ĐVOR ..
0,1
VOD ĐVOR ..
0,6
VOD TS KO..
1,7
VOD TS VR..
2,2
VOD TS PU..
2,2
VOD TS CR..
2,2
VOD TS ST..
2,2
VOD TS EV..
2,2
VOD TS PC..
2,2
VOD TS CS..
2,2
VOD TS RO..
0,8
VOD TS TA..
1,5
VOD TS ŠE..
0,6
VOD TS KA..
0,3
VOD TS KA..
0,1
VOD TS ŠE..
0,3
VOD TS ŠE..
0,4
VOD TS PISAK1-TS PISAK2
0,4
VOD TS PISAK1-TS PISAK2
0,3
VOD ĐVOR SLIME3-KABELSKI ZAVR ŠETAL..
VOD ĐVOR ..
VOD ĐVOR ..
VOD ĐVOR

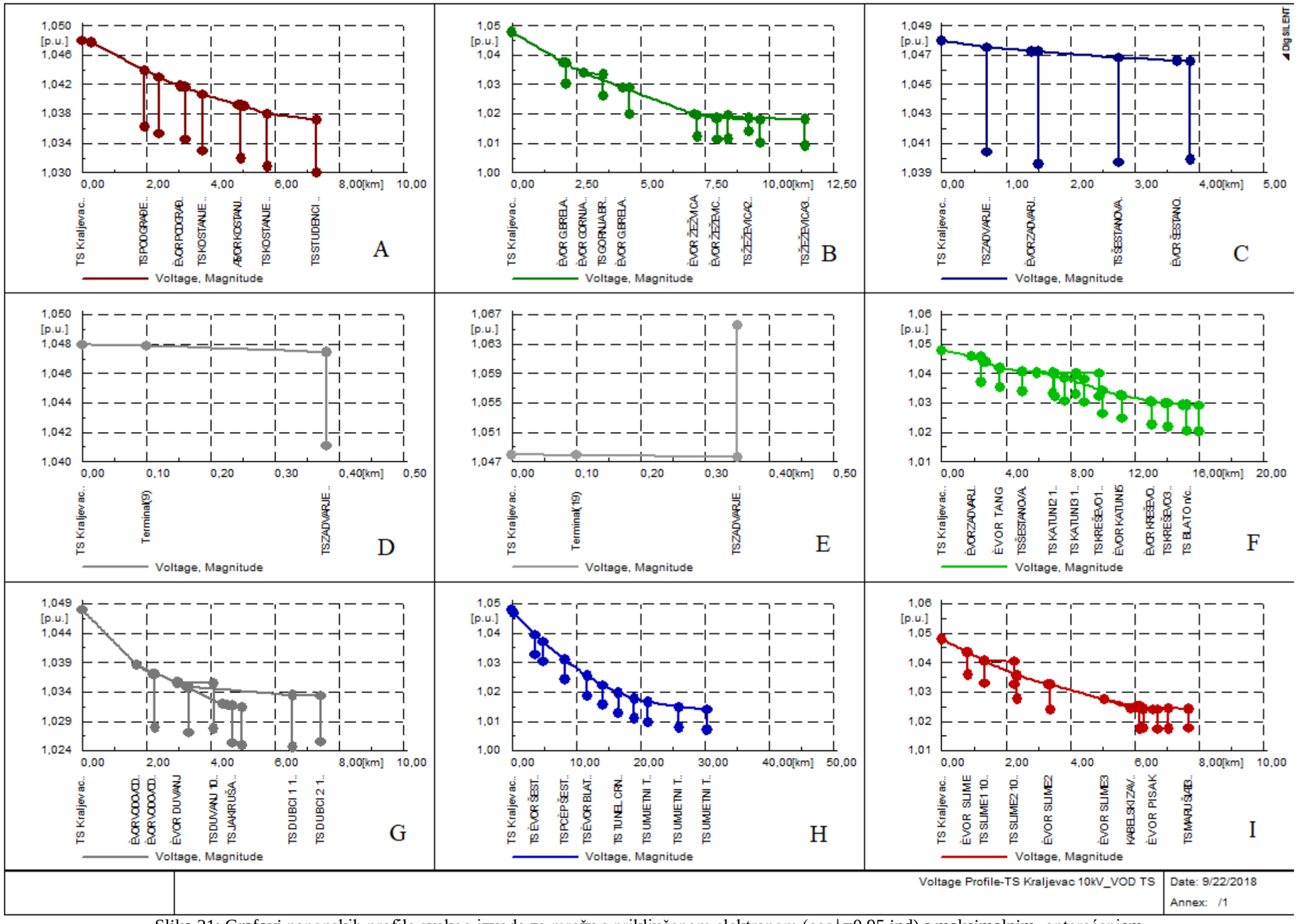


Slika 19: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s minimalnim opterećenjem

Simulacijom sustava sa priključenom vjetroelektranom (cosϕ=0,95 ind) s minimalnim opterećenjem vidljivo je da u distribucijskoj mreži nema nikakvih strujnih preopterećenja. Najveća vrijednost napona zabilježena je na TS Zadvarje 11 koja se napaja iz izvoda Zadvarje,a iznosi 1.098 p.u. Minimalna vrijednost napona iznosi 1,066 p.u., a zabilježena je na krajnjem dijelu izvoda Gornja Brela. Gubici u mreži iznose 435,81 kW.



Slika 20: Tokovi snaga u distributivnoj mreži sa priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s maksimalnim opterećenjem



Slika 21: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s maksimalnim opterećenjem

Simulacijom sustava sa priključenom vjetroelektranom (cosϕ=0,95 ind) s maksimalnim opterećenjem vidljivo je da u distribucijskoj mreži nema nikakvih strujnih preopterećenja. Najveća vrijednost napona zabilježena je na TS Zadvarje 11 koja se napaja iz izvoda Zadvarje,a iznosi 1.066 p.u. Minimalna vrijednost napona iznosi 1,006 p.u.,a zabilježena je na krajnjem dijelu izvoda Autocesta. Gubici u mreži iznose 495,67 kW.

Vrsta opterećenja	Bez elektrane	Sa elektranom cosϕ=1	Sa elektranom cosϕ=0,95 ind
Maksimalno opterećenje	209,45 kW	476,73 kW	495,67 kW
Minimalno opterećenje	102,65 kW	410,73 kW	435,81 kW

Tablica 6: Gubici u mreži za sve promatrane slučajeve tijekom simulacije

Nakon odrađene simulacije i dobivenih rezultata vidi se da u niti jednom slučaju vrijednosti napona ne prelaze dozvoljene granice. U slučaju kada elektrana nije spojena na mrežu, cijela distribucijska mreža i TS Kraljevac 35/10 kV napaja se iz TS Kraljevac 110/35 kV te mali dio energije dolazi iz agregata biološkog minimuma koji je spojen na 35 kV sabirnicu TS Kraljevac 35/10 kV.Iz rezultata simulacije vidljivo je da pri minimalnom opterećenju postoji nešto veći napon na 10 kV sabirnici nego pri maksimalnom opterećenju što je i normalna pojava jer u slučajevima smanjenog opterećenja u mreži dolazi do blagog porasta napona koji se mora držati u dozvoljenim granicama.

Kod priključenja vjetroelektrane na distribucijsku mrežu očekuje se blagi porast napona, ali on neće previše utjecati na prilike u mreži jer se vjetroelektrana spaja na 35 kV sabirnicu TS Kraljevac 35/10 kV pa će se zbog toga smanjiti njen utjecaj na trošila koja se napajaju iz navedene transformatorske stanice. Prilikom priključenja vjetroelektrane na mrežu promatraju se 2 slučaja i to kada je cosφ=1 te kada je cosφ= 0,95 ind. U prvom slučaju vjetroelektrana u mrežu injektira samo djelatnu komponentu snage te blago podiže naponske prilike u mreži te pri maksimalnom opterećenju pomaže da naponi ne padnu ispod dozvoljenih granica. U drugom slučaju vjetroelektrana dolazi do malog porasta naponskih prilika u mreži koje su i tada bile u dozvoljenim granicama. Ovaj drugi slučaj se neće često upotrebljavati jer je investitoru u cilju da elektrana što više radi sa cosφ=1 kako bi se ostvario što veći profit od proizvedene radne energije.

Što se tiče gubitaka u mreži, može se zaključiti da su pri maksimalnim opterećenjima u mreži gubici veći nego pri minimalnim što je i normalno jer pri maksimalnim opterećenjima mrežom teku puno veće struje. Priključenjem vjetroelektrane gubici u mreži se povećavaju i to 2 puta više, a najveći dio gubitaka javlja se na 14 kilometara dugom priključnom vodu elektrane i TS Kraljevac . Gubici u mreži postaju još veći i nepovoljniji kada elektrana radi s cosφ=0,95 ind.

4. ZAKLJUČAK

Prilikom integracije vjetroelektrane u distribucijskom sustavu dolazi do dodatnih izazova u planiranju i vođenju cijelog sustava. Potrošačima koji su spojenu na distribucijsku mrežu mora se osigurati konstantno napajanje električnom energijom koja mora zadovoljavati uvjete kvalitete koji su propisani normom. Vjetroelektrane koriste besplatno i ekološki prihvatljivo gorivo, ali je najveća mana jer nije dostupno tokom cijelog dana, nego samo u određenim trenutcima prema kojim se mora planirati proizvodnja i vođenje sustava. Ako se u sustav integrira nova vjetroelektrana, tada je potrebno odraditi simulacijske analize kako bi se provjerilo može li se planirana elektrana spojiti na mrežu te kakvi su njeni utjecaji na strujno-naponske prilike u mreži. Iznos napona u mreži propisan je normom te on mora biti zadovoljen i mora se održavati u dozvoljenim granicama. Ukoliko u distribucijskoj mreži vlada maksimalno opterećenje, vjetroelektrana i druga napojna točka moraju osigurati potrebnu snagu i iznos napona kako bi sustav bio održiv. U trenutku kada se opterećenje smanji na minimum, doći će do pojave povećanja napona. Kod vjetroelektrana ovaj problem se treba posebno proučiti iz razloga što vjetroelektrane najveću energiju obično proizvode noću kada je u mreži opterećenje minimalno. Iznos napona regulira se transformatorskim preklopkama tako da se podiže ili spušta napon ovisno o potrebama. U ovoj simulaciji mijenjani su položaji preklopki na transformatorima TS Kraljevac 35/10 kV tako da je položaj preklopke postavili na položaj 1 kako bi se napon spustio za 2,5 %. Postavljene preklopke zadovoljavaju sve slučajeve koji se proučavaju.

U simulacijskom dijelu promatran je sustav bez elektrane i sustav sa priključenom elektranom i to na način da se razmatra sustav pri minimalnom i maksimalnom opterećenju. Simulacija se provodi na način da su se promatrali naponski profili pojedinih izvoda iz kojih su vidljivi iznosi napona na početku i na kraju izvoda te se donosi zaključak može li elektrana raditi i zadovoljavati potrebe sustava. Također su se pratili iznosi gubitaka koji se javljaju u mreži.

Iz odrađenih mjerenja vidljivo je da su u svim slučajevima naponi u mreži u dozvoljenim granicama te da u niti jednom trenutku napon ne prelazi dozvoljene granice. Ukoliko bi opterećenje u sustavu palo ispod minimuma s kojim se računa, sustav bi bio i dalje održiv jer i dalje postoji dodatna mogućnost regulacije pomoću transformatorskih preklopki. Transformatorske preklopke se u pravilu ne postavljaju odmah na krajnji položaj preklopke, već se ona ostavlja kao rezerva kako bi se kasnije moglo reagirati i napon dovesti u dozvoljene granice.

POPIS LITERATURE

[1] T. Ackermann, Wind power in power systems, second edition. Izdavač, John Wiley & Sons. United Kingdom, 2012.

[2] M.Stiebler, Wind Energy Systems for Electric Power Generation, Izdavač, Springer, Berlin, 2008.

[3] B. Fox, L. Bryans, D. Flynn, N. Jenkins, D.Milborrow, M. O`Malley, R. Watson, O. Anaya-Lara, Wind Power Integration 2nd edition, Michael Faraday House, London, 2014.

[4] Deutsches Windenergie-Institut, Wind Turbine Grid Connection and Interaction, Germany, 2001.

[5] DNV GL, Definitions of Availability Terms for the Wind Industry, doc.no.EAA-VP-15, USA, 2017.

[6] S. Heier, Grid integrationn of wind energy, third edition. Izdavač, Kassel University, Germany,2014.

[7] P. Jain, Wind energy engineering. Izdavač: The McGraw-Hill Companies, 2011.

[8] Prethodna elektroenergetska suglasnost(PEES) broj: 401304-110108-0021, Elektrodalmacija Split, 2014.

[9] Studija o utjecaju na okoliš vjetroelektrane „KOM-ORJAK GREDA“, Zagreb, listopad 2008.

[10] Idejno rješenje optimalnog priključka vjetroelektrane „KOSTANJE-TRNBUSI“ na elektroenergetski sustav, Split, kolovoz 2007.

SAŽETAK

Integracija vjetroelektrane u sustav može biti moguća tek nakon što elektrana sve svoje izlazne veličine prilagodi prema mrežnim pravilima. Prvo poglavlje je uvodno poglavlje kod kojeg je iznesena problematika zadatka te opisan zadatak diplomskog rada U drugom poglavlju dana je teorijska analiza utjecaja vjetroelektrana na distribucijsku mrežu. Treće poglavlje odnosi se na simulacijski dio analize kod kojeg je prvo opisana promatrana vjetroelektrana, zatim je opisana okolna distribucijska mreža, prikazan proračun opterećenja sustava te je odrađena računalna simulacija utjecaja vjetroelektrane na distribucijsku mrežu te su prikazani rezultati simulacije. Na kraju rada donesen je konačan zaključak i osvrt na cjelokupan rad.

KLJUČNE RIJEČI: Vjetroelektrana, regulacija napona, kvaliteta električne energije,distribucijska mreža

ABSTRACT

Integration of the wind power into the system can only be possible after the power plant adjusts all its output sizes according to the network rules. The first chapter is an introductory chapter where the task problem is described and the graduate thesis described. In the second chapter, a wind power analysis of the distribution network's theoretical analysis is given. The third chapter refers to the simulation part of the analysis where the observed wind power plants are described first, then the surrounding distribution network is described, the system load calculation is presented and a computerized sumulation of the impact of the wind power on the distribution network is done and the simulation results are presented. At the end of the work, a final conclusion was made and a review of the whole work.

KEY WORDS: Wind Power, Voltage Regulatation , Electricity Quality, Distribution Network

ŽIVOTOPIS

Krunoslav Jaredić rođen 07.01.1993. u Slavonskom Brodu. Mjesto boravišta je u Oprisavcima a osnovnu školu Stjepana Radić završio je u Oprisavcima. Srednju Tehničku školu završio je u Slavonskom Brodu za smijer Elektrotehničar.Sudjelovanje na međužupanijskom natjecanju iz Osnova elektrotehnike 2009.godine. 2011 godine nastavlja svoje školovanje, upisuje stručni studij Elektroenergetike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku i završava ga 2015. godine. Iste godine upisuje razlikovne obveze te nakon završetka, 2016. Godine upisuje diplomski studij, smjer Energetika, studijski program Održiva energetika. Na prvoj godini diplomskog studija Krunoslav postaje kadrovski stipendist Elektrodalmacije Split te u dogovoru s njima mora odraditi i diplomski rad. Diplomski studij završava 2018. godine.

POPIS SLIKA

Slika 1: Shema generatora koji napaja veliki sustav preko nadzemnog voda[3] 3
Slika 2: Regulacija napona za aktivnu snagu[3] 4
Slika 3: Regulacija napona za reaktivnu snagu[3] 4
Slika 4: Vrijednosti pojedinih harmonijskih napona (postotak od nazivnog napona prema normi EN50160) 7
Slika 5:Koncepti kompenzacijskih uređaja a)osnovni sklopovi; b)ulazna karakteristika [2] 11
Slika 6: definicija vjetroelektrane i tokove snage 12
Slika 7: Krivulja snage i vjetroturbine 14
Slika 8: Raspored vjetroagregata te priključni vod do TS 35/10 kV Kraljevac 20
Slika 9: 10 kV mreža s pripadajućim opterećenjima koji se napajaju iz TS 35/10 kV Kraljevac 22
Slika 10: Tokovi snaga u distributivnoj mreži bez elektrane s minimalnim opterećenjem 25
Slika 11: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu bez elektrane s minimalnim opterećenjem 26
Slika 12: Tokovi snaga u distributivnoj mreži bez elektrane s maksimalnim opterećenje 27
Slika 13: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu bez elektrane s maksimalnim opterećenjem 28
Slika 14: Tokovi snaga u distributivnoj mreži sa priključenom elektranom (cosϕ=1) s minimalnim opterećenjem 29
Slika 15: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=1) s minimalnim opterećenjem 30
Slika 16: Tokovi snaga u distributivnoj mreži sa priključenom elektranom (cosϕ=1) s maksimalnim opterećenjem 31
Slika 17: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=1) s maksimalnim opterećenjem 32
Slika 18: Tokovi snaga u distributivnoj mreži sa priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s minimalnim opterećenjem 33
Slika 19: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s minimalnim opterećenjem 34
Slika 20: Tokovi snaga u distributivnoj mreži sa priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s maksimalnim opterećenjem 35
Slika 21: Grafovi naponskih profila svakog izvoda za mrežu s priključenom elektranom (cosϕ=0,95 ind) s maksimalnim opterećenj 36

POPIS TABLICA

Tablica 1: Osnovne specifikacije vjetroturbine MM92 19
Tablica 2: Osnovne specifikacije blok transformatora smještenih unutar svake proizvodne jedinice 19
Tablica 3: Udio pojedinih trafostanica u cjelokupno promatranoj 10 kV mreži 21
Tablica 4: Udio pojedinih vodova u cjelokupno promatranoj 10 kV mreži 21
Tablica 5: Proračunate minimalne i maksimalne vrijednosti snage za svaki izvod 23
Tablica 6: Gubici u mreži za sve promatrane slučajeve tijekom simulacije 37