

# Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na naponske prilike u mreži

---

**Horvat, Antonio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:713750>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

**Sveučilišni diplomski studij**

**Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na  
naponske prilike u mreži**

**Diplomski rad**

**Antonio Horvat**

**Osijek, 2016**



FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,  
RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA OSIJEK

## Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 08.09.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

### Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Antonio Horvat
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-785A, 07.10.2014.
<b>OIB studenta:</b>	09165644551
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Danijel Topić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na naponske prilike u mreži
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Dati teorijski pregled utjecaja distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na tokove snaga u mreži u smislu naponskih prilika i s tim povezanog projektiranja distributivnog izvoda. U praktičnom dijelu izvršiti simulaciju za teorijski prikazane slučajeve i utvrditi utjecaj na naponske prilike i dozvoljenu razinu integracije na izvodu.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 Jasnoća pismenog izražavanja: 2 Razina samostalnosti: 3
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	08.09.2016.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:



FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,  
RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 20.09.2016.

Ime i prezime studenta:	Antonio Horvat
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-785A, 07.10.2014.
Ephorus podudaranje [%]:	0%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na naponske prilike u mreži**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje.....	3
2.2. Naponska margina, i razina integracije .....	5
2.2.1. Održavanje napona u distributivnim mrežama .....	5
2.2.2. Porast napona zbog utjecaja distribuirane proizvodnje.....	7
2.2.3. Razina integracije.....	7
2.2.4. Asinkroni generatori .....	9
2.2.5. Eksperimentalne metode određivanja razine integracije .....	11
2.2.6. Procjena razine integracije bez mjerenja.....	13
2.2.7. Odabir prenaponskog limita .....	14
2.2.8. Dijeljenje razine integracije.....	15
2.3. Projektiranje distributivnog voda.....	16
2.3.1. Osnovna pravila za projektiranje voda.....	20
2.3.2. Terminologija korištena prilikom projektiranja vodova.....	21
2.3.3. Pojedinačna proizvodnja uzduž srednjenaponskog voda .....	22
2.3.4. Niskonaponski izvod.....	28
2.3.5. Serijska i paralelna kompenzacija .....	29
2.3.6. Tehnički uvjeti priključenja distributivne proizvodnje na mrežu.....	32
2.4. Numerički pristup promjenama napona.....	32
2.4.1. Primjer dvostupanjskog povećanja napona.....	32
2.4.2. Opći izrazi za dvostupanjsko povećanje napona. ....	33
2.4.3. Jednostupanjsko povećanje napona .....	34
2.4.4. Mikrogeneracija .....	35
<b>3. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE RAZINE INTEGRACIJE MREŽE</b> .....	<b>38</b>
3.1. Opis mreže u okolini elektrane Orlovnjak.....	38
3.1.1. Popis transformatora i vodova .....	40
3.1.2. Tereti pojedinih izvoda .....	40
3.1.3. Podatci o korištenom programu za izradu simulacija .....	41
3.2. Analiza utjecaja distribuirane proizvodnje na mrežu .....	41

3.2.1.	Analiza mreže bez elektrane.....	42
3.2.2.	Analiza mreže sa elektranom .....	43
3.3.	Eksperimentalno određivanje razine integracije .....	44
3.3.1.	Utjecaj izgradnje nove trafostanice .....	47
3.3.2.	Proširenje elektrane Orlovnjak.....	50
3.3.3.	Utjecaj malog fotonaponskog sustava. ....	52
	Zaključak .....	54
	Literatura .....	56
	Popis kratica .....	57
	SAŽETAK.....	58
	Životopis.....	59
	Prilozi.....	60

## 1. UVOD

U današnje vrijeme elektroenergetski sustav se nalazi na prekretnici u načinu vođenja. Tradicionalno je proizašao od centralnog načina upravljanja i proizvodnjom, gdje su velike proizvodne jedinice pokrivala potrebe za energijom. Takav način vođenja omogućavao je operatoru da uvijek može procijeniti koliko će energije biti potrebno za proizvesti u nekome budućemu trenutku. Na temelju toga mogao je raditi koordinaciju proizvodnje i raspoloživih rezerva u sustavu.

Razvojem tehnologija postalo je moguće da se i mali proizvođači električne energije spoje na mrežu, te da sudjeluju na tržištu električne energije. Dodatni poticaj malim proizvođačima je što dobivaju pogodnosti u odnosu na velike proizvođače. Da bi se potaklo ljude da se upuste u proizvodnju električne energije, oni dobivaju status povlaštenog proizvođača, koji im osigurava da će moći u svakome trenutku predati u mrežu svu količinu energije koju su u mogućnosti proizvesti u tome trenutku. Osim toga dobivaju i povlaštenu cijenu električne energije.

Kako se distribuirana proizvodnja zbog male količine energije koje proizvode obično spaja na distributivnu mrežu koja se smatra pasivnom, doći će prividno do smanjenja potrošnje na tome izvodu. U pojedinim slučajevima kad je proizvodnja veća od potrošnje, tokovi snage će promijeniti smjer, te će krenuti s nižeg napona prema višem. Time pasivna niskonaponska mreža postaje aktivna. Samim time promijeniti će se naponski profili u niskonaponskoj, te i u dijelu srednjenaponske mreže.

U ovome radu prikazati će se utjecaji distribuirane proizvodnje na naponske prilike u mreži. Ovaj utjecaj distribuirane proizvodnje na naponske prilike je važno poznavati s ciljem koordinacije napona. Prilikom spajanja nove proizvodne jedinice na mrežu, potrebno je osigurati da ona nema negativan utjecaj na mrežu, pogotovo na naponska ograničenja te na prijenosni kapacitet vodova. Ova dva ograničenja nam definiraju razinu integracije nove proizvodnje na dijelu mreže.

U prvome dijelu rada prikazat će se kako distribuirana proizvodnja utječe na naponske prilike u mreži, te će se definirati limiti koji se moraju održati s ciljem ispravnog rada mreže prema trenutnim tehničkim normama. Na temelju toga prikazat će se načini održavanja napona u pasivnim mrežama. Iz toga će slijediti kako distribuirana proizvodnja utječe na naponske prilike u mreže, te će se definirati razina integracije.

Nakon toga prikazat će se metode mjerenja i procjene razine integracije jer je to bitno za analizu mogućnosti spajanja nove proizvodnje. Osim toga prikazat će se smjernice za projektiranje izvoda, te će se teorijski prikazati kako proizvodnja utječe na naponske prilike u vodovima.

Prikazati će se i moguće metoda kompenzacija s ciljem povećanja razine integracije. Ovo je važno u slučaju kada dosegemo neki od tehničkih limita, da popravimo strujno naponska stanja u mreže, te potencijalno povećamo količinu proizvodnje.

U praktičnome dijelu rada, analizirati će se utjecaj nove bioplinske elektrane na rad sa mrežom.

Prvo će se vidjeti stanje u mreži prije puštanja elektrane u pogon. Nakon toga analizirati će se kakav je utjecaj elektrane na mrežu. Konačno će se vidjeti kakav je utjecaj spajanje elektrane preko nove trafostanice prema krutoj mreži.

Na kraju rada analizirati će se i utjecaj fotonaponskih sustava spojenih na niskonaponsku mrežu.



## **2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA**

Razvoj elektroenergetskog sustava započeo je 1882. godine. Tada je puštena u pogon prva termoelektrana. U prvim godinama razvoja elektroenergetskog sustava koristili su se dostupni izvori energije. Obično su to bili parni strojevi, te hidro potencijali. Ovo je direktno primjena tehnologija koja je proizašla iz industrijske revolucije. Razvojem industrije rasla je i potreba za energijom. Samim time puštale su se u pogon sve veće elektrane, koje bi pokrile veliku potrebu za energijom. Ovaj način proizvodnje je funkcionirao do sedamdesetih i osamdesetih godina 20. stoljeća, kad je došlo do naftne krize. Tada je već postojalo nekoliko vjetroelektrana, ali to su sve bila mala energetska postrojenja. Tek se nakon krize počelo razmatrati mogućnost dobivanja veće količine energije iz vjetra. Prvi značajni eksperiment je izvela NASA, koja je u sklopu vladinog projekta analizirala potencijal različitih tehnologija za primjenu u komercijalne svrhe. Neke od tehnologija koje su se analizirale još se i sada primjenjuju u praksi.

Razvoj novih tehnologija smanjio je cijenu proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Samim time su mali izvori postali zanimljivi privatnim investitorima za ulaganje. Liberalizacijom tržišta električnom energijom otvorena je mogućnost spajanja malih proizvođača električne energije na mrežu. Oni dobivaju status povlaštenog proizvođača, te operator ne može utjecati na količinu energije koju će isporučiti u mrežu, te vremena kad će je isporučiti. S druge strane operator prijenosnog sustava ili operator distribucijskog sustava dužni su u slučaju kad se javi potreba za ograničenjem isporuke električne energije dati prioritet proizvodnje povlaštenom proizvođaču.[8] Jedino u slučaju opasnosti od pojave nestabilnosti u mreži, operator tada može isključiti povlaštenog proizvođača s mreže.

Kako je strukturno proizvodnja, prijenos i distribucija bila pod nadzorom jedne kompanije, sustav je projektiran da se centralno nadzire proizvodnja energije, koja se prenosi s višeg napona prema nižem. Distribuirana proizvodnja je ovdje počela utjecati na tokove snaga, pa se počelo pojavljivati da energija s nižeg napona teče prema višemu.

Drugi problem koji se javlja s distribuiranim proizvodnim jedinicama, pogotovo onim iz obnovljivih izvora, je što se njihova proizvodnja ne može točno predvidjeti. Njihova proizvodnja uglavnom ovisi o trenutnim meteorološkim čimbenicima.

### **2.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje**

Prilikom projektiranja distributivnih mrežama, posvećuje se značajna pažnja zaštiti od pojave prekomjernih padova napona. Padovi napona direktno utječu na ukupnu duljinu pojedinih

izvoda. Zbog toga su razvijene metode koje sprečavaju ili smanjuju prevelike padove napona. Do sada se nisu posebno promatrali slučajevi pojave prenapona u mreži. Ako se postave naponi na početku sredjenaponskog, odnosno niskonaponskog voda blizu naponskom limitu, teško se mogu kod potrošača pojaviti prenaponi.

Pojava sve veće distribuirane proizvodnje u mrežama stvorila je potrebu da se posebna pažnja posveti problematici pojave prenapona. Kako distribuirani izvori podižu napone, postavlja se zahtjev pred operatora da ne dozvoli da naponi prijeđu dozvoljene granice.

Distributivna mreža se kroz povijest razmatrala kao pasivna mreža. Pretpostavljalo se da se tokovi snaga kreću od višeg napona prema nižem. Drugim riječima ovo znači da se proizvodnja mora prilagođavati potrošnji. Glavni faktor koji ograničava spajanje distributivnih izvora udaljenih od početka voda, je mogućnost pojave prenapona na nekoj točki između početka voda, i distributivnog izvora koji se spaja na mrežu.

Porast napona uslijed utiskivanja radne snage u mrežu, proporcionalan je omskom dijelu impedancije izvora na mjestu spajanja na mrežu. Za udaljene lokacije porast napona može biti značajan. Prijenosna i distributivna mreža razlikuju se u parametrima  $R$  i  $X$ . Za prienosnu mrežu vrijedi da je  $R \ll X$ , dok s druge strane u distributivnoj niskonaponskoj mreži vrijedi da je omjer  $R \sim X$ .

Snaga koju možemo utisnuti u mrežu, obično je puno manja od potrošnje koja je spojena na tu mrežu. Razlog tome je povećanja napona koje stvara distributivna proizvodnja. Samo na kratkim vodovima, potrošnja može stvoriti limit za količinu proizvodnje koja se može spojiti.

Najveće poraste napona stvaraju generatori koji rade s jediničnim faktorom snage. Generatori koji ne rade sa jediničnim faktorom snage, mogu omogućiti veću snagu koja se može spojiti na mrežu. Razlog za to je što oni u manjoj mjeri podižu napon. U ovu svrhu se obično koriste asinkroni generatori.

Spajanje distributivne proizvodnje na mrežu može imati i neke pozitivne utjecaje na mrežu [2]:

- Smanjenje gubitaka,
- Poboljšanje naponskih prilika u mreži i kvaliteta električne energije,
- Rasterećenje postojećih prienosnih i distributivnih transformatora i vodova,
- Odgoda u izgradnji nove prienosne i distributivne infrastrukture,
- Ne zagađuje okoliš kad se koriste obnovljivi izvori,

## 2.2. Naponska margina, i razina integracije

Da bi se mogla postići odgovarajuća kvaliteta napona kod potrošača, nužno je održavati napon u određenim granicama. Napon je potrebno održavati u granicama od 90 do 110% nazivne vrijednosti, jer su to naponi za koje su projektirani električni uređaji. Promjena napona izvan ovih granica može značajno utjecati na ispravan rad uređaja. Osim toga moguće je smanjiti vijek trajanja uređaja.

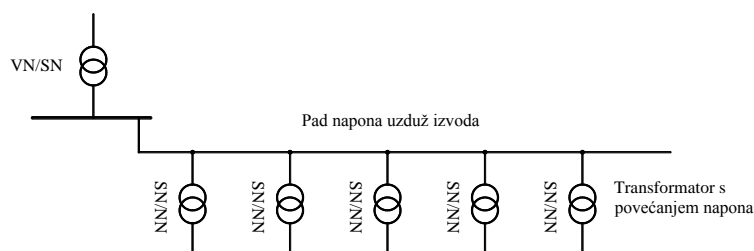
Smanjenjem napona može se manifestirati na nekoliko primjera. Svjetlosni tok žarulje značajno opada sa smanjenjem napona. Isto tako smanjenjem napona povećava se klizanje asinkronog motora, što ima za posljedicu smanjenje razvijene snage na osovini, te prekretni moment opada s kvadratom napona. S druge strane preveliki napon smanjuje životni vijek žarulja, te se jalova struja magnetiziranja motora povećava zbog zasićenja željeza sa trećom potencijom. [9]

Da bi znali koliko smijemo povećati napon, koristimo pojam naponska margina. To je razlika u naponu između gornjeg naponskog limita, i napona na tome promatranome mjestu. Nju je potrebno poznavati da bi mogli odrediti koliku proizvodnju možemo spojiti na tome mjestu. Isto tako kad radimo kompenzaciju pada napona, ona nam govori koliko smijemo povećati napon, a da on u niti jednome trenutku ne premaši dozvoljene granice.

### 2.2.1. Održavanje napona u distributivnim mrežama

Najčešće korištena metoda kontrole napona je prikazana na slici 2.1. Napon na sekundarnoj strani srednjenaponskog transformatora drži se na nekoj razini pomoću automatske preklapke regulacijskog transformatora.

Radna i jalova snaga će utjecati na padove napona duž voda. Manji pad napona pojavit će se kod minimalne potrošnje djelatne i jalove snage, a veći kod velike potrošnje. Zbog ovog imamo problem da su transformatori na kraju srednjenaponskog voda na manjem naponu od onih na početku. Da bi se ovo kompenziralo, transformatori sa srednjeg na niski napon postavljaju se duž izvoda sa različitim prijenosnim omjerima. Tu se obično koriste transformatori s odvojcima.

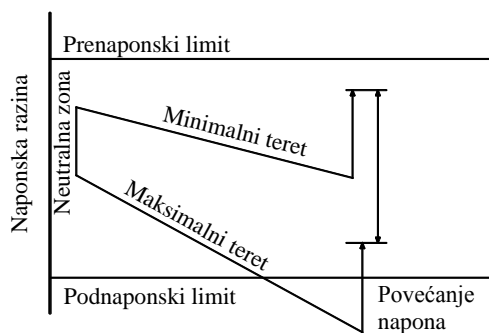


Slika 2.1. Osnovni način regulacije napona u distributivnim mrežama.

Kako se približavamo kraju srednjenaponskog izvoda, prijenosni omjer transformatora se smanjuje. Na početku izvoda može se staviti transformator s prijenosnim omjerom 10,5kV/0,4kV, dok na kraju voda može biti transformator s prijenosnim omjerom 9,5 kV/0,4 kV. Ovom metodom napon se može povećati obično oko 5%. [1]

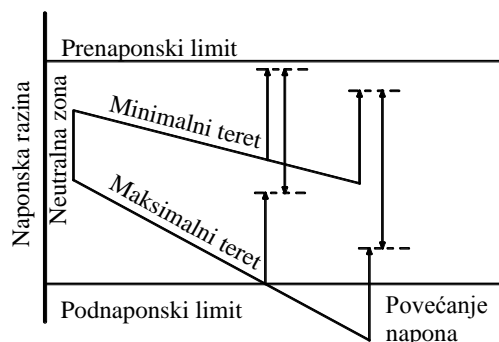
Regulacijom moramo postići da je napon unutar podnaponskih i prenaponskih granica. Europska mreža definira ove granice u normi EN 50160. Norma definira naponske granice u rasponu 90% do 110% nazivnog napona.[1]

Princip regulacije prikazan je na slici 2.2. Neutralna zona (*eng. deadband*) odabire se iznad nazivnog napona, tako da pad napona održi napon u nazivnom području. Napon kod zadnjeg potrošača mora biti iznad podnaponskog limita. Kriterij za prenaponsko ograničenje nije zadnji potrošač, nego potrošač najbliže početku izvoda, jer se podrazumjeva da je najveći napon na početku voda.



Slika 2.2. Koordinacija napona na distributivnome vodu. [1]

Na slici 2.2. horizontalna linija predstavlja udaljenost od srednjenaponskog transformatora. Vertikalna linija prikazuje napon na vodu u odnosu na udaljenost od transformatora.



Slika 2.3. Naponska koordinacija duž voda, za najgori slučaj pojave prenapona. [1]

Razlika između najvećeg napona za nekog potrošača i naponskog limita naziva se prenaponska margina (engl. *overvoltage margin*).

Distributivna proizvodnja smanjiti će padove napona, uvijek kad distributivni generator utiskuje djelatnu snagu u mrežu. Rezultat toga je da se prenaponska margina smanjuje, te može doći do prekoračenja maksimalnog napona. U tome slučaju sustav više nije u dozvoljenim naponskim granicama, te možemo reći da je prekoračen maksimalni kapacitet.

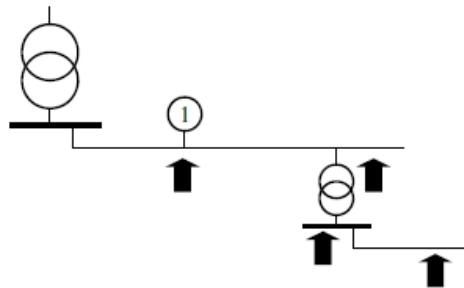
### 2.2.2. Porast napona zbog utjecaja distribuirane proizvodnje

Spajanje generatora na distributivnu mrežu, rezultirat će povećanjem napona na mjestu spajanja. Relativno povećanje napona može se aproksimirati sljedećim izrazom:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P_{gen}}{U^2} \quad (2-1)$$

gdje je  $R$  otpor izvora na mjestu spajanja na mrežu,  $P_{gen}$  utisnuta radna snaga u mrežu i  $U$  nazivni napon.

Ovdje aproksimiramo da generator utiskuje u mrežu samo djelatnu snagu, odnosno da radi sa faktorom snage jednakim 1. Slučajeve sa nejediničnim faktorom snage, razmotriti će se u sljedećim poglavljima. Relativni porat napona će primijetiti svi potrošači spojeni niz izvod.



Slika 2.4. Prikaz relativni porast napona. [1]

Na slici 2.4. brojem (1) prikazano je mjesto spajanja generatora. Porast napona osjetiti će se na svim mjestima, kako je prikazano sa strelicama na slici. Porast na zadnjem mjestu, bit će postotno jednak porastu napona na mjestu spajanja generatora.

### 2.2.3. Razina integracije

Razina integracije (engl. *hosting capacity*) je najveći dopušteni porast napon, kojeg dobijemo spajanjem distributivne proizvodnje. On dovede napon gotovo do naponskog limita, uz

ispunjenje svih kriterija uz koje će mreža raditi prema projektiranim zahtjevima. Naponska margina opisana u prošlom poglavlju, je definirana kao maksimalna razlika napona za pojedinog potrošača i naponskog limita.

Razina integracije nam govori koliku količinu proizvodnje možemo spojiti na mrežu, koja neće rezultirati sa pogoršanjem naponskih prilika za ostale potrošače u ostatku mreže. Odnosno razina integracije je količina proizvodnje koja će napon dići do naponske granice. Svaki potrošač ima drugačiju naponsku granicu. Spajanje generatora na distributivnu mrežu stvara jednak relativan porast napona za sve potrošače koji su spojeni na tu mrežu.

Razinu integracije možemo lako odrediti prema izrazu (2-2):

$$P_{max} = \frac{U^2}{R} \cdot \delta_{max} \quad (2-2)$$

gdje je  $\delta_{max} = \Delta_{max}/U$  relativna naponska margina izražena u postotcima, a  $\Delta_{max}$  apsolutna naponska margina.

Nadalje koristimo izraz za relaciju utjecaja otpora vodiča  $R$  i njegovog poprečnog presjeka  $A$ , ukupne duljine  $l$ .

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2-3)$$

Iz jednadžbi (2-2) i (2-3) dobijemo sljedeće odnose:

- Razina integracije je proporcionalan sa kvadratom napona.
- Razina integracije je linearan u odnosu na presjekom kabela.
- Razina integracije je linearan s prenaponskom granicom.
- Razina integracije je obrnuto proporcionalan s udaljenošću između generatora i transformatora. Što je generator udaljeniji, biti će manji kapacitet.

Ovdje treba primijetiti da promjenom jednog parametra utječemo direktno i na sve ostale. Na primjer, upotreba kabela s većim presjekom smanjit će otpor vodiča i povećat će prijenosni kapacitet. Također postoji razlika u upotrebi nadzemnih vodova i kabela. Nadzemni vodovi se obično koriste za napajanje udaljenih potrošača, te je njihova duljina obično ograničena samo sa padovima napona. Kabelima se obično napajaju potrošači koji su blizu trafostanice, te je duljina obično određena spojenim teretom. Zbog ovoga se češće javljaju prenaponski problemi kod nadzemnih vodova.

U radu [6] prikazani su neki od zaključaka utjecaja razine integracije fotonaponskih postrojenja na mrežu:

- Nije pronađeno negativnih utjecaja na kvalitetu energije u četiri razmatrana slučaja sa velikom razinom integracije u Europi.
- Prenaponi uzrokovani utjecajem fotonaponskih postrojenja mogu se smanjiti kontrolom jalove snage u većini slučajeva. Rezultati ovog su dobiveni simulacijom realne mreže.
- U niskonaponskim mrežama potrebno je posvetiti posebnu pažnju tokovima snaga u kabelima.
- U slučaju Njemačke, vršno opterećenje se može smanjiti za 5% u listopadu, ako se na 30% kućanstava instaliraju fotonaponske elektrane vršne snage 7 kW<sub>p</sub>.
- U novim mrežama, limit se mogu izbjeći postavljanje transformatora na napon od 0,98-1 p.u.

#### 2.2.4. Asinkroni generatori

Vjetroagregati se obično izvode kao trofazni asinkroni generatori. Njihovo važno svojstvo je da za svoj rad koriste jalovu snagu. Ona je potrebna za magnetiziranje, te ovisi direktno o kvadratu struje. Snaga koju oni koriste kompenzira se kondenzatorskim baterijama. Kako se izlazna snaga vjetroelektrane često mijenja, kompenzacija se ne vrši kontinuirano, nego samo u nekoliko koraka. Ponekad se kompenzacija zbog uštede i jednostavnosti izvedbe vrši sa samo jednom kondenzatorskom baterijom. Zbog toga oni uvijek koriste neku jalovu snagu iz mreže.

Za elektrane sa asinkronim generatorima propisano je da isporučuju u mrežu jalovu snagu u granici od 0% do 75% radne snage. Ovo odgovara faktoru snage 1 do 0,8 kapacitivno [7].

Jalova snaga prilikom maksimalne izlazne snage agregata je jednaka:

$$Q_{max} = \alpha \cdot P_{max} \quad (2-4)$$

Porast napona za vrijeme maksimalne proizvodnje je:

$$\Delta U_{gen,max} = RP_{max} - XQ_{max} = R \left(1 - \alpha \frac{X}{R}\right) P_{max} \quad (2-5)$$

Drugi član u jednadžbi (2-5) neovisan je o veličini generatora. Iz ovoga možemo uvesti u jednadžbu ekvivalentnu veličinu generatora  $(1 - \alpha X/R)$  koju moramo pomnožiti sa stvarnom snagom generatora. Razina integracije za stvarni asinkroni generator je:

$$P_{max} = \frac{1}{1 - \alpha \frac{X}{R}} \cdot \frac{U^2}{R} \cdot \delta_{max} \quad (2-6)$$

Za distributivne izvode  $X/R$  obično iznosi između 0,1 i 1,5. Jalova snaga asinkronog generatora je obično između 0,15 i 0,3 radne snage. Veću vrijednost imaju generatori spojeni preko transformatora. Faktor  $1-\alpha X/R$  je između 0,97 i 0,55. Za manji  $X/R$ , zbog tanjih vodiča i manji  $\alpha$  (kad je spojen bez transformatora), utjecaj reaktivne snage je malen. S druge strane za veliki  $X/R$  i  $\alpha$ , razina integracije može postati dvostruko veći od snage generatora, bez bilokakve potrošnja jalove snage[1].

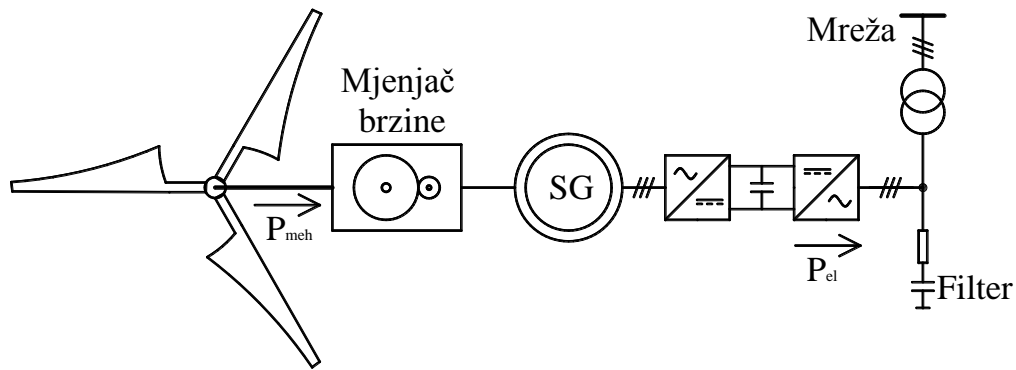
Asinkroni generatori se ne rade s jediničnim faktorom snage, nego obično sa 0,95 induktivnog karaktera. Faktor snage induktivnog karaktera, rezultirati će s manjim porastom napona nego da ima jedinični faktor snage. S druge strane kapacitivni faktor snage, mogao bi stvarati probleme s prenaponima, te samim time smanjuje razinu integracije. Odabirom induktivnog faktora snage  $\alpha=R/X$ , može smanjit porast napona. Pravilnim odabirom faktora  $\alpha$ , porast napona može se smanjiti na 0V. Kad je generator opremljen sustavom za korekciju faktora snage, može se postaviti takav faktor snage da je porast napona nula, neovisno o snazi koju generator proizvodi. Negativna strana ovog je da se rizik od pojave prenapona te gubitci povećavaju. Kad je povećanje napona limitirajući faktor za razinu integracije, to ne smanjuje količinu distributivne proizvodnje koja se može spojiti na mrežu. Drugi nedostatak je da moramo imati pretvarač veće snage, koji može zadovoljiti potrebu za jalovom snagom, čak i kad proizvodi maksimalnu količinu čisto djelatne snage.

Danas se u praksi obično koriste tri tipa asinkronih generatora. To su asinkroni generator s konstantnom brzinom vrtnje, asinkroni generator s prilagodljivom brzinom vrtnje, i dvostrano napajani generator sa promjenjivom brzinom vrtnje (DFIG).

Neke od prednosti generatora s promjenjivom brzinom vrtnje u odnosu na generatore s nepromjenjivom brzinom su: [5]

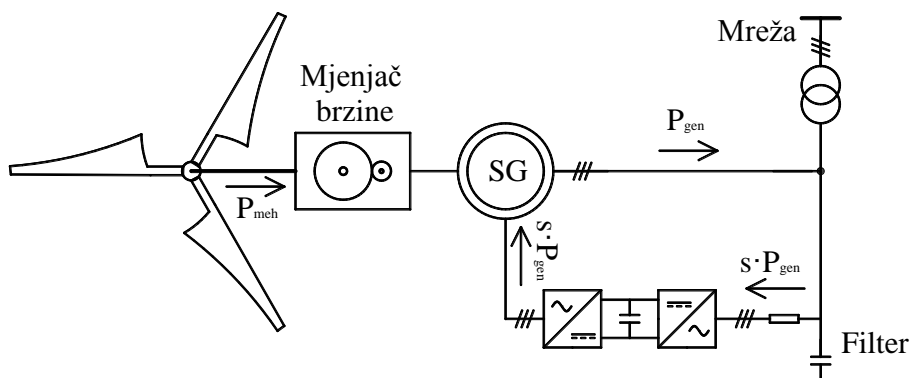
- Cjenovno su efikasniji jer se kontrola vrši promjenom kuta lopatica rotora,
- Smanjuju mehanička naprezanja usred naleta vjetra. Mogu energiju naleta vjetra uskladištiti kao inerciju turbine,
- Imaju poboljšanu kvalitetu energije. Pulsacije mogu biti reducirane, čime se smanjuje pojava flickera,
- Brzina turbine je podešena o funkciji brzine vjetra za proizvodnju maksimalne snage. Ovo rezultira povećanjem efektivnosti.





Slika 2.5. Shematski prikaz rada asinkronog vjetroagregata pomoću pretvarača

Generatori s promjenjivom brzinom vrtnje se obično spajaju na mrežu na dva načina. Prvi je direktno preko pretvarača i filtera na mrežu. Kod drugog načina generator je spojen direktno na mrežu, ali ima povratnu vezu sa mreže prema pretvaraču koji napaja rotor generatora. Zadaća pretvarača u DFIG generatoru je da vanjskim putem stvori okretno magnetsko polje, koje se prividno vrti frekvencijom 50 Hz (60 Hz).



Slika 2.6. Prikaz rada DFIG vjetroagregata

Prednost DFIG generatora je ušteda na cijeni pretvarača, jer je potrebna snaga pretvarača oko 25% snage generatora. Osim toga omogućuje se da generator radi do  $\pm 33\%$  sinkrone brzine [5]. Osim toga prednost dvostruko napajanog generatora je što se lako može izvesti sustav korekcije faktora snage.

### 2.2.5. Eksperimentalne metode određivanja razine integracije

Da bi mogli procijeniti razinu integracije, moramo poznavati preponsku marginu.

Najbolji pristup za određivanje prenaponske margine bio bi da dugoročno mjerimo napon kod svakog potrošača. Ovo metoda je teško izvediva. Ona zahtijeva skupu mjernu opremu, te sustav koji je sposoban prikupiti tu veliku količinu podataka, te ih potom sve obraditi. Mjerna oprema

treba u intervalima mjeriti napone i struje. Dobiveni podaci nisu važni samo za određivanje kapaciteta mreže, nego se na temelju njih mogu raditi koordinacije napona distributivnih mreža. Na temelju mjerenja lociraju se izvodi na kojima je prenizak napon, te se mogu pomoću preklopki transformatora prilagoditi naponi.

Ovu vrstu mjerenja se tek počela primjenjivati u nekoliko država. Obično se postavljaju brojića koja osim struje i napona, mjere još djelatnu i jalovu snagu. Unutar nekoliko godina prikupit će se velika količina podataka o mreži, te će se moći procijeniti kapacitet mreže. Kako ova metoda nije primjenjiva trenutno u svim državama, može se provesti i jednostavnije metode mjerenja. Mjerni instrumenti se postavljaju na limitirani broj mjesta u mreži, te se mjerenja provode unutar nekog vremenskog okvira. Prilikom ovog pristupa mjerenju, potrebno je pomno odabrati mjesto na kojem se postavljaju mjerni instrumenti. Mjesto na kojem ćemo provoditi mjerenje, ovisi o parametru mreže koji nas interesira. Ako želimo odrediti razinu integracije izvoda, mjerenja je potrebno provesti na mjestu s malom prenaponskim marginom. Osim određivanja samo razine integracije, možemo provesti i opširnija mjerenja, s ciljem određivanja napona duž izvoda. U tome slučaju, mjerenja je poželjno vršiti i na nekim drugim mjestima uzduž promatranog izvoda.

Iz (2-2) vidimo da je razina integracije manja za manji prenaponski limit  $\delta_{max}$ , i za veliku električnu udaljenost od trafostanice (veliki  $R$ ). Oba parametra se mijenjaju duž izvoda, te nije moguće općenito reći koja lokacija određuje razinu integracije. Kad se generator spoji na srednjenaponski vod, razina integracije je obično određen sa prenaponskom marginom sekundarne strane distributivnog transformatora, sa manjim brojem namota (prijenosni omjer koji povećava napon). Transformator sa manjim prijenosnim omjerom, koji je ujedno i bliže srednjenaponskoj sabirnici, vjerojatno će imati manju prenaponsku marginu. Preporučeno je provoditi mjerenja na sekundarnoj strani tog transformatora. [1]

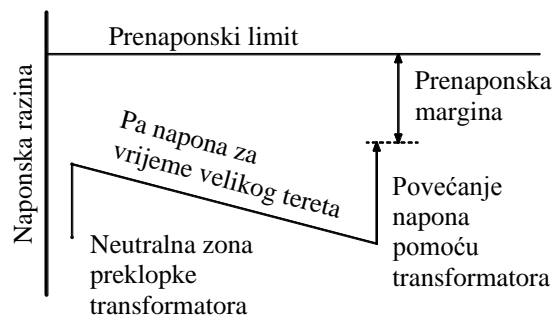
Nadalje će kroz vod rasti prenaponska margina, ovisno o padu napona za vrijeme minimalnog opterećenja, ali u isto vrijeme će porasti otpor izvora. Zbog toga se razina integracije može smanjiti. Preporučeno je provoditi mjerenja na nekoj udaljenoj lokaciji, osobito na onima s malim opterećenjem.

Mjerenja bi trebalo provoditi tokom cijele godine, da se vide utjecaji sezonskih varijacija. Ako je ovo teško za izvesti, mjerenja bi se morala provoditi po nekoliko tjedana, u poznatom periodu malog opterećenja. Ako je na izvod spojeno i neko industrijsko postrojenje, mjerenja se moraju provoditi kad je opterećenje postrojenja najmanje, da vidimo najveće napone koji se tada pojavljuju na vodu.

Kad planiramo provesti jednostavna mjerenja s ciljem povećanja razine integracije, pomoću promjena prijenosnog omjera transformatora, ili promjena nejediničnog faktora snage generatora, poželjno je provesti mjerenja na više mjesta duž izvoda. Mjesta na kojima provodimo mjerenja, morala bi biti tamo gdje pretpostavljamo da se mogu javiti najniži naponi.

### 2.2.6. Procjena razine integracije bez mjerenja

Kad ne postoje mjerenja, moramo procijeniti koliki su naponske margine na pojedinim vodovima. Kao što je rečeno, preporučljivo je provesti mjerenja, da dobijemo točnije i pouzdanije podatke. Razlozi za ne provođenje mjerenja mogu biti različiti. Mjerenja se obično ne provodimo zbog vremenskog ograničenja, kad su nam potrebni podatci u skoroj budućnosti, ili ako su nam ograničene financije namijenjene za provođenje mjerenja. Ako nam je vrijeme potrebno za dobivanje podataka o mreži ključni kriterij, svejedno je potrebno napraviti mjerenja iako smo već procijenili podatke o mreži. Metode procjene su prikazane na slici 2.7.



Slika 2.7. Procjena prenaponske margine. [1]

Metoda procjene prenaponske margine je sljedeća:

- Gornji limit neutralne zone postavljamo kao polaznu točku. To je najveći napon na srednjenaponskoj sabirnici.
- Pad napona uzduž srednjenaponskog izvoda, za vrijeme najmanjeg opterećenja je procijenjena. To daje najveći napon na srednjenaponskoj strani distributivnog transformatora.
- Kad je potrebno, pad napona na distributivnom transformatoru, te na pripadajućem distributivnom izvodu transformatora za vrijeme malog tereta se procijeni.
- Dodaje se povećanje napona distributivnog transformatora (obično +5%). To nam daje najveći napon na niskonaponskoj strani distributivnog transformatora.
- Prenaponska margina je razlika između napona i prenaponskog limita.

Trenutno ne postoji dovoljno točna metoda za procjenu razine integracije, koja se ne temelji na mjerenjima. Da bi se zaštitili, operatori prijenosne mreže obično preferiraju sigurniji pristup. Da bi osigurali da će parametri biti u dozvoljenim granicama, uzimaju vrijednosti pada napona za vrijeme malih opterećenja koje su manje od procijenjenih. Rezultat je manja procijenjena razina integracije nego u slučaju srednjeg procijenjenog kapaciteta. Kad je pad napona poznat mjerenjem, odabir prenaponskog limita može biti diskutabilan, jer operatori često ne žele riskirati.

Metode procjena (flickera, harmonika, i neravnoteže) obično se provode kada se analizira spajanje industrijskog postrojenja na prijenosnu mrežu. Kako se provode analize i procjene spajanja industrijskog postrojenja, isto tako se provode procjene spajanja distributivne proizvodnje. Za neke distributivne mreže, mogao bi se pojaviti problem spajanja distributivne proizvodnje.

### **2.2.7. Odabir prenaponskog limita**

Odabir naponskog limita direktno određuje razinu integracije izvoda, za spajanje distributivne proizvodnje. Što je manji prenaponski limit, manja je naponska margina. Kako je razina integracije direktno proporcionalan prenaponskoj margini, odabir prenaponskog limita je jako važan. Prenaponska margina, je obično veći za nekoliko posto od nazivnog napona. Smanjenje prenaponskog limita za 1%, može lako smanjiti razinu integracije dva puta.[1]

Kad gledamo prenaponski limit, važno je razlikovati s jedne strane naponsku karakteristiku i ostale zahtjeve postavljene pred mrežnog operatora, te s druge strane limite postavljene u razini planiranja i ostale interne limite koji se postavljaju pred operatora za dizajniranje distributivne mreže.

Europski standard za napon definiran je normom EN 51060 [1]. Ona definira da za napajanje niskonaponskih, odnosno sredjenaponskih potrošača za vrijeme normalnog rada, napon ne smije prijeći  $\pm 10\%$  nazivnog napona. Ovaj opći zahtjev nadalje je specificirano sljedećim zahtjevima:

- Najmanje 99% vremena unutar vremenskog okvira od 10 min, efektivne vrijednost napona mora biti unutar dozvoljenih granica
- Niti jedna vrijednost efektivne vrijednosti napona unutar tih 10 min, ne smije prelaziti vrijednost od  $\pm 15\%$  nazivnog napona

U brojnim europskim zemljama, regulativna tijela odgovorna za električnu mrežu postavljaju još neka striktnija pravila za sredjenaponske i niskonaponske potrošače.

Ponegdje se prenaponski limiti postavljaju čak i na granice između 107% do 115%. Da bi se operatori zaštitili da se ti limiti ne dosegnu, oni postavljaju svoje dodatno strože limite. Ovo je slično kao što se definira "razina planiranja" (engl. *planing level*) kad se razmatraju flickeri, harmonici i neravnoteža, prema standardima IEC 61000-3-6, IEC 61000-3-7 i IEC 61000-3-13. U ovim dokumentima dane su indikativne vrijednosti za planiranje, te su one ispod naponskih karakteristika.[1] Ovo daje operatoru granicu, koja osigurava da naponska karakteristika ne prijeđe dozvoljene vrijednosti.

Važno je primijetiti da je ovo razina planiranja koja se koristi prilikom analize spajanja distributivne proizvodnje na prijenosni sustav. Kad se odlučuje o spajanju distribuirane proizvodnje (određivanje kapaciteta), razina planiranja (određivanje naponskih limita) se također razmatra. Postoji nekoliko metoda za određivanje razine planiranja:

- Planirana razina se odabire puno manje od zahtijevane. Granica između zahtijevane, i planirane razine, smanjuje rizik za mrežnog operatora. Proračun razine integracije temelji se na procijenjenoj maksimalnoj proizvodnji različiti distributivnih izvora, te za minimalno opterećenje.
- Planirana razina mora biti jednaka zahtjevima. Rizik se smanjuje ako razmotrimo najgori slučaj, prilikom odabira izračuna razine integracije. Na primjer, razmatra se slučaj maksimalne proizvodnje, sa istovremenim izostankom bilo kakve potrošnje.
- Planirana razina je jednaka ili malo manja od zahtijevane. Proračuni se provode na realnim procjenama. Pored toga, regulator postavlja zahtjeve da se opasnost od prenapona ne stavlja pred operatora mreže.

Prvi i drugi pristup su danas najčešći. Može očekivati da će se još i više koristiti, kako će se od regulator zahtijevati sve veći zahtjevi za održavanje napona unutar sve strožih granica. Treći pristup bi se mogao koristiti u budućnosti, koji će spriječiti mrežnog operatora od nenamjernih postavljanja granica za spajanje distributivne proizvodnje.

### **2.2.8. Dijeljenje razine integracije**

U prethodnom dijelu, te u sljedećem poglavlju, fokus je postavljen na proizvodnju iz jednog generatora spojenu na sredjenaponsku mrežu. Kad se želi spojiti više generatora na mrežu potrebno je međusobno podijeliti razinu integracije. Ako se dva generatora spajaju na izvod na istome mjestu, proračun je u tome slučaju jednostavan. Ukupna proizvodnja ne smije nadmašiti kapacitet voda na mjestu gdje se spaja proizvodnja. Za dvije ili više proizvodnih jedinica, koje se spajaju na različitim mjestima u mreži, situacija postaje kompleksnija.

Iz jednadžbe (2-2) proizlazi da je kapacitet obrnuto proporcionalan mjestu gdje se spajaju generatori. Rezultati toga su prikazani na slikama 2.17 do 2.19. Iz slika vidimo da je razina integracije otprilike inverzno proporcionalan mjestu spajanja generatora.

$$\sum_i \lambda_{gen,i} P_i \leq P_{AK} \quad (2-7)$$

Gdje je  $P_{AK}$  razina integracije generatora spojenog na kraj voda. Za  $N$  generatora, dodijeljena snaga je sljedeća:

$$P_i \leq \frac{1}{\lambda_i} \frac{P_{AK}}{N} \quad (2-8)$$

Što smo bliže glavnoj sabirnici ( $\lambda=0$ ), veći generator se može spojiti.

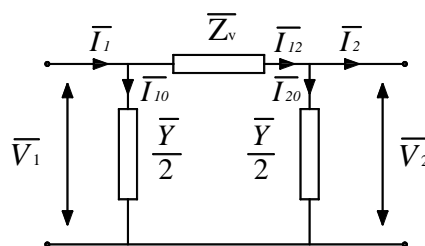
Jednadžba 2-8 pretpostavlja da svi generatori imaju maksimalnu proizvodnju u isto vrijeme. Ako to nije slučaj, može se spojiti više proizvodnje na taj izvod. Za taj slučaj su potrebna posebni proračuni, da bi se njihov rad mogao pravilno koordinirati.

### 2.3. Projektiranje distributivnog voda

Razvojem nekog područja javlja se potreba za sve većom količinom energije. Pred vlasnika mreže se postavlja zahtjev da osigura korisnicima kvalitetnu i dovoljnu količinu energije. Svaki projekt novih vodova može se smatrati jedinstvenim, jer se prilikom projektiranja mora u obzir uzeti puno parametara. Ovisno o zahtjevima mogu se koristiti nadzemni vodovi, ili podzemni kabeli. Isto tako na odabir kabela utječe dubina polaganja i toplinska vodljivost tla, jer nam o tome ovisi hlađenje kabela. Isto tako i način polaganja kabela ima utjecaj. S druge strane, nadzemni vodovi su osjetljivi na atmosferske pojave. Prilikom njihovog projektiranja mora se uzeti u obzir mehanička naprezanja koja se javljaju kao posljedica udara vjetra, i nakupljanja leda za vrijeme ekstremnih meteoroloških uvjeta koji se mogu pojaviti.

Svi ovi uvjeti će nam utjecati na odabir vrste vodova, te parametara tog voda.

Analiza napona na vodu, te padova napona obično se radi pomoću nadomjesne  $\Pi$  ili  $T$  sheme. Tipična  $\Pi$  shema je prikazana na slici 2.8.



Slika 2.8. Nadomjesna  $\Pi$  shema

gdje su:

- $\bar{I}_1, \bar{V}_1, \bar{I}_2, \bar{V}_2$  fazna struja i napon na početku i kraju voda
- $\bar{I}_{12}, \bar{I}_{10}, \bar{I}_{20}$  struje kroz uzdužnu i poprečnu granu

Kako II shema analizira beskonačno kratki dio voda, impedancija i poprečna admitancija se računaju prema izrazima:

$$\bar{Z} = R_1 l + j \cdot X_1 l [\Omega] \quad (2-9)$$

$$\bar{Y} = G_1 l + j \cdot B_1 l [S] \quad (2-10)$$

Otpor, reaktancija, vodljivost i susceptancija u jednadžbama 2-9 i 2-10 su jedinične vrijednosti.

Izraz za prividnu snagu na kraju voda je:

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_2 \cdot \bar{I}_2^* \quad (2-11)$$

Iz toga izraza možemo dobiti struju na kraju voda:

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{S}_2^*}{\sqrt{3} \bar{U}_2^*} = \frac{P_t - jQ_t}{\sqrt{3} U_2^*} = \frac{P_t - jQ_t}{\sqrt{3} U_2} \quad (2-12)$$

a struja na kraju voda:

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_2 + \bar{I}_{20} \quad (2-13)$$

Napon na kraju voda možemo dobiti kao razliku napona na početku voda, i pada napona duž voda:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \Delta \bar{U} = \bar{U}_2 + \sqrt{3} \cdot \bar{I}_{12} \bar{Z} \quad (2-14)$$

Struje kroz poprečne grane su:

$$\bar{I}_{10} = \frac{\bar{U}_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\bar{Y}}{2} \quad (2-15)$$

$$\bar{I}_{20} = \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\bar{Y}}{2} \quad (2-16)$$

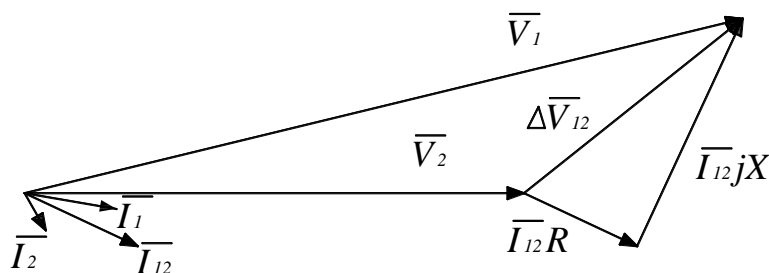
Sad kad smo dobili sve struje, možemo izračunati struju na početku voda:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} \quad (2-17)$$

Kad znamo struje, možemo izračunati prividnu snagu na početku voda:

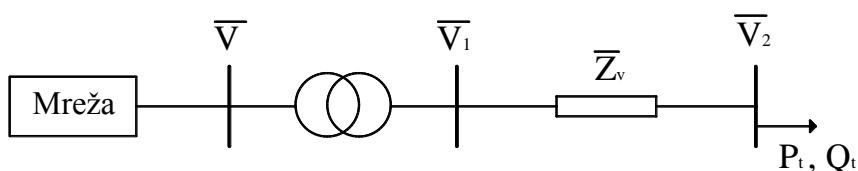
$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_1 \cdot \bar{I}_1^* \quad (2-18)$$

Iz dobivenog, možemo dobiti vektorski dijagram koji je prikazan na slici 2.9.



Slika 2.9. Vektorski dijagram

Nadalje razmotrimo jedan kratki vod, napajan preko trafostanice, koji napaja potrošača. Prilikom izvoda zanemarit će se poprečnu admitanciju, jer za niskonaponske vodove ona ima puno veću vrijednost u odnosu na impedanciju. [3] Nakon toga će se analizirati slučaj padova napona kad se na kraju voda spoji generator. Tipična mreža je prikazana na slici 2.10.



Slika 2.10. Razmatrana mreža

Struja na početku voda iz formule 2-18 je jednaka:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\sqrt{3}U_2^*} = \frac{P_t - jQ_t}{\sqrt{3}U_2^*} = \frac{P_t - jQ_t}{\sqrt{3}U_2} \quad (2-19)$$

U konačnoj verziji  $U_2$  nije konjugirano kompleksan, jer pretpostavljamo da je napon na kraju voda pod kutom  $0^\circ$ . Pad napona na vodu možemo dobiti množenjem struje kroz vod impedancije  $Z_v$ :

$$\Delta \bar{U} = \sqrt{3} \cdot \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_v \quad (2-20)$$

Sređivanjem dobijemo:

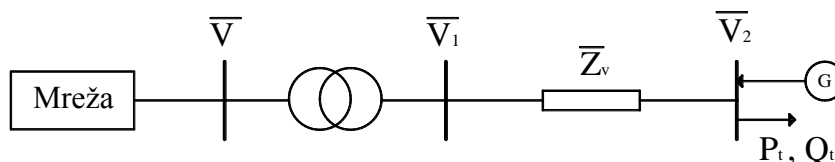
$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{U_2} [R_v P_t + X_v Q_t - j(R_v P_t - X_v Q_t)] \quad (2-21)$$

U praksi je fazni pomak napona obično dosta malen, pa možemo prethodni izraz pisati:

$$\Delta U = \frac{1}{U_2} (R_v P_t + X_v Q_t) \quad (2-22)$$



Prilikom spajanja distributivnog generatora na kraju voda, možemo smanjiti potrebu za djelatnom i jalovom snagom koja se prenose kroz vod. Na sljedećoj slici je prikazan slučaj sa generatorom spojenim na sabirnicu na kraju izvoda, na koji se spaja potrošnja.

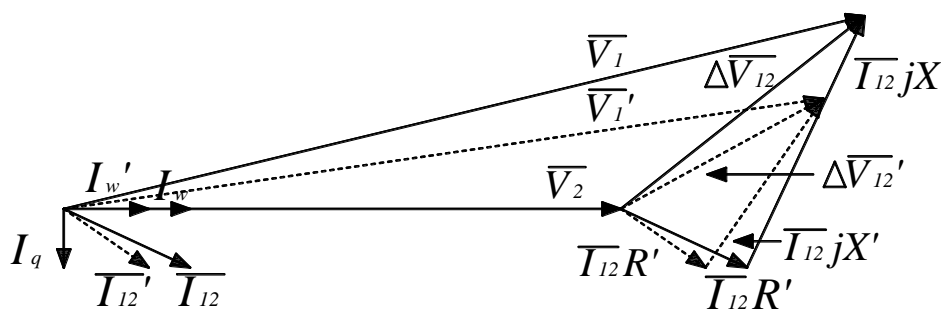


Slika 2.11. Mreža sa generatorom na kraju voda.

Dodavanjem generatora izraz 2-22 sad izgleda:

$$\Delta U = \frac{1}{U_2} [R_v(P_t - P_g) + X_v(Q_t - Q_g)] \quad (2-23)$$

Iz ovoga vidimo da najmanji pad napona imamo kad generator proizvodi ukupnu količinu energije koja se i troši. Ovdje se javlja problem sa solarnim pretvaračima koji su obično podešeni na jedinični faktor snage. Osim njih, male proizvodne jedinice ne moraju sudjelovati u regulaciji jalove snage. Regulaciju jalove snage moraju imati sve hidroelektrane nazivne snage veće od 10MW, te termoelektrane veće od 30MW. Za njihov rad je definirano da moraju raditi u području od 0,85 induktivno do 0,9 kapacitivno. [10]



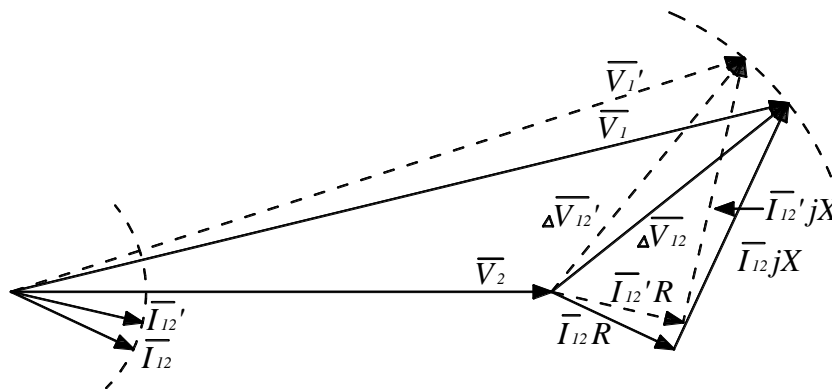
Slika 2.12. Vektorski dijagram nakon priključenja generatora

Na slici 2.12. isprekidanom crtom su prikazani naponi nakon spajanja generatora koji u mrežu utiskuje samo djelatnu snagu. Vidimo da se struja  $\bar{I}_{12}$  kroz vod smanjila, ali joj se povećao kut u odnosu na napon. Isto tako se smanjila razlika napona između početku i kraju voda.

Ako želimo povećati proizvodnju, a ne možemo više povećati napon moramo pristupiti kompenzaciji. Iz jednadžbe (2-23) vidimo da ako povećamo djelatnu i jalovu snagu u takvome omjeru da izraz u zagradi ostane konstantan, možemo povećavati snagu proizvodnje a da nam napon ostane nepromijenjen.

$$[R_v(P_t - P_g) + X_v(Q_t - Q_g)] = \text{konstantno} \quad (2-24)$$

Drugim riječima ovo znači da apsolutna vrijednost struje mora ostati nepromijenjen. Ovo možemo vidjeti na slici 2.13.



Slika 2.13 Vektorski dijagram u slučaju održavanja napona

Na slici 2.13 isprekidanom linijom je prikazan slučaj prije povećanja snage koja se utiskuje u mrežu. Kako vidimo na slici, da bi smo održali napon moramo smanjiti komponentu djelatne snage i povećati proizvodnju jalove. Ova metoda je opravdana sa ekonomskog stajališta samo u slučaju kad je plaćena proizvodnja jalove snage.

### 2.3.1. Osnovna pravila za projektiranje voda

Da bi se moglo pristupiti projektiranju, potrebno je uzeti u obzir neke pretpostavke. One su osnova od koje se kreće sa projektiranjem.

Osnovna pravila su sljedeća:

- Struja za vrijeme maksimalnog tereta ne smije prijeći strujna ograničenja voda.
- Maksimalan napon za svakog potrošača, ne smije prijeći dozvoljeni naponski limit.
- Minimalni napon za svakog potrošača ne smije biti manji od podnaponskog limita.

Prvo pravilo je obično namijenjeno urbanim mrežama sa velikom gustoćom opterećenja. U ovome poglavlju ćemo pretpostaviti da ovo nije ograničenja. Drugo ograničenje je zadovoljeno postavljanjem odgovarajuće neutralne zone na preklopci transformatora. Kad je na

transformatoru postavljeno povećanje napona od +5%, te je gornji limit napona postavljen na 4-5% ispod prenaponske granice. U tome slučaju malo je vjerojatno da će se pojaviti napon iznad 108%-110%. Treće pravilo postavlja samo limit na duljinu voda.

Kad spojimo generator na vod, može se dogoditi da imamo na njemu "negativan teret" (kad je proizvodnja veća od potrošnje). Zbog toga odabir neutralne zone, nije dovoljan da se spriječi pojava prenapona u mreži. Ovo može postaviti limit količine distribuirane proizvodnje koja se može spojiti, ili može staviti limit na duljinu voda. U oba slučaja projektiranje distributivnog voda postaje značajno kompliciranije za izvesti.

### 2.3.2. Terminologija korištena prilikom projektiranja vodova

U ovome dijelu, ilustrirati ćemo projektiranje distributivnog voda, sa nekim općenitim proračunima. Da bi smo pojasnili sljedeće proračune, opisać će se korištene oznake u njima.

Koristiti će se sljedeće oznake:

- $u_{min}$ : minimalan napon kod potrošača spojenog na niski napon,
- $u_{max}$ : maksimalan napon kod potrošača spojenog na niski napon,
- $u_{min,limit}$ : podnaponski limit,
- $u_{max,limit}$ : prenaponski limit,
- $u_{nz,max}$ : gornji limit preklopke transformatora neutralne zone,
- $u_{nz,min}$ : donji limit preklopke transformatora neutralne zone,
- $\Delta u_{max}$ : maksimalni pad napona kao posljedica potrošnje. Ne uključuje nikakvu promjenu napona kao posljedicu proizvodnje,
- $\Delta u_{min}$ : minimalni pad napona kao posljedica potrošnje. Ne uključuje nikakvu promjenu napona kao posljedicu proizvodnje,
- $\Delta u_p$ : porast napona sa podešenjem preklopki distributivnog transformatora,
- $\Delta u_{gen}$ : porast napona kao posljedica distribuirane proizvodnje. Ovo je maksimalan vrijednost, osim ako nije drugačije definirano.

Korištenjem ovih oznaka, drugo i treće pravilo za projektiranje distributivnog izvoda glasi:

$$u_{min} = u_{nz,min} - \Delta u_{max} + \Delta u_p > u_{min,limit} \quad (2-25)$$

i

$$u_{max} = u_{nz,max} - \Delta u_{min} + \Delta u_p + \Delta u_{gen} < u_{max,limit} \quad (2-26)$$

Ovdje je pretpostavljeno da je minimalni porast napona zbog distribuirane proizvodnje jednak nuli. Ponekad se za vrijeme vrše potrošnje, ne proizvodi radna snaga. Nadalje se pretpostavlja da je maksimalna proizvodnja za vrijeme najmanje potrošnje. Kad tokom dana postoji izražene varijacije u proizvodnji, ovaj pristup može umanjiti razinu integracije. Ovo je poseban slučaj za solarne elektrane. Ako se spajaju solarne elektrane, potrebno je napraviti detaljniju analizu utjecaja.

U sljedećem poglavlju primijenit ćemo navedena pravila na nekoliko vodova. Time ćemo analizirati utjecaj različitih parametara na kapacitet.

### 2.3.3. Pojedinačna proizvodnja uzduž srednjenaponskog voda

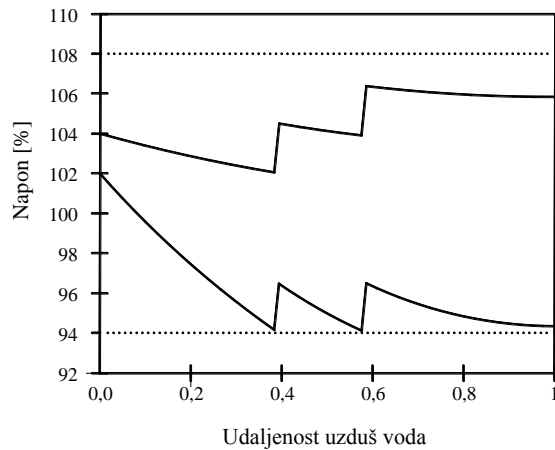
Analizirajmo linearan srednjenaponski izvod ukupnog otpora  $R$ , i ukupne reaktancije  $X$ , sa radnom snagom  $P$  i jalovom  $Q$ . Pretpostavimo da su opterećenja jednoliko raspoređena duž voda, te da je jedinična impedancija voda ostaje nepromijenjena duž izvoda. Generator proizvodi radnu snagu  $P_{gen}$  sa jediničnim faktorom snage, te je spojen na izvod na lokaciji  $\lambda = \lambda_{gen}$ , gdje  $\lambda = 0$  odgovara početku izvoda, a  $\lambda = 1$  odgovara kraju tog izvoda. Pad napona koji nastaje kao posljedica spojenih opterećenja glasi:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_{nom}} = \frac{RP + XQ}{U_{nom}^2} \left( \lambda - \frac{1}{2} \lambda^2 \right) \quad (2-27)$$

Porast napona zbog proizvodnje je linearan udaljenost kroz izvoda.

$$\Delta u_{gen} = \begin{cases} \lambda \frac{RP_{gen}}{U_{nom}^2}, & \lambda \leq \lambda_{gen} \\ \lambda_{gen} \frac{RP_{gen}}{U_{nom}^2}, & \lambda > \lambda_{gen} \end{cases} \quad (2-28)$$

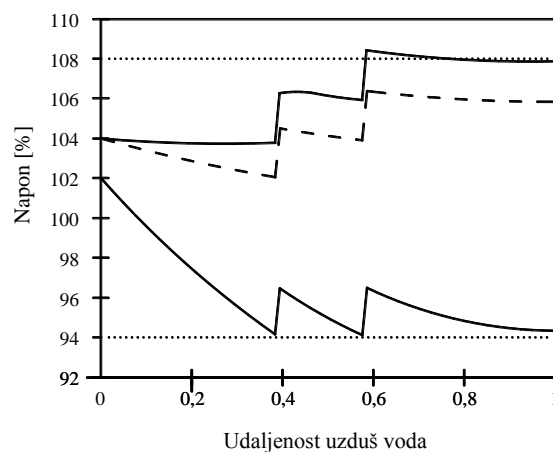
Naponski profil uzduž nadzemnog voda 10 kV, bez instalirane proizvodnje je prikazan na slici 2.14, za maksimalno i minimalno opterećenje.[1] Iz slike vidimo da se najveći i najmanji napon pojavljuju negdje na sredini voda. Neutralna zona transformatora je postavljena na vrijednost od 102-104% nazivnog napona. Kako imamo preveliki pad napona na vodu, korištena su dva povećanja napona.



Slika 2.14. Naponski profil tokom minimalnog i maksimalnog tereta, bez priključene proizvodnje. [1]

Na slici 2.14. gornja krivulja prikazuje napon prilikom malog tereta, a donja krivulja napon uzduž voda za vrijeme vršnog opterećenja. Isprekidane linije prikazuju podnaponski i prenaponski limit (94% i 108%).

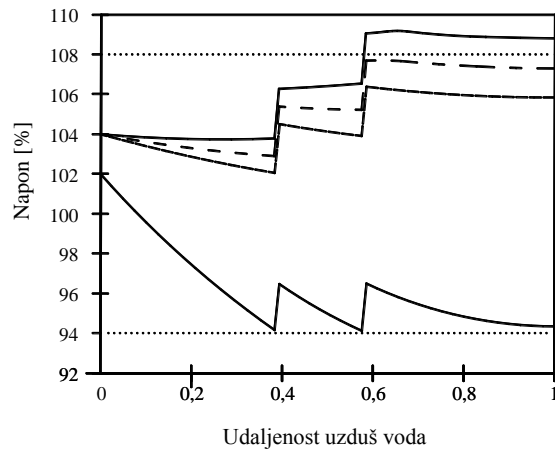
Ako na prethodni slučaj spojimo generator na 45% duljine voda, koji daje neku snagu  $P$  u mrežu, dobijemo rezultate prikazane na slici 2.15



Slika 2.15 Naponski profil nakon dodavanja distribuirane proizvodnje. [1]

Na slici 2.15 vidimo da dodavanje distribuirane proizvodnje pomiče napon prema gore (gornja puna linija) u odnosu na prethodni slučaj bez proizvodnje (isprekidana linija). Iz slike vidimo da je napon na jednome dijelu nadmašio naponski limit. Taj najveći napon se ne pojavljuje na početku voda, niti na kraju, nego na oko 60% duljine voda.

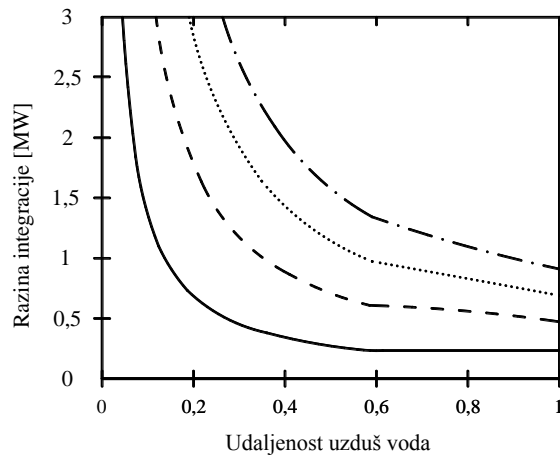
Krivulje na slici 2.16 prikazuju porast napona za slučaj kad je generator spojen na 65% duljine voda.



Slika 2.16. Naponski profil sa dodanom proizvodnjom na 65% udaljenosti voda. [1]

Na slici 2.16. gornja puna krivulja predstavlja porast napona uzrokovan dvostruko većom proizvodnjom nego u prethodnom slučaju. Za manju proizvodnju, maksimalna vrijednost napona dosegnuta je na 60% duljine voda. S druge strane, veća proizvodnja je dosegnula maksimalan napon na 65% voda. Iz ovog vidimo da nije lako odrediti gdje će se pojaviti maksimalan napon u mreži. To će ovisiti o više parametara. Dvije lokacije koje često prouzroče najveći porast napona su na mjestu proizvodnje, te mjesta blizu glavnih sabirnica.

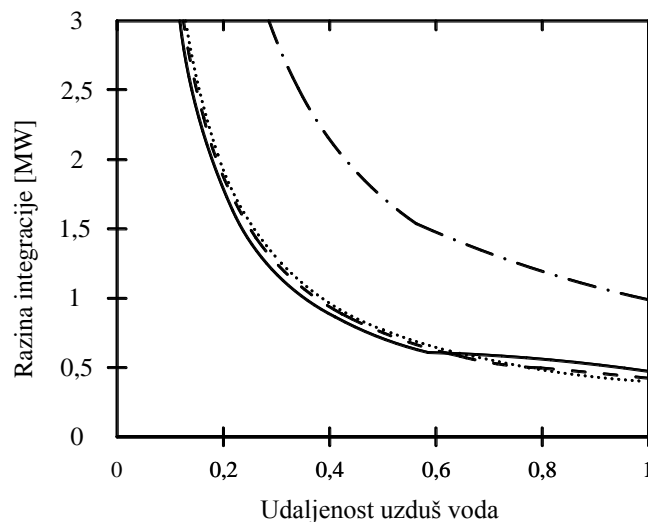
Razina integracije je prikazan na slici 2.17 kao funkcija lokacije generatora prema izrazu (2-2). Rezultat prikazuje razinu integracije za četiri različite vrijednosti prenaponskog limita. Razina integracije opada za generatore udaljenije od početka voda. Smanjenje napona postaje manje za generatore spojene iza mjesta koje ima maksimalan napon prije spajanja generatora. Iz slike 2.17 također je vidljivo da odabir prenaponskog limita ima značajan utjecaj na razinu integracije. Malo povećanje naponskog limita, može imati značajan utjecaj na razinu integracije.



Slika 2.17. Razina integracije za jedan generator sa različitim mjestom priključenja. [1]

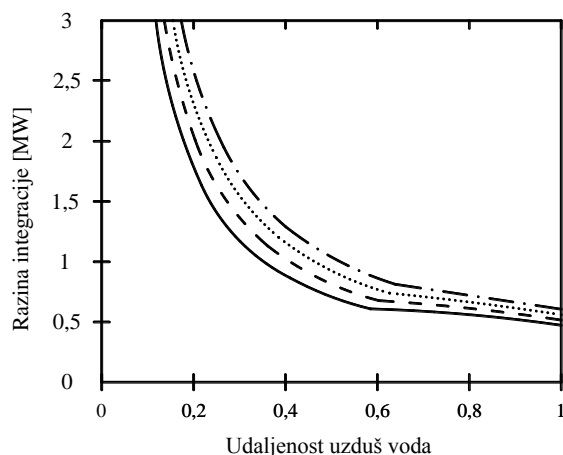
Na slici 2.17. donja puna linija odgovara prenaponskome limitu od 107%, zatim slijede limiti od 108%, 109% te 110%.

Utjecaj duljine voda na razinu integracije prikazan je na slici 2.18. Slika prikazuje vodove duljine 18 km (puna krivulja), 17 km (isprekidana krivulja), 16,5 km (točkasta krivulja) i 16 km (točka crta). Vodovima duljine 18, 17 i 16,5 km krivulje se gotovo poklapaju.



Slika 2.18. Razina integracije za generator spojen na vodove različite duljine. [1]

Za vod od 16 km vidimo dramatično pomicanje krivulje. Razlog je što taj vod više ne zahtijeva povećanje napona od +5%, nego je korišteno samo 2,5%. Ovo smanjenje napona, značajno je povećalo razinu integracije.



Slika 2.19. Razina integracije za jedan generator spojen na vod, kao funkcija položaja preklopke transformatora. [1]

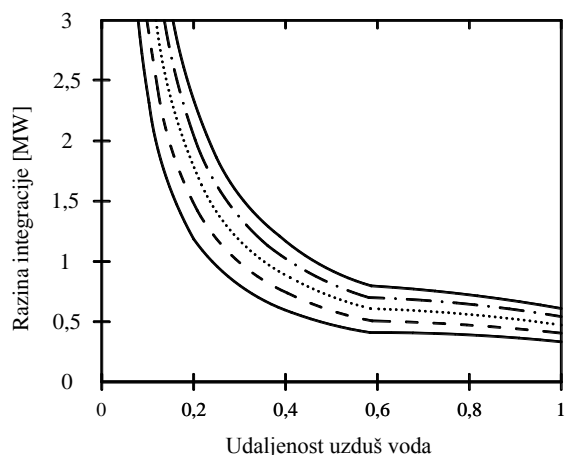
Na slici 2.19. prikazan je neutralna zona transformatora u rasponu od

- 102 - 104%, punom linijom,
- 102,2 - 103,8% isprekidanom linijom,
- 102,4 - 103,6% prikazano je točkama,
- 102,6 - 103,4% prikazano je točka-crta.

Na slici 2.19. vidimo što se događa sa razinom integracije, kad se smanjuje neutralna zona na transformatoru. Što je manja neutralna zona, veća je razina integracije. Razina integracije može se čak i više povećati kad održimo jednaku donju granicu neutralne zone, a mijenjamo gornji limit neutralne zone. Ova metoda direktno povećava prenaponsku marginu, te samim time i razinu integracije. Negativna strana smanjenja neutralne zone je što će promjena tereta zahtijevati česte promjene preklopke transformatora. Česte promjene će zahtijevati i češće održavanje, te veću vjerojatnost da dođe do kvarova transformatora. [1]

U prethodnim poglavljima, razina integracije jako ovisi o procijenjenom padu napona za vrijeme malog tereta. Tada se minimalni pad napona direktno procijenili. U ovome poglavlju, pad napona je izračunat iz procijenjenog minimalnog tereta. Utjecaj ove pretpostavke na razinu integracije je prikazan na slici 2.20.





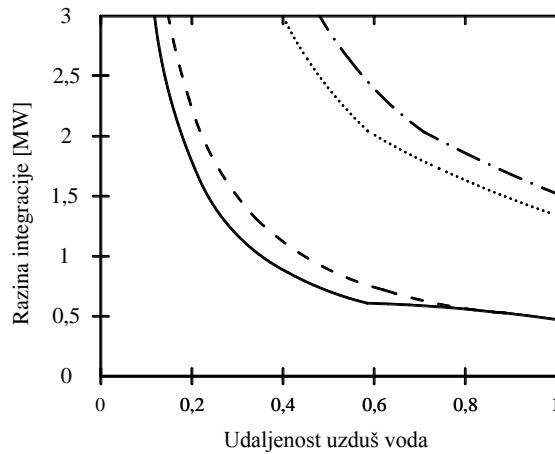
Slika 2.20. Razina integracije jednog generatora spojenog na mrežu o funkciji minimalnog tereta. [1]

Na slici 2.20. je prikazan utjecaj različitih minimalnih tereta, na razinu integracije. Najniža puna krivulja prikazuje kapacitet za vrijeme najmanjeg tereta (20% nazivnog kapaciteta), te se minimalni teret povećava u rasponu od 20-30%. Na slici prikazani su sljedeći minimalni tereti:

- 20% - donja puna krivulja
- 22,5% - isprekidana krivulja
- 25% - točkasta krivulja
- 27,5% - točka crta
- 30% - gornja puna krivulja

Kao što vidimo iz slike, povećanje minimalnog tereta dvostruko je povećalo razinu integracije. Iz ovoga možemo zaključiti da je potrebno imati što točnije procjene minimalnog napona koji se može pojaviti, da ne bismo postavljali previše striktno zahtjeve pred distribuiranu proizvodnju.

Na kraju još razmotrimo utjecaj različitih presjeka vodova, na razinu integracije. Rezultati su prikazani na slici 2.21. Veći presjek voda, daje veću razinu integracije za jednaku prenaponsku marginu. Također vod s većim presjekom smanjuje prenaponsku marginu, zato jer će pad napona za vrijeme velikog i malog opterećenja biti manji.



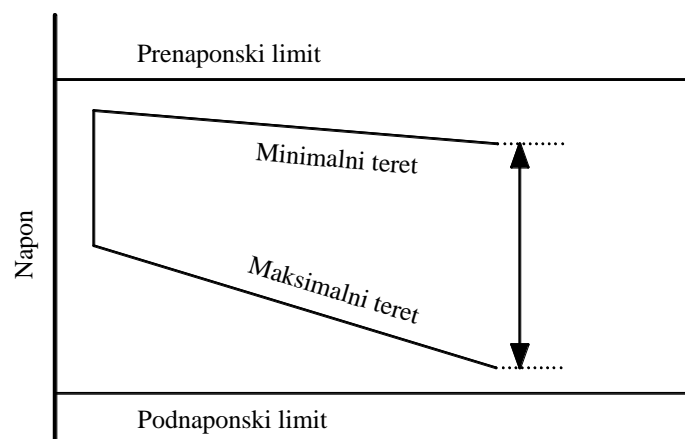
Slika 2.21. Razina integracije prikazan u odnosu o funkciji presjeka voda. [1]

Na slici 2.21 prikazane su sljedeći presjeci vodova:

- 95 mm<sup>2</sup> - Puna krivulja
- 120 mm<sup>2</sup> - Isprekidana krivulja
- 150 mm<sup>2</sup> - Točkasta
- 180 mm<sup>2</sup> - Točka-crta

#### 2.3.4. Niskonaponski izvod

Proračuni naponskog profila niskonaponskog izvoda, slični su proračunu za srednjenaponski vod. Započinje se od naponskog raspona, odnosno maksimalnog i minimalnog napona, na mjestu spajanja generatora. Nakon toga se računaju maksimalni i minimalni padovi napona na vodu. Ovo je ilustrirano na slici 2.22.



Slika 2.22. Naponski profil niskonaponskog voda. [1]

Vertikalna linija s lijeve strane slike 2.22. predstavlja naponski raspon srednjenaponskoj mreži, na primarnoj strani distributivnog transformatora. To je raspon koji smo već prije odredili, na slici 2.14.

Kao i prije maksimalan napon doseže svoju najveću vrijednost za vrijeme malog opterećenja, u kombinaciji sa najvećim naponom na srednjenaponskoj mreži. Minimalni napon je postignut za vrijeme maksimalnog tereta, sa minimalnim naponom u srednjenaponskoj mreži. Da bi mogli odrediti razinu integracije niskonaponskog voda, interesira nas najveći napon. Niskonaponske mreže se značajno razlikuju od srednjenaponskih mreža, jer se na niskonaponske mreže spaja veći broj potrošača. Zbog toga će biti i veća razlika minimalnog i maksimalnog napona u niskonaponskoj mreži. Za proračune u niskonaponskoj mreži možemo pretpostaviti da nema pada napona, za vrijeme kad nemamo nikakvu potrošnju. Maksimalan napon na niskonaponskoj mreži javlja se u vremenu maksimalnog napona u srednjenaponskoj mreži. Kad postoje preciznije podatke, na primjer iz automatskih brojila, potrebno je njih koristiti u proračunima.

Proračun razine integracije provodimo kao prije korištenjem jednadžbe (2-2), te sad imamo:

$$P_{max} = \frac{U_{naz}^2}{R} \cdot \delta_{max} \quad (2-29)$$

gdje je  $U_{naz}$  nazivni napon niskonaponske mreže,  $R$  otpor voda na mjestu spajanja proizvodne jedinice, i  $\delta_{max}$  prenaponska margina, koja je razlika između prenaponskog limita i maksimalnog napona prije spajanja generatora. U proračunima možemo zanemariti otpor distributivnih transformatora, jer u otporu mreže dominiraju otpori nadzemnih vodova i kabela kad se generator spoji dalje od transformatora.

### **2.3.5. Serijska i paralelna kompenzacija**

Veliki nedostatak korištenja transformatora s odcjepima, je što mogu lako stvoriti prevelike napone. To jako smanjuje razinu integracije izvoda, za priključenje distribuirane proizvodnje. Ova metoda jednako diže napon za vrijeme velikog opterećenja, kao što ga podiže i za vrijeme malog opterećenja. Da bi dobili dovoljan porast napona za vrijeme velikog opterećenja, stvaramo rizik od pojave prevelikog napona, kad je mala potrošnja energije. Još jedan nedostatak je što je ova metoda jedino efikasna za vrijeme normalnog rada izvoda. Potrošač spojen na početku voda u normalnom radu, može postati potrošač na kraju voda, ako se isključi njegov primarni transformator, te se vod napaja s suprotne strane. Kako se u ovome slučaju ne koristi povećanje napona, mogao bi se pojaviti jako nizak napon kod potrošača. Metoda povećanja napona koje ovise o potrošnji, ne bi imale ovih problema. Ako se potrošnja smanji, te počne rasti napon,

automatski regulatori smanje napon na transformatoru i održe napon u dozvoljenim granicama. Isto se događa i kad potrošnja raste, a napon padne.

Dvije metode kompenzacije ovdje ćemo detaljnije objasniti: serijska kompenzacija i promjenjiva paralelna kompenzacija.

Serijska kompenzacija predstavlja postavljanje kondenzatorskih baterija u seriju sa vodom. Ovi kondenzatori kompenziraju padove napona, koji nastaju kao posljedica reaktivnog tereta koji se nalazi poslije kondenzatorskih baterija. Ukupni pad napona zbog tereta poslije kondenzatorskih baterija je:

$$\Delta u = RP - (X - X_c)Q \quad (2-30)$$

gdje je  $X_c$  reaktancija serijske kondenzatorske baterije. Lokacija gdje ćemo postaviti kondenzatorske baterije mora biti pomno odabrano. Serijski kondenzator na početku voda, neće samo kompenzirati svu reaktivnu snagu tereta, nego će odmah dići napon poslije mjesta gdje je ugrađen. Kompenzacija pri kraju voda će imati manji utjecaj na napon, jer kompenzira samo ono što se nalazi iza kondenzatora u mreži. Najbolje rezultate na naponske prilike postiže se kad su serijski kondenzatori rasporede uzduž voda. Kad su odabrani serijski kondenzatori tako da u potpunosti kompenziraju serijska reaktanciju na vodu, imamo samo padove napona koji su posljedica djelatne snage. Investicija u serijske kondenzatore se jedino isplati ako imamo u mreži velike padove napona, zbog jalove snage. Drugim riječima, isplati se ovom metodom kompenzirati mreže sa velikom omjerom  $X/R$ . Ako pretpostavimo mrežu sa omjer  $X/R$  jednak 1, te faktor snage tereta jednak 0,9 oko jedne trećine pada napona se može kompenzirati. Kao što je rečeno, maksimalni dozvoljeni pad napona može biti 13% (Sl. 2.14.). Ako kompenziramo jednu trećinu pada napona, ostane nam pad napona od 8,5%.

Postavljanjem potpune kompenzacije na početku voda rezultiralo bi porastom napona od 4,5% za vrijeme maksimalnog tereta. Korištenjem jednake neutralne zone kao prije (102-104%), rezultiralo bi maksimalnim naponom od 108,5% [1]. Maksimalni napon bi se pojavio na početku voda za vrijeme maksimalnog opterećenja. S druge strane, najniža vrijednost napona bi se u ovome slučaju desila na kraju voda, za vrijeme maksimalnog opterećenja. Počevši od najnižeg limita neutralne zone (102%), te povećanjem napona od 4,5% korištenjem serijskog kondenzatora, pad napona od 13% rezultirat će minimalnim naponom od 93,5%. Ovaj napon bi bio nešto niži od najnižeg dopuštenog napona.[1]

Potpuno distribuirana serijska kompenzacija ne bi rezultirala porastom napona, nego bi napon kontinuirano padao za vrijeme maksimalnog, i minimalnog opterećenja. Ukupni pad napona za

vrijeme vršnog opterećenja bio bi 8,5%, te 2% za vrijeme niskog tereta. Da bi ostali unutar dozvoljenih podnaponskih granica, neutralna zona moramo pomaknuti prema gore. Dozvoljavanjem minimalnog napona od 94%, najniža neutralna zona je 102,5-104,5%. Ovo će rezultirati prenaponskom marginom od 3,5% na početku voda, i 5,5% na kraju voda. [1] Čak u najgorem slučaju kad nemamo pad napona za vrijeme minimalnog tereta, (npr. teret je nula) 3,5%-tna prenaponska margina će se pojaviti na kraju voda. Kao što smo vidjeli, pretpostavka za najgori slučaj rezultat će jako malom ili sa čak prenaponskom marginom od 0V, primjenom standardnih metoda povećanja napona.

Paralelnom kompenzacija postiže se konstantno povećanje napona, neovisno o struji opterećenja. Porast napona jednak je:

$$\Delta u_c = X_S \cdot Q_C \quad (2-31)$$

gdje je  $X_S$  reaktivni dio impedancije između preklopke transformatora, te lokacije ugradnje kondenzatora. Svaka promjena napona preko reaktancije izvora na sabirnici sa primarne strane sredjenaponskog transformatora, kompenzirana je promjenom prijenosnog omjer preklopke VN/SN transformatora. Porast napona se linearno smanjuje s udaljenošću prema kondenzatoru, te ostaje konstantan nakon njega. Za paralelnu kompenzaciju, najveći porast napon postiže na kondenzatoru koji je spojen na kraju voda.

Kad se treba postići porast napona veći od 3%, potrebno je izvesti harmonijsku analizu. Kad se očekuje veliki utjecaj petog harmonika, kondenzator bi trebao biti dio harmoničkog filtera, ili u kombinaciji sa prigušnicom koja će smanjiti rezonanciju.

Do pojave viših harmonika dolazi zbog nejednakih zračnih raspورا, i nejednoliko rasporedene uzbuđe, osim toga pretvarači koji se zasnivaju na energetskej elektronicj prilikom svog rada unose više frekvencije u mrežu.

Kao što je rečeno, porast napona nije ovisan o struji. Da bi se zaštitili od prenapona, paralelna prigušnica mora imati mogućnost da se odvoji od mreže kad napon dosegne neku razinu. Moguć način upravljanja bi mogao biti da uključimo kondenzator na mrežu, kad napon padne na 95% nazivne vrijednosti. S druge strane moramo ga isključiti kad napon dosegne 105% nazivne vrijednosti.

### **2.3.6. Tehnički uvjeti priključenja distributivne proizvodnje na mrežu**

Prilikom projektiranja i puštanja u pogon novog energetskog postrojenja moraju se osigurati svi tehnički uvjeti koji se propisuju za pouzdano vođenje dijela mreže gdje se spaja proizvodnja. Prije puštanja postrojenja u pogon moraju se osigurati sljedeći zahtjevi:

- odstupanje frekvencije i napona moraju biti unutar zadanih okvira,
- utjecaj proizvodnje na naponsko izobličenje, pogonsko i zaštitno uzemljenje,
- utjecaj postrojenja na utjecaj kratkog spoja u mreži,
- zaštita od otočnog pogona postrojenja,
- zaštita od pojava smetnji i kvarova u mreži kao posljedica rada distributivne proizvodnje.

Posebna pažnja se posvećuje slučaju kad distribuirana proizvodnja ima utjecaj na snagu trofaznog, odnosno jednofaznog kratkog spoja. U slučaju kad se premaše projektirani parametri elemenata u mreži, mora se primijeniti jedna od sljedećih mjera: [4]

- Ograničenje struje kratkog spoja u elektrani,
- Zamjena sklopnih aparata i/ili druge opreme koja ne ispunjava zahtjeve s obzirom na snage (struje) kratkog spoja,
- Promjena mjesta spajanja na mrežu,
- Promjena parametara priključnog voda.

Male elektrane do 1 MVA nemaju značajan utjecaj na snage kratkog spoja, pa se problemi mogu pojavljivati uglavnom za veće proizvodne jedinice.

Prije puštanja elektrane u pogon provodi se probni rad, gdje se analiziraju svi utjecaji elektrane na mrežu, s ciljem analize pouzdanog rada elektrane na mreži. Tek nakon što se osigura da elektrana radi u svim propisanim zahtjevima i zakonskim okvirima, izdaje se odobrenje za rad elektrane sa mrežom.

## **2.4. Numerički pristup promjenama napona**

### **2.4.1. Primjer dvostupanjskog povećanja napona**

Kao što smo vidjeli u prošleme poglavlju, projektiranje voda provodi se pomoću nekoliko pravila. Prikazano je da glavni limit razini integracije stvara povećanje napona s ciljem sprječavanja pojave podnapona. U ovom poglavlju imat ćemo drugačiji pristup rješavanju problema, s većim osvrtom na podnaponske i prenaponske granice. Opisi neće biti korisni za projektiranje distributivnog voda, ali će dati neke pojedinosti nadnaponskih problema. Ovo će

dati jednostavnu metodu za procjenu razine integracije slučaju nejednako distribuirane proizvodnje.

#### 2.4.2. Opći izrazi za dvostupanjsko povećanje napona.

Proračun za dvostupanjsko povećanje napona, napravljeni su pomoću sljedećih varijabli:

- $u_{nz,min}$  - Donja granica neutralne zone,
- $u_{nz,max}$  - gornja granica neutralne zone,
- $u_{min,limit}$  - podnaponski limit,
- $\Delta u_p$  - Porast napona po pojedinom stupnju,
- Pad napona za vrijeme minimalnog tereta:  $\alpha$  pomnoženo sa padom napona za vrijeme maksimalnog tereta.

Najveći napon odmah na početku prvog stupnja kompenzacije napona:

$$u_{max}(\lambda_1) = u_{nz,max} - \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) + \Delta u_p \quad (2-32)$$

Nakon drugog stupnja povećanja napona, maksimalni napon je jednak:

$$u_{max}(\lambda_2) = u_{nz,max} - \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) + (2 - \alpha)\Delta u_p \quad (2-33)$$

Napon na kraju voda dan je sljedećim izrazom:

$$u_{max}(\lambda_3) = u_{nz,max} - \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) + (2 - 2\alpha)\Delta u_p \quad (2-34)$$

Ovi izrazi prikazuju da vrijednost  $\alpha$  ima snažan utjecaj na maksimalni napon. Svako smanjenje tereta jako utječe na maksimalan napon. Smanjenje minimalnog tereta rezultirat će daljnjim porastom napona, te samim time smanji će se razina integracije. Treba primijetiti da tokom projektiranja moramo razmotriti maksimalan i minimalan pad napona na vodu, koji se može pojaviti u razdoblju od nekoliko godina. Maksimalan teret može se očekivati na kraju tog perioda, dok se pretpostavlja da je najmanji teret u trenutku kad se vod pušta u pogon.

Svaki pokušaj racionalnijeg i energetske efikasnijeg korištenja energije može značajno smanjiti razinu integracije, ako će se utjecati na količinu energije koja se koristi za vrijeme minimalnog tereta. Efikasniji načini trošenja energije, predstavljat će barijeru za spajanje novih obnovljivih izvora energije na mrežu. Postoje i drugi pristupi uštedi energije, osobito treba posvetiti pažnju o vrsti potrošnje koja je visoka za vrijeme vršnog opterećenja. Ako postoji mogućnost da se dio potrošnje prebaci iz perioda vršnog opterećenja u neki drugi period, postiglo bi se da imamo manju razliku između maksimalnog i minimalnog napona.

Odabir neutralne zone isto utječe na prenaponske. Povećanje gornjeg limita, smanjiti će prenaponsku marginu. Povećanje gornjeg limita neutralne zone za jedan volt, smanjiti će prenaponsku marginu za jedan volt. Povećanje nižeg limita će povećati prenaponsku marginu, ali povećanje donjeg limita za 1V samo će povećati prenaponsku marginu za  $\alpha$  puta 1V. Da bismo povećali prenaponsku marginu, neutralna zona mora se pomaknuti prema dolje.

Dozvoljavanjem manjeg podnaponskog limita, rezultirat će većom prenaponskom marginom. Na ovo će utjecati samo faktor  $\alpha$ . Također treba primijetiti da povećanje donjeg limita neutralne zone, i dozvoljavanjem nižeg podnaponskog limita, omogućuje veću duljinu voda. Povećanje duljine voda će također pomaknuti točku gdje trebamo postaviti sustav za povećanje napona.

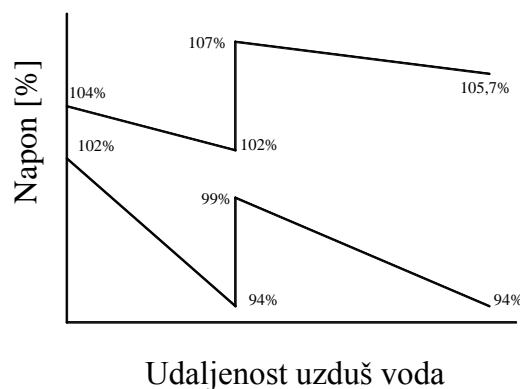
### 2.4.3. Jednostupanjsko povećanje napona

Izradom proračuna za vod sa 5% povećanjem napona sa jednim stupnjem došli smo do rezultata prikazanih na slici 2.23. Veći napon je u ovome slučaju nego u slučaju sa više stupnjeva. Maksimalni porast napona nalazi se u ovome slučaju bliže početka voda.

Korištenjem općeg izraza, maksimalni napon odmah poslije točke povećanja napoja jednak je:

$$u_{max}(\lambda_1) = u_{nz,max} - \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) + 2\Delta u_p \quad (2-35)$$

gdje je povećanje napona dano kao  $2\Delta u_p$ , da nam omogući lakšu usporedbu sa dvostupanjskim povećanjem. Maksimalni napon na kraju voda je jednak kao i u 2-34.



Slika 2.23. Naponski profil uzduž distributivnog izvoda sa jednostupanjskim povećanjem napona. [1]

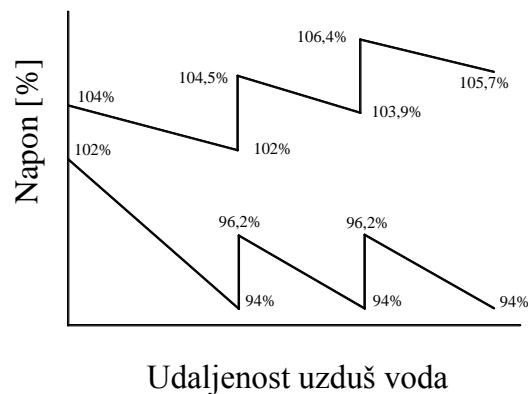
Na slici 2.23. gornja krivulja prikazuje naponski profil uzduž distributivnog voda za vrijeme minimalnog tereta, dok donja krivulja prikazuje za vrijeme maksimalnog tereta.



Iz izraza (2-35) vidimo da je najveći utjecaj na maksimalan napon imamo zbog istih parametara kao i prethodno. Glavni utjecaj stvaraju  $u_{nz,max}$ , te  $\alpha$ .

#### 2.4.4. Mikrogeneracija

Prethodni dio nam je poslužio da bi smo mogli odrediti količinu distribuirane proizvodnje koja se može spojiti na mrežu. Pretpostavili smo da je proizvodnja jednoliko raspoređena uzduž voda, kao što je spojena i potrošnja. Time smo pretpostavili da je profil porast napona zbog distribuirane proizvodnje jednak profilu pada napona mreže zbog potrošnje. Ova pretpostavka očito nije realna, ako se u mreži nalazi nekoliko velikih proizvodnih jedinica. Ta pretpostavka je realna za sustave malih elektrana kao što su solarne elektrane i mikrokogeneracijske elektrane (engl. micro-CHP: *Micro- combined heat and power*), koje proizvode približno energije koliko se i troši.



Slika 2.24. Naponski profil uz dvostruko povećanje napona. [1]

Prvo razmotrimo slučaj dvostupanjskog povećanja napona prikazanog na slici 2.24. Pretpostavljamo da je prenaponski limit 108%. To nam daje 1,6% prenaponsku marginu, odmah nakon sekundarnog povećanja napona. Maksimalna potražnja (radna i jalova) prouzročit će ukupni pad napona na tome mjestu od 10,5%. Maksimalni dopustiv porast napona zbog mikrogeneracije je 1,6%.[1] Porast napona na toj lokaciji voda zbog ukupne proizvodnje  $P_{gen,1}$  jednak je prema sljedećem izrazu:

$$RP_{gen,1} = \frac{1,6}{10,5} \cdot (RP + XQ) \quad (2-36)$$

te iz toga dobijemo:

$$P_{gen,1} = 0,125 \cdot \left( P + \frac{X}{R} Q \right) \quad (2-37)$$

Proizvodnja prema ovome izrazu raspoređena uzduž voda, koja je jednaka potrošnji rezultirati će maksimalnim naponom na sekundarnoj strani od 108% nazivne vrijednosti.

Na kraju voda prenaponska margina je 2,2%. Ukupna potrošnja rezultat će padom napona od 13% na toj lokaciji. Ovo postavlja limit za količinu mikrogeneracije:

$$P_{gen,2} = 0,169 \cdot \left( P + \frac{X}{R} Q \right) \quad (2-38)$$

Usporedbom ove dvije vrijednosti u 2-37 i 2-38 vidimo da prvo povećanje postavlja limit razini integracije. Također vidimo da je količina mikrogeneracije koja se može spojiti barem 15% maksimalne potrebe za radnom snagom. Dodatna proizvodnja može biti spojit kad se razmatra pad napona zbog jalove snage. Kad je jalova snaga 48% aktivne snage (faktor snage je 0,9), te  $X/R$  jednak 0,5 razina integracije srednjenaponskog voda, postane oko 20% maksimalne potrebe.

Proračuni se mogu ponoviti za jednostupanjsko povećanje napona prikazano na slici 2.23. Za točku povećanja napona, prenaponska margina je 1%, kad napon padne za vrijeme maksimalnog tereta za 8%. Ovo postavlja sljedeći limit:

$$P_{gen,1} = 0,125 \cdot \left( P + \frac{X}{R} Q \right) \quad (2-39)$$

Na kraju voda, limit je jednak kao i kod dvostupanjskog povećanja prema (2-38). Razina integracije je ponovno određen točkom povećanja napona, koja je barem 12,5% maksimalne potrebe za djelatnom snagom. Također je prikazano iz tih proračuna da dvostupanjsko povećanje napona daje veću razinu integracije, nego jednostupanjsko povećanje (0,152 nasuprot 0,125). Ovo je razumljivo, jer je cjelokupna veličina manja kad je korišteno više točaka povećanja napona. [1]

Držanje napona za maksimalnu potrošnju na najmanjoj prihvatljivoj vrijednosti od 94% za veći dio voda, povećalo bi rizik od podnapona kod krajnjih potrošača. Također nije ekonomično da se postavi velik broj malih kompenzacijskih uređaja.

Izrazi od (2-32) do (2-35) mogu se preurediti da bi se vidjeli utjecaji različitih parametara na razinu integracije za mikrogeneraciju. Za dvostupanjsko povećanje napona, prenaponska margina poslije drugog povećanja je:

$$\delta_{max} = u_{max,limit} - u_{nz,max} + \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) - (2 - \alpha)\Delta u_p \quad (2-39)$$

Pad napona na mjestu najveće potrošnje jednak je:

$$\Delta u = u_{db,min} - u_{min,limit} + \Delta u_p \quad (2-40)$$

Količina proizvodnje koja će napon iznad preko naponske granice na tome mjestu je sljedeća:

$$P_{gen,1} = \frac{u_{max,limit} - u_{nz,max} + \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) - (2-\alpha)\Delta u_p}{u_{nz,min} - u_{min,limit} + \Delta u_p} \times \left( P + \frac{X}{R} Q \right) \quad (2-41)$$

Na isti način možemo naći izraz za količinu proizvodnje koja će podići napon na kraju voda do prenaponske granice:

$$P_{gen,2} = \frac{u_{max,limit} - u_{nz,max} + \alpha(u_{nz,min} - u_{min,limit}) - (2-2\alpha)\Delta u_p}{u_{nz,min} - u_{min,limit} + \Delta u_p} \times \left( P + \frac{X}{R} Q \right) \quad (2-42)$$

Razina integracije voda za mikrogeneraciju je manja za ove dvije vrijednosti  $P_{gen,1}$  i  $P_{gen,2}$ .

Iz ove dvije jednadžbe vidimo da na razinu integracije najveći utjecaj imaju prenaponski limit  $u_{max,limit}$ , gornji limit neutralne zone  $u_{db,max}$ , te omjer pada napona za mali i veliki teret  $\alpha$ . Korištenjem nerealnog prenaponskog limita i omjera pada napona može stvoriti nepotreban limit na distribuiranu proizvodnju. [1]

### **3. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE RAZINE INTEGRACIJE MREŽE**

U ovome poglavlju analizirat ćemo jednu mrežu, topološki sličnu stvarnoj mreži. Ona se sastoji od bioplinske elektrane Orlovnjak, dijela mreže Tenja, te krute mreže preko trafostanice *110/35kV Osijek 1*.

Zadatak je odrediti kolika je najveća razina integracije za proizvodnju koji se može spojiti na mrežu, gledano sa lokacije elektrane Orlovnjak. Analiza će se vršiti za različite napone postavljene na transformatoru 110/35 kV. Na temelju postavljenih napona, odrediti će se najbolji položaj na visokonaponskoj strani transformatora 110/35 kV, s ciljem smanjenja gubitaka u mreži te rada mreže u dozvoljenim naponskim granicama.

Osim toga analizirat će se i utjecaj puštanja u pogon nove trafostanice *Orlovnjak 35/10 kV*, te njezin utjecaj na razinu integracije. Ako simulacijama dobijemo da je moguće povećati proizvodnju u elektrani, analizirati će se utjecaj proširenja proizvodnje za dodatnih 50%. Na kraju rada analizirati će se utjecaj spajanja fotonaponskog sustava na niskonaponsku mrežu. Cilj je vidjeti da li elektrana Orlovnjak utječe na rad fotonaponskih sustava i obrnuto.

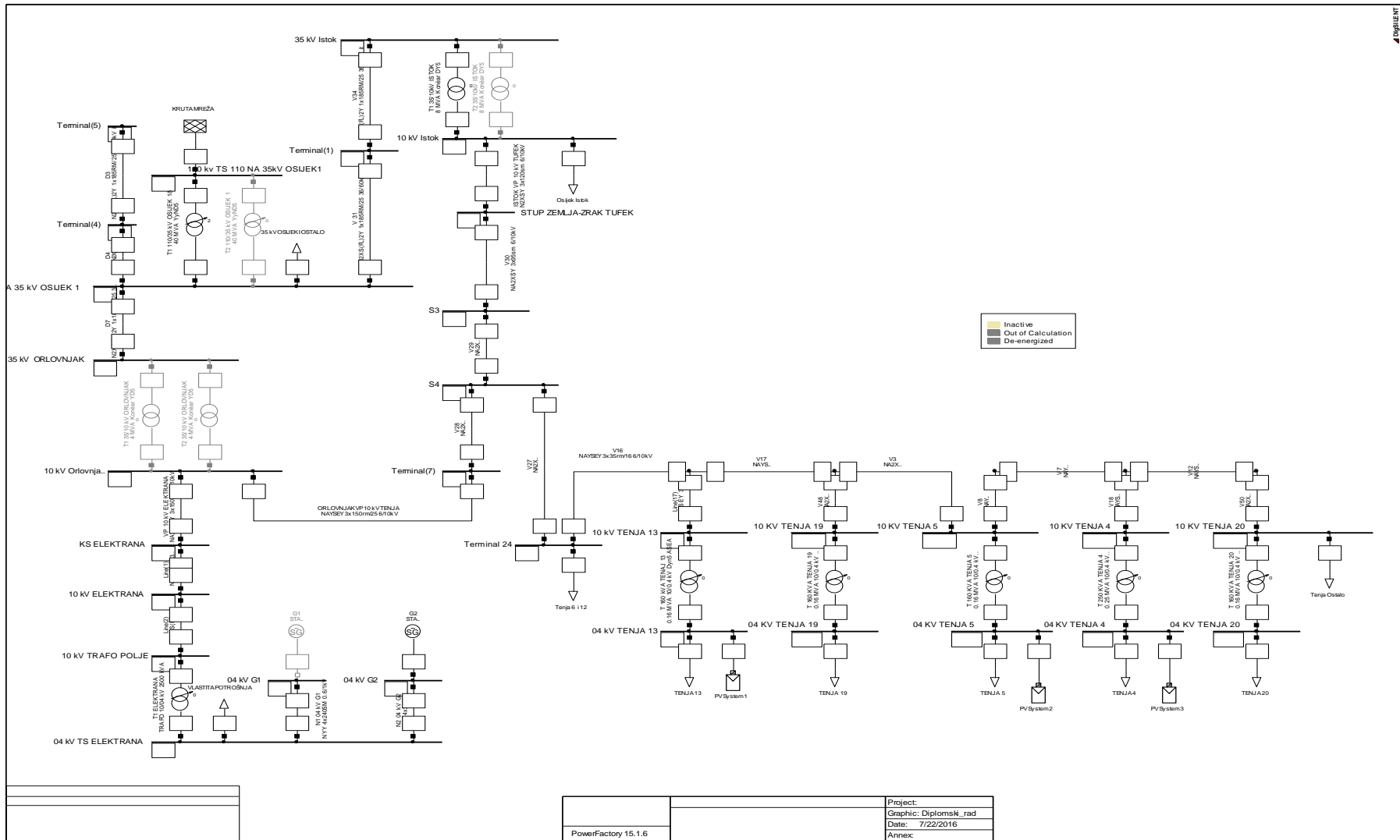
#### **3.1. Opis mreže u okolini elektrane Orlovnjak**

Mreža koju ćemo razmatrati u ovome poglavlju je pojednostavljena mreža okolice grada Osijeka. Točnije, razmatrat ćemo skraćenu mrežu Tenja, te bioplinsku elektranu Orlovnjak.

Mreža je prikazana na slici 3.1.

Veza električne mreže sa krutom mrežom postignuta je preko trafostanice *110/35 kV Osijek 1*. Iz te trafostanice izlaze tri izvoda. Jedan je prema Laslovu, ali njega nećemo analizirati zbog malih tokova snage na njemu. Drugi izvod je prema trafostanici *35 kV Istok*. Iz te trafostanice će se napajati mreža Tenja.

Treći izvod od trafostanice 110/35 kV je prema 35 kV trafostanici Orlovnjak. Ova trafostanica još nije izgrađena, ali je planirana njena izgradnja.



Slika 3.1. Razmatrana mreža u okolini elektrane Orlovnjak

Niskonaponska mreža se sastoji od nekoliko izvoda u Tenju. Niskonaponski izvodi su sljedeći:

- Tenja 4
- Tenja 5
- Tenja 20
- Tenja 13
- Tenja 19

Izvodi Tenja 2, 3, 10, 11, 22 nadomješteni su teretom *Tenja ostalo*, te Tenja 6 i 12 sa teretom *Tenja 6 i 12*. Osim toga, imamo dio mreže Osijek Istok, nadomješten sa srednjenaponskim teretom.

### **3.1.1. Popis transformatora i vodova**

Mreža se sastoji od nekoliko transformatora, vodova i dva generatora.

Vodovi su odabrani iz baze podataka *DigSILENT*-a. Dio transformatora je parametriran prema končarevom katalogu [11], a dio direktno odabran iz baze podataka programa.

Snaga generatora elektrane Orlovnjak je 1,7 MW, te se u njoj nalazi vlastita potrošnja od 100 kW. Budući da joj je snaga manja od 30 MW, ne mora sudjelovati u regulaciji jalove snage, te će ona raditi sa jediničnim faktorom snage.

Popis transformatora i njihovi parametri prikazani su u prilogu u tablici P3.1. Vodovi te njihovi parametri prikazani su u prilogu u tablici P3.2. Oni su direktno odabrani iz baze podataka programa, jer nismo imali točne podatke o njima.

### **3.1.2. Tereti pojedinih izvoda**

Budući da studentska verzija programa ima ograničen broj sabirnica, dio srednjenaponske i niskonaponske mreže nadomješten je sa tri grupna tereta. Samo je dio mreže Tenja nadomješten sa niskonaponskim izvodima. U analizi naponskih prilika analizirat će se slučaj minimalnog i vršnog opterećenja.

Na kraju rada analizirati će se utjecaj proizvodnje iz fotonaponskih sustava spojenih na izvode Tenja 13, 5 i 4. Razmatrat će se njihov utjecaj za četiri različite količine proizvodnje, te njihov utjecaj na naponske prilike.

Podatci o opterećenjima po pojedinim sabirnicama za vrijeme minimalnog i vršnog opterećenja prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Minimalna i maksimalna snaga opterećenja po sabirnicama

Sabirnica	$P_{min}$	$P_{max}$	$\cos(\varphi)$
	[kW]	[kW]	
Tenja 13	17	68	0,95
Tenja 19	27	108	0,95
Tenja 5	27	108	0,95
Tenja 4	42	168	0,95
Tenja 20	27	108	0,95
Tenja Ostalo	150	600	0,95
Tenja 6 i 12	93	372	0,95
Osijek Istok	340	1500	0,95

### 3.1.3. Podatci o korištenom programu za izradu simulacija

Za izradu simulacija u ovome radu korišten je programski paket DigSilent PowerFactory.

Program je u vlasništvu Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija.

Mreža je izrađena prema dostupnim i nepotpunim podacima, te je dio podataka odabran na temelju pretpostavljenih parametara. Mreža je izrađena u suradnji sa Keškić Andrejom, te će biti korištena naknadno u drugim radovima, ovisno o potrebama fakulteta.

### 3.2. Analiza utjecaja distribuirane proizvodnje na mrežu

Cilj ovog dijela je analizirati razinu integracije nove proizvodnje prikazane mreže. U radu će se uzeti u obzir sva strujna ograničenja za vodove i transformatore, kao i naponski limiti prema trenutnim propisima.

Za početak će se razmotriti osnovni slučaj, bez elektrane Orlovnjak i trafostanice 35/10 kV Orlovnjak. Nakon što se dobije osnovni slučaj, vidjet ćemo kako puštanje elektrana u pogon utječe na naponske prilike u niskonaponskoj mreži. Analizirat ćemo i utjecaj napona na mjestu spajanja na krutu mreže, odnosno utjecaj položaja preklopke transformatora 110/35 kV. Budući da nemamo podatke o transformatoru, uzeto je da se može regulirati napon na njemu u granicama  $\pm 5\%$ , u koracima od 2,5% na visokonaponskoj strani transformatora.

Nakon što odredimo da li mreža može zadovoljiti sve naponske zahtjeve prije i nakon puštanja elektrane u pogon, analizirat će se kolika se proizvodnja može spojiti na mrežu na lokaciji elektrane Orlovnjak. Osim toga vidjet će se kako utječe puštanje u pogon nove trafostanice 35/10kV na razinu integracije nove proizvodnje, te općenito dali postoji potreba za tom trafostanicom.

Na kraju rada će se analizirati utjecaj pojave fotonaponskih sustava u mreži, te njihov utjecaj na naponske prilike.

### 3.2.1. Analiza mreže bez elektrane

Za početak odrediti će se situaciju u mreži prije spajanja elektrane na nju. Osim toga, analizirani slučaj je bez trafostanice Orlovnjak, budući da ona nije u pogonu prije puštanja elektrane u pogon na mrežu.

Simulacijom smo dobili da je za vrijeme minimalnog tereta najniži napon na sabirnici *Tenja 20*, te on iznosi 0,94 p.u.. Možemo pretpostaviti da je napon na transformatoru 110/35 kV ili na transformatoru *T 160 kVA TENJA 20* povećan preklopkom.

Nadalje će biti određeno koji položaj preklopke ima najbolji utjecaj na naponske prilike u mreži.

Zbog niskih napona u mreži i smanjenja ukupnih gubitaka pretpostavljamo da je napon na 110/35 kV transformatoru povećan. Da bi dobili koliko je najmanje potrebno povećati napon, moramo analizirati napone za vrijeme minimalnog opterećenja. Kako je rečeno u prethodnome poglavlju, za vrijeme minimalnog opterećenja imamo najveće napone u mreži, te oni određuju koliko možemo povećati napon.

Simulacijom je utvrđeno da je moguće povećanje napona za vrijeme minimalnog tereta na vrijednost od +5%.

Rezultati simulacije prikazani su u sljedećoj tablici. Prikazani su samo rezultati mjerenja za sabirnice *Tenja 13* i *Tenja 20*, jer su to sabirnice na početku, odnosno na kraju izvoda. To su ujedno i sabirnice na kojima se javljaju maksimalni, odnosno minimalni naponi. Naponi na ostalima sabirnicama su unutar ovih dobivenih raspona.

Tablica 2. Naponi na sabirnicama prije spajanja elektrane

Položaj preklopke transformatora	Opterećenje u mreži			
	Minimalno		Maksimalno	
	Tenja 13 [p.u.]	Tenja 20 [p.u.]	Tenja 13 [p.u.]	Tenja 20 [p.u.]
5	1,01	1	0,98	0,96
2,5	0,98	0,97	0,96	0,93
0	0,96	0,94	0,92	0,91
-2,5	0,93	0,92	0,9	0,88
-5	0,9	0,89	0,87	0,85



Za vrijeme minimalnog tereta, bez povećanja napona na transformatoru napon na nisko naponskoj mreži je između 0,94 do 0,96 p.u.. Naponi su u dozvoljenim granicama, sve do kad ih ne smanjimo na transformatoru za -2,5% nazivne vrijednosti na visokonaponskoj strani. Tada se mogu pojaviti problemi sa preniskim naponima u mreži.

Možemo pretpostaviti da je napon još povećan i na transformatorima 10/0,4 kV, jer iz tablice 2 vidimo da imamo prostora za povećanje. Ova kompenzacija nije razmatrana u ovome radu.

Za vrijeme vršnog opterećenja u mreži naponi se ne smiju spustiti ispod nazivne vrijednosti (35 kV), jer se tada pojavljuju preniski naponi.

Usporedbom tablica 1 i 2 vidimo da je elektrana podigla napon na sabirnici Tenja 13 u rasponu od 0,02 p.u. do 0,05 p.u., te na sabirnici Tenja 20 od 0,03 p.u. do 0,04 p.u.

### 3.2.2. Analiza mreže sa elektranom

Nakon što smo analizirali bazni slučaj bez elektrane, analizirat će se utjecaj priključenja elektrane na mrežu.

Simulacijom smo dobili da elektrana sa dva generatora, koja u mrežu utiskuje ukupno 1,778 MW ima pozitivan utjecaj za vrijeme vršnog opterećenja. Ona održava napon u niskonaponskoj mreži za vrijeme minimalnog opterećenja u granicama od 1,03 do 1,04 p.u., te od 1 p.u. do 1,02 p.u.-a za vrijeme vršnog opterećenja. Rezultati analize su prikazani u tablici broj 3.

Tablica 3. Naponi za vrijeme minimalnog i vršnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Opterećenje u mreži			
	Minimalno		Vršno	
	Tenja 13 [p.u.]	Tenja 20 [p.u.]	Tenja 13 [p.u.]	Tenja 20 [p.u.]
5	1,03	1,04	1,02	1
2,5	1	1,02	0,99	0,97
0	0,98	0,99	0,96	0,94
-2,5	0,95	0,97	0,93	0,92
-5	0,93	0,94	0,91	0,89

Kako vidimo iz tablice 3. mreža radi u propisanim granicama za vrijeme vršnog opterećenja sve do kad je napon na sredjenaponskoj strani 110/35 kV transformatora veći ili jednak nazivnoj vrijednosti. Smanjenjem napona, napon na početku niskonaponskih izvoda približava se podnaponskome limitu. Prilikom smanjenja napona na transformatoru, napon na početku

niskonaponskog izvoda je blizu podnaponskog limita. Uzduž niskonaponskog izvoda, javit će se daljnji padovi napona, te se mogu pojaviti preniski napon na dijelu niskonaponske mreže. Ali kako je već pretpostavljeno, napon na transformatoru 110/35 kV, gdje se razmatrana mreža spaja na krutu mreža je postavljena na +5% odnosno 1,05 p.u.-a pa će pouzdano raditi za vrijeme vršnog te minimalnog opterećenja.

### 3.3. Eksperimentalno određivanje razine integracije

Za izradu dugoročnih planova proširenja proizvodnje, analizirat ćemo kolika je maksimalna razina integracije nove proizvodnje. Također će se analizirati kako utječe puštanje u pogon nove trafostanice Orlovnjak 35/10 kV.

Eksperiment će se provoditi tako da se dodaje paralelno jednak generatore u elektrani Orlovnjak, sve do kad ne dosegemo naponske limite na niskonaponskim sabirnicama Tenja.

Analizirat ćemo slučaj vršnog i minimalnog tereta, samo da bi se vidjelo kolika je razlika u količini integracije ovisno o potrošnji. Razinu integracije definira se kako je rečeno za vrijeme minimalnog tereta, jer tada imamo visoke napone.

Rezultati za slučaj bez trafostanice Orlovnjak prikazani su u tablici 4.

Prilikom izrade simulacije pojavili su se problemi sa strujnim preopterećenjem vodova. Budući da nisu premašena druga ograničenja, napravljena je i simulacija sa dodavanjem paralelnih vodova. Broj paralelnih vodova smo povećavali do kad nismo prekoračili neki od ostalih limita mreže. Nakon dodavanja paralelnih vodova, limite su postavljali transformatori, te njihove snage koje mogu prenijeti. Broj paralelnih vodova smo povećavali sve do kad nismo preopteretili barem jedan transformator. Iz tablice 4. vidimo da dodavanje paralelnih vodova, te smanjenje napona u mreži, može značajno povećati razinu integracije. Dodavanje četiri paralelnih vodova, povećalo je razinu integracije za 25%.

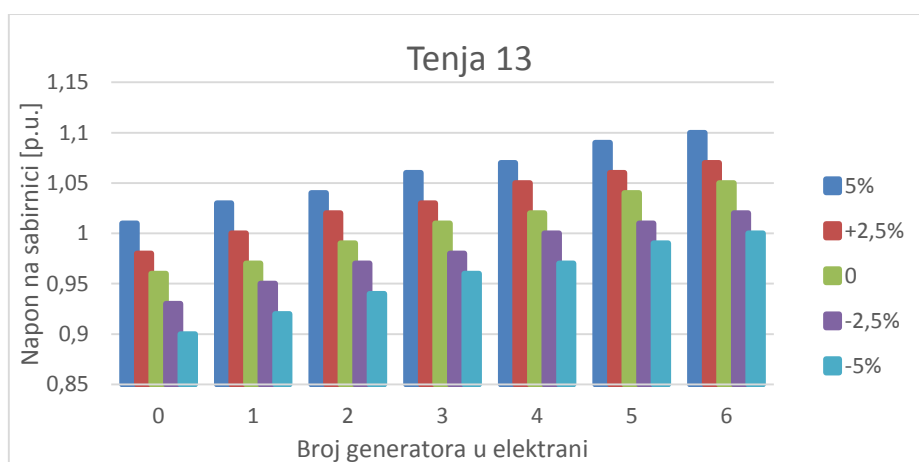
Tablica 4. Razina integracije u slučaju minimalnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Bez paralelnih vodova		Sa paralelnim vodovima		
	Maksimalno generatora	Kapacitet [MW]	Broj paralelnih vodova	Maksimalno generatora	Kapacitet [MW]
5	5	4,445	2	6	5,334
2,5	5	4,445	2	9	8,001
0	5	4,445	2	10	8,89
-2,5	5	4,445	4	20	17,78
-5	5	4,445	5	19	16,891

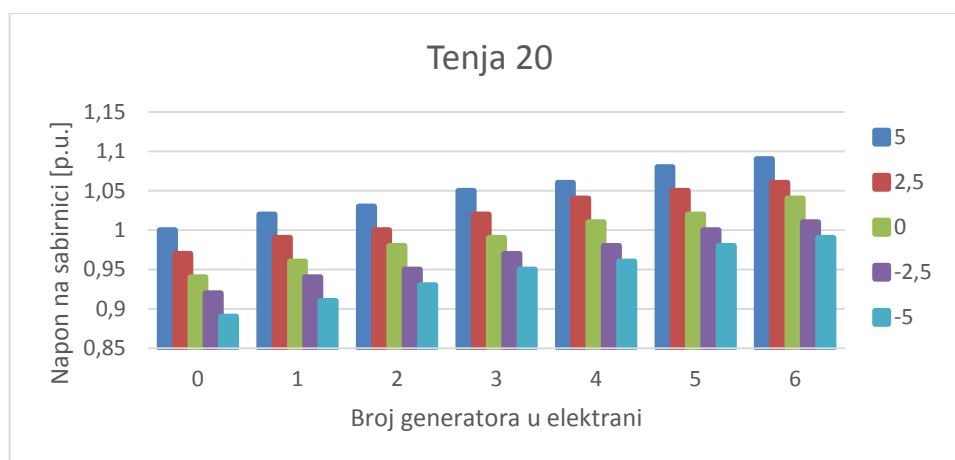
Bez paralelnih vodova ograničeni smo sa maksimalno 4,4 MW, zbog preopterećenja koja se javljaju na vodovima. Mreža je projektirana da napaja niskonaponske potrošače, te su pretpostavljeni tokovi snage sa 35 kV prema 10 kV. Elektrana je već sa dva generatora promijenila smjer tokova snage, za vrijeme minimalnog opterećenja. Oni se nakon zadovoljavanja potreba Tenja, i dalje kreću sa 10 kV mreže prema 35 kV.

Prilikom spajanja veće proizvodnje, preopterete se vodovi *ORLOVNJAK VP 10 kV TENJA - V28 - V29 - V30 - ISTOK VP 10 kV TUFEK*.

Na slici 3.1. i 3.2. prikazano je kako broj paralelnih generatora utječe na napone ovisno o podešenome naponu na srednjenaponskoj strani 110/35 kV transformatora.



Slika 3.1. Napon na sabirnici Tenje 13 ovisno o broju generatora i naponu na transformatoru



Slika 3.2. Napon na sabirnici Tenje 20 ovisno o broju generatora i naponu na transformatoru

Kao što vidimo u tablici 4, najveća razina integracije je prilikom smanjenja napona na transformatoru za 2,5%, te izgradnjom 4 paralelnih vodova. U ovome slučaju nisu bili svi vodovi preopterećeni, nego samo vodovi V28 i V29. Zbog toga nije bilo potrebno na svima izvodima povećati s 4 na 5 paralelnih vodova, nego na samo tim preopterećenim vodovima. Tada možemo spojiti 20 generatora u elektrani Orlovnjak. To nam daje maksimalna snaga elektrane, koja bi u tome slučaju iznosila 17,78 MW.

Smanjenjem napona nismo uspjeli dalje povećati razinu integracije, nego se razina čak i smanjila, jer su vodovi i transformatori postali preopterećeni. Zbog toga je najveća moguća količina proizvodnje u slučaju 4 paralelna voda, osim vodova V28 i V29 gdje je 5 paralelnih voda.

Prilikom određivanja razine integracije limite nisu postavljale naponske granice, nego snage pojedinih transformatora. Jedini naponski limit koji se javlja je odmah na pragu elektrane. Kako je tamo spojena i potrošnja, napon mora biti u propisanim granicama. Ovo ograničenje koje nam postavlja elektrana na svojim sabirnicama mogao bi se riješiti postavljanjem regulacijskog transformatora. Ova mogućnost bi se morala uzeti u obzir prilikom značajnijeg proširenja elektrane, ili u cilju popravljivanja naponskih prilika u mreži.

Bez detaljne tehno-ekonomske analize nije moguće reći opravdanost postavljanja tolikog broja paralelnih vodova, odnosno ugradnje novog regulacijskog transformatora. S druge strane, zbog vrste elektrane možemo pretpostaviti da se na lokaciji elektrane neće izgraditi toliko velika proizvodnja, te se neće zahtijevati radovi na postojećoj mreži, osim eventualnih prilagođavanja napona na transformatorima.

Kako se razina integracije određuje za vrijeme minimalnog opterećenja u mreži, analizirat ćemo kako prethodno određena razina integracije utječe na mrežu za vrijeme vršnog opterećenje. Osim toga odrediti ćemo koliko bi bila maksimalna razina integracije za vrijeme vršnog opterećenja. Razmatrat će se samo slučaj rada mreže sa slučajem izgrađene trafostanice Orlovnjak 35/10 kV. Slučaj sa dodavanjem paralelnih vodova, neće se razmatrati.

Rezultati provedenih simulacija prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Razina integracije za vrijeme minimalnog i maksimalnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Za vrijeme minimalnog opterećenja		Za vrijeme vršnog opterećenja	
	Maksimalan broj generatora	Kapacitet [MW]	Maksimalan broj generatora	Potencijalni kapacitet [MW]
5	10	8,89	12	10,668
2,5	11	9,779	12	10,668
0	11	9,779	13	11,557
-2,5	11	9,779	13	11,557
-5	12	10,668	13	11,557

Iz tablice 5. vidimo da se razina integracije povećava kako smanjujemo napon u mreži. Ovo je objašnjeno u teorijskome dijelu, te smo to ovdje potvrdili. S druge strane ovo može prouzročiti probleme u slučaju ispada elektrane, jer se tada mogu javiti preniski naponi.

Kako vidimo iz tablice 6., za vrijeme vršnog opterećenja neće se javiti naponski problemi, iako se u nekim slučajevima naponi spuste gotovo do podnaponskog limita. Najnepovoljniji slučaj je prilikom smanjenja napona za 5%, uz proizvodnju od 8,89 MW kad imamo napon na 0,9 p.u.

Tablica 6. Minimalni i maksimalni naponi za vrijeme minimalnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Naponi NN mreže za vrijeme minimalnog opterećenja	
	Minimalan napon [p.u.]	Maksimalan napon [p.u.]
5	1,01	1,02
2,5	0,98	0,99
0	0,95	0,97
-2,5	0,92	0,94
-5	0,9	0,92

### 3.3.1. Utjecaj izgradnje nove trafostanice

Sad će se analizirati utjecaj nove trafostanice, koja će povezati elektranu Orlovnjak sa 35 kV mrežom. Ova trafostanica je trenutno u planovima izgradnje, te ćemo analizirati opravdanost njene izgradnje s obzirom na naponske prilike, te njezin utjecaj na razinu integracije. Ova trafostanica će rasteretiti dio vodova, kojima se elektrana trenutno spaja na krutu mrežu. Osim toga stvorit će se novi prsten, koji će povećati pouzdanost rada mreže.

Prilikom simulacija nisu korišteni paralelni vodovi, nego je mreža na bazi početnog slučaja.

Razina integracije u slučaju minimalnog opterećenja u mreži je prikazana u tablici 7.

Tablica 7. Razina integracije za vrijeme minimalnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Broj paralelnih generatora	Instalirana snaga [MW]
5	10	8,89
2,5	11	9,779
0	11	9,779
-2,5	12	10,668
-5	12	10,668

Iz tablice vidimo da nam smanjenje napona na sekundaru 110/35 kV transformatora za 2,5% i 5% poveća razinu integracije za 9% odnosno za 0,889 MW. Povećanje napona na transformatoru smanjilo je razinu integracije za 9%.

Da bi vidjeli kako povećanje proizvodnje utječe na napone u niskonaponskoj mreži, napravljene su simulacije u kojima je prikazana ovisnost broja generatora o naponu u niskonaponskoj mreži.



Slika 3.3. Utjecaj broja generatora na napon u niskonaponskom izvodu Tenja 13



Slika 3.4. Utjecaj broja generatora na napon u niskonaponskom izvodu Tenja 20

Slika 3.3. i 3.4. prikazuju kako povećanje proizvodnje utječe na napone na niskonaponskoj mreži. Kako se vidi iz tih slika povećanje proizvodnje u elektrani neće imati utjecaj na naponske prilike u niskonaponskoj mreži. Čak i kad se spoji značajno veću proizvodnja, napon na niskonaponskoj mreži ostane nepromijenjen. Ovo se dešava jer je kruta mreža značajno jača od lokalne mreže, te ona održava napone. Rezultati mjerenja su prikazani u prilogu u tablici P3.3.

U tablice 8. razinu integracije ograničavaju transformatori u trafostanicama. Pogotovo nam ograničenje stvara trafostanica Orlovnjak, koju smo doveli do njezinih prijenosnih limita. Ona nam zbog toga direktno smanjuju potencijalnu razinu integracije.

Pogledajmo slučaj u vremenu vršnog opterećenja. Rezultati simulacije prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Razina integracije za vrijeme maksimalnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Maksimalno generatora	Kapacitet [MW]	Naponi bez generatora
5	12	10,67	dozvoljeni
2,5	12	10,67	dozvoljeni
0	12	10,67	dozvoljeni
-2,5	13	11,56	dozvoljeni
-5	13	11,56	na podnaponskoj granici

Za vrijeme vršnog opterećenja u mreži naponi nisu pali ispod dozvoljenih granica, ali su se približili podnaponskome limitu prilikom smanjenja napona na 110/35 kV transformatoru za 5%.

Kako za vrijeme vršnog opterećenja imamo niske napone u mreži, analizirao se i slučaj ispada elektrane. Na temelju dobivenih rezultata, ispad elektrane neće negativno utjecati na rad mreže. Ispadom elektrane, naponi u mreži se smanje, ali ostanu u dozvoljenim granicama.

Usporedbom tablica 7 i 8, dobilo se da je prilikom smanjenja napona, s ciljem povećanja razine integracije moguće smanjiti napon za 2,5% jer to neće smanjiti razinu integracije, ali će nam osigurati da imamo napone u prihvatljivim granicama.

Simulacijama vidimo da postoji opravdani razlozi za izgradnjom trafostanice. Ona će povećati razinu integracije nove proizvodnje, rasteretit će dio vodova, te će isto tako povećati razinu pouzdanosti rada mreže.

### 3.3.2. Proširenje elektrane Orlovnjak

Nakon što smo procijenili kolika je najveća proizvodnja koja se može priključiti na mrežu, analizirat ćemo jedan tehnički realniji slučaj. Pretpostaviti će se da se gradi još jedno bioplinsko postrojenje. Novo postrojenje imati će sve karakteristike jednake kao i postojeće. Lokacija postrojenja je u neposrednoj blizini postojeće elektrane, te ćemo uzeti iste podatke za parametre generatora, transformatora i vodova.

Mjesto priključenja nove elektrane na mrežu je preko sabirnice 35 kV Orlovnjak, te dijelom preko trafostanice Orlovnjak 10/35 kV, te 10 kV vodovima prema Tenji i trafostanici Osijek Istok.

Mreža koju ćemo razmatrati je u prilogu na slici P3.1. Prilikom izrade simulacije, fotonaponski sustav prikazan na slici, nije bio spojen na mrežu za vrijeme simulacija.

Prilikom izvođenja simulacija, odrediti će se koliko će nova elektrana utjecati na naponske prilike u niskonaponskoj mreži. Ovdje će se analizirati i da li cijela infrastruktura mreže može pouzdano raditi za vrijeme minimalnog i vršnog opterećenja, te u slučaju ispada cijele proizvodnje u elektrani.

Za vrijeme minimalnog opterećenje dobili smo sljedeće rezultate, prikazane u tablici 9.

Za vrijeme minimalnog opterećenja u mreži imamo sve napone u dozvoljenim granicama. Zbog smanjenja gubitaka možemo pretpostaviti da je napon postavljen na +5%, te tada imamo napone u dozvoljenim granicama. Spajanje elektrane diglo je napone na niskonaponskoj mreži za 0,01 do 0,02 p.u.-a.

Tablica 9. Naponi prije i nakon dodavanja generatora za minimalno opterećenje

Položaj preklopke transformatora	Napon na sabirnicama [p.u.]			
	Bez generatora		Sa generatorom	
	Tenja 13	Tenja 20	Tenja 13	Tenja 20
5	1,04	1,04	1,05	1,05
2,5	1,01	1,01	1,02	1,02
0	0,98	0,99	0,99	1
-2,5	0,95	0,96	0,97	0,97
-5	0,93	0,94	0,95	0,95



Izradom simulacije dobili smo da su naponi na niskonaponskoj mreži za vrijeme vršnog opterećenja sljedeći:

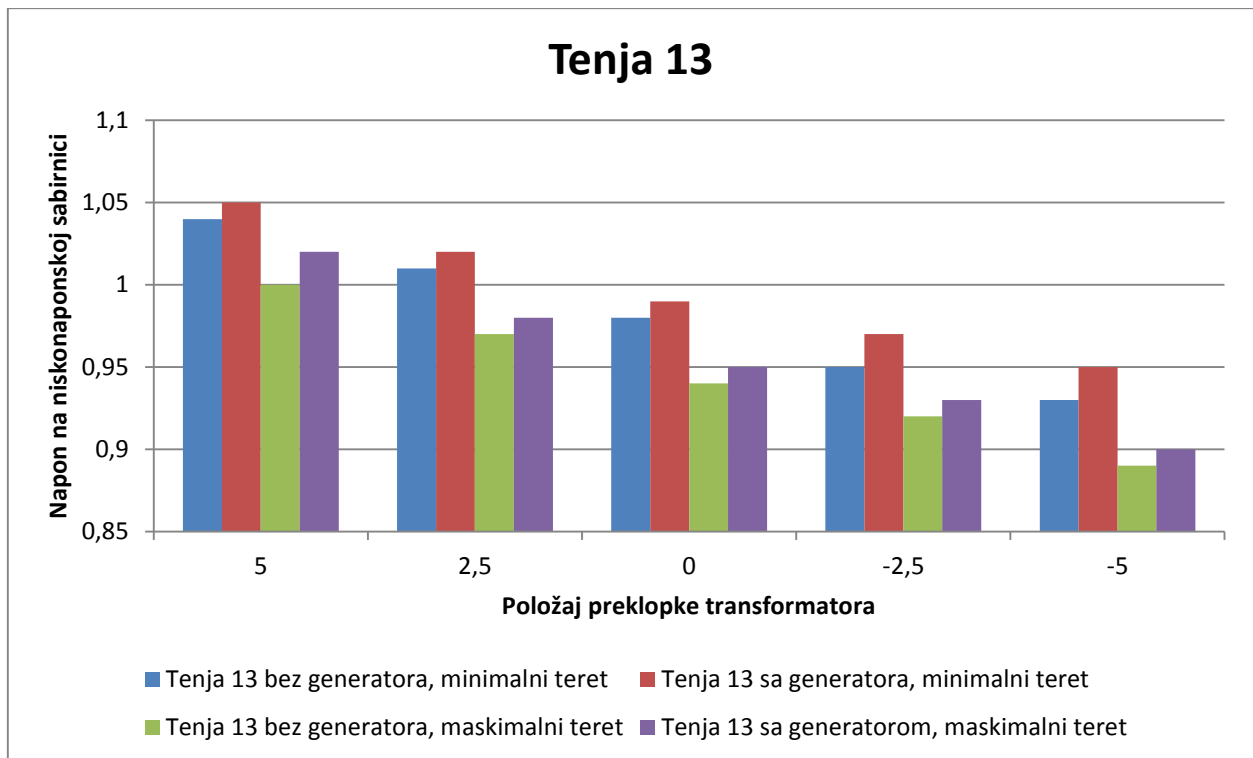
Tablica 10. Naponi prije i nakon dodavanja elektrane za vrijeme vršnog opterećenja

Položaj preklopke transformatora	Napon na sabirnicama [p.u.]			
	Bez generatora		Sa generatorom	
	Tenja 13	Tenja 20	Tenja 13	Tenja 20
5	1	1,01	1,02	1,02
2,5	0,97	0,98	0,98	0,99
0	0,94	0,96	0,95	0,97
-2,5	0,92	0,93	0,93	0,94
-5	0,89	0,9	0,9	0,92

Kao što vidimo iz tablice 10, transformator 110/35 kV može maksimalno smanjiti napon na sekundaru od minimalno -2,5% da bi imali napone u dozvoljenim granicama.

Za vrijeme vršnog opterećenja u mreži, generator u mreži digne napone za 0,01 do 0,02 p.u.-a.

Kako vidimo iz tablica 9 i 10, mreža će ispravno raditi za vrijeme minimalnih i maksimalnih opterećenja sa i bez priključene proizvodnje, neovisno o postavljenom naponu na transformatoru 110/35 kV, sve dok je on postavljen na vrijednost manju ili jednaku od -2,5%. Osim toga, vidjeli smo u simulaciji da se nisu preopteritili transformatori i vodovi u slučaju dodavanja dvostruke proizvodnje.



Slika 3.5. Naponi na niskonaponskoj mreži za vrijeme vršnog i minimalnog opterećenja u mreži ovisno o položaju preklopke transformatora

Na slici 3.5. vidi se kako položaj preklopke transformatora 110/35 kV utječe na napone na niskonaponskoj mreži Tenja 13. Kako vidimo, položaj preklopke transformatora linearno mijenja napone u mreži.

Na temelju dobivenih simulacija možemo zaključiti da postoji mogućnost sa stajališta mreže, da se provedu dodatne investicije u povećanje proizvodnje u elektrani.

### 3.3.3. Utjecaj malog fotonaponskog sustava.

Sve veća proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava može utjecati na naponske prilike u mreži, budući da oni utiskuju u mrežu čistu djelatnu snagu.

Simulacija će se provoditi za 4 različita slučaja proizvodnje. U simulaciji su postavljena tri fotonaponska sustava na niskonaponskoj mreži na izvodima Tenja 13, Tenja 5 i Tenja 4. Snage pojedinih izvoda, kao i postotak proizvodnje u odnosu na vršnu potrošnju, prikazane su u tablici 11. Može se pretpostaviti da će najveća proizvodnja iz fotonaponskih sustava biti u podne, kad se obično nalazi dnevni vrh u potrošnji. Zbog toga se neće analizirati utjecaj za vrijeme minimalnog opterećenja u mreži.

Tablica 11. Instalirana snaga fotonapona na pojedinim sabirnicama

		Proizvodnja fotonaponskog sustava							
		1. slučaj		2. slučaj		3. slučaj		4. slučaj	
Izvod	Opterećenje na izvodu [kW]	kW	%	kW	%	kW	%	kW	%
Tenja 13	68	<b>0</b>	0	<b>85</b>	125,0	<b>115</b>	169,1	<b>150</b>	220,6
Tenja 5	108	<b>0</b>	0	<b>65</b>	60,2	<b>80</b>	74,1	<b>130</b>	120,4
Tenja 4	168	<b>0</b>	0	<b>175</b>	104,2	<b>200</b>	119,0	<b>280</b>	166,7

Simulacija će se provoditi u slučaju povećanja napona na transformatoru za 5%, u vremenu maksimalnog opterećenja. Ove pretpostavke smo uzeli na temelju dosadašnjih analiza, jer povećanje napona od +5% ima pozitivan utjecaj na napone, a fotonaponski sustavi imaju najveću proizvodnju u vremenu kad se i potrošnja nalazi pri podnevnome vrhu potrošnje.

Analizirana mreža je prikazana u dodatku, na slici P3.1. bez uključene druge elektrane Orlovnjak.

Tablica 12. Napon na niskonaponskoj mreži uz fotonaponski sustav, sa i bez bioplinske elektrane

	Tenja 13		Tenja 5		Tenja 4	
	Bez elektrane	Sa elektranom	Bez elektrane	Sa elektranom	Bez elektrane	Sa elektranom
Naponi na sabirnicama [p.u.]						
1. slučaj	1,01	1,01	1	1	1	1
2. slučaj	1,02	1,03	1,01	1,02	1,01	1,01
3. slučaj	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02
4. slučaj	1,03	1,04	1,02	1,03	1,02	1,02

U tablici 12. prikazani su naponi koji se javljaju na niskonaponskim sabirnicama. Rezultati prikazuju slučajeve sa i bez elektrane Orlovnjak.

Na temelju ovih prikazanih rezultata može se zaključiti da proizvodnja neće imati negativan utjecaj na napone. Čak i značajna proizvodnja u mreži digne napone za maksimalno 0,04 p.u.

Na temelju ovoga može se zaključiti da je mreža sposobna apsorbirati svu proizvodnju koja se može u budućnosti spojiti na mrežu, kao što je prikazano u ovima simulacijama.

U ostatku mreže nisu primijećene negativne posljedice spajanja dodatne proizvodnje iz fotonaponskih sustava.

## Zaključak

Pojava sve veće distribuirane proizvodnje u mreži postavlja nove zahtjeve prema vođenju modernih mreža. Više se na elektroenergetski sustav ne može gledati kao na zatvoren sustav s prethodno definiranom proizvodnjom i tokovima snaga, nego na dinamički sustav.

Ovaj razvoj je donio podjelu u mišljenu između inženjera. S jedne strane imamo iskusne inženjere koji na temelju svojih iskustava u vođenju EES-a vide moguće probleme s velikom nekontroliranom proizvodnjom u mreži. S druge strane imamo optimistične inženjere, ali i javnost koja vjeruje da nam je ovakva proizvodnja potrebna u cilju smanjenja emisije stakleničkih plinova, te smanjenje utjecaja na klimatske promjene.

U ovome radu prikazani su utjecaji distribuirane proizvodnje na naponske prilike. Prvo se kroz teorijski osvrt prikazalo kako proizvodnja utječe na naponske prilike, te su se definirali pojmovi za određivanje razina integracije nove proizvodnje. Nakon toga smo prikazali kako utječe proizvodnja sa jediničnim i ne jediničnim faktorom snage. Ovo je važno jer se danas većina distribuirane proizvodnje zbog svoje veličine spaja na mrežu sa jediničnim faktorom snage. Za očekivati je da će se to promijeniti kako će se količina distribuirane proizvodnje povećavati, te će i manji distribuirani proizvođači morati uključiti u regulaciju jalove snage u mreži.

U praktičnome primjeru analizirao se utjecaj distribuirane proizvodnje na naponske prilike u mreži. Mreža koju smo analizirali slična je stvarnoj situaciji u okolici elektrane Orlovnjak. Iz rezultata možemo zaključiti da na razmatranu mrežu priključena proizvodnja, nema negativne utjecaje. Čak se vidjelo da proizvodnja može popraviti naponske prilike u mreži.

Nakon što je analiziran osnovni slučaj, te slučaj spajanja bioplinskog postrojenja Orlovnjak, odredili smo koliku količinu proizvodnje možemo spojiti na mrežu, prije nego se prekoračimo dozvoljene parametre mreže. Vidjelo se da limite postavljaju vodovi i transformatori. U ni jednome slučaju napon nije bio presudan kriterij za ograničenje razine integracije. Provedenim simulacijama odredili smo da je maksimalna količina proizvodnje koja se može spojiti 4,45 MW. Daljnjim povećanjem preopteretili bi se vodovi. Jedno od mogućih rješenja je postavljanje paralelnih vodova. U tome slučaju limit nam postavljaju transformatori, koji ne mogu prenijeti toliku proizvodnju. Sa paralelnim vodovima, razina integracije je 17,78 MW. Ovom metodom razina integracije bi se povećala za četiri puta.

Nakon što smo analizirali kako utječe povećanje paralelnih vodova, analiziran je i slučaj izgradnje nove trafostanice, koja povezuje elektranu Orlovnjak sa 110 kV mrežom. I u ovome slučaju se javlja problem s preopterećenjem vodova, ali se u ovoj analizi nije povećavao broj

paralelnih vodova. U ovome slučaju razina integracije je između 8,89 do 10,668 MW, ovisno o položaju preklopke transformatora. Smanjenje napona za 5% od nazivne vrijednosti povećalo je razinu integracije za 0,889 MW.

Kako vidimo iz dobivenih rezultata, dodavanje transformatora je povećalo razinu integracije, ali ne u mjeri u kojoj je povećalo dodavanje paralelnih vodova. Nakon puštanja u rad trafostanice, povećanje proizvodnje u elektrani Orlovnjak nije imalo utjecaj na napone u niskonaponskoj mreži. Izgradnja trafostanice je opravdana, jer se u slučaju ispada dijela vodova elektrana može spojiti na krutu mrežu preko te trafostanice. S druge strane, trafostanica stvara novi prsten za napajanje dijela mreže, te povećava pouzdanost opskrbe električnom energijom. Ako će se zahtijevati veća razina integracije, moguće će je biti povećati dodavanjem paralelnih srednjenaponskih vodova, koji će u tome slučaju biti preopterećeni.

Na kraju rada analiziran je utjecaj fotonaponskih sustava u niskonaponskoj mreži. Male fotonaponske elektrane koju su raspoređene u niskonaponskoj mreži, nemaju značajan utjecaj na naponske prilike zbog prejake krute mreže. Ona će neovisno o količini proizvodnje održavati napone u mreži. Njihova proizvodnja je samo smanjila tokove snage iz 10 kV mreže. U slučaju veće proizvodnje od potrošnje promijenio se tok djelatne snage iz 0,4 kV mreže prema 10 kV mreži. Kako se vidi iz simulacija, i značajna količina proizvodnje spojene na niskonaponsku mrežu nije utjecala na napone u mreži. Ovo bi se moglo analizirati u nekom od sljedećih radova, gdje bi se odredio koliki udio fotonaponskih elektrana ima značajan utjecaj na naponske prilike u mreži.

Izradom svih simulacija može se primijetiti da distribuirana proizvodnja iz obnovljivih izvora ima pozitivan utjecaj na rad ove mreže. Nije primijećena niti jedna negativna posljedica spajanja nove proizvodnje u mrežu. Razvoj distribuirane proizvodnje je čak i povećao pouzdanost rada mreže. Distribuirana proizvodnja nije imala negativan utjecaj na rad mreže zbog postojanja vrlo jake krute mreže, koja je čvrsto držala napone.

## Literatura

- [1] Bollen M., Hassan F., "Integration of distributed generation in the power system", WILEY, 2011
- [2] Hasić, Avdaković, Čučuković, "Analiza utjecaja priključenja distribuiranih generatora na distribucijsku mrežu", CIGRE 2015 (pristupljeno: travanj 2016)
- [3] Horvat, "Mehanički proračun zračnog voda i kabela mreže", projektni zadatak
- [4] Ladan, Marušić, Havelka, "Usklađivanje djelovanja relejne zaštite u hidroelektrani i srednjenaponskoj mreži", CIRED 2010 (pristupljeno: travanj 2016)
- [5] MIT,  
<http://web.mit.edu/kirtley/binlustuff/literature/wind%20turbine%20sys/DFIGinWindTurbine.pdf> (pristupljeno: svibanj 2016)
- [6] Walla, "Hosting capacity for photovoltaics in Swedish distributiv grids", Uppsala Universitet, 2012 (pristupljeno: svibanj 2016)
- [7] Glavaš, Zdunić, "Uvjeti priključenja male elektrane na distribucijsku mrežu i usporedba s EU propisima", CIRED 2008 (pristupljeno: svibanj 2016)
- [8] "Odluka o proglašenju zakona o obnovljivima izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji", [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_09\\_100\\_1937.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_100_1937.html), narodne novine (pristupljeno: lipanj, 2016)
- [9] Józsa L. "Vođenje pogona elektroenergetskog sustava", ETFOS, Osijek 2015
- [10] NN 177/04, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, narodne novine, <http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/126651.html>, lipanj 2016 (pristupljeno: svibanj 2016)
- [11] Rade Končar, "Tehnički priručnik", Zagreb 1984

## Popis kratica

A	poprečni presjek vodiča
$B_1$	jedinični otpor izvoda
DFIG	dvostruko napajani asinkroni generator (engl. <i>double fed induction generator</i> )
EES	elektroenergetski sustav
$G_1$	jedinični vodljivost izvoda
$kW_p$	vršna instalirana snaga
l	duljina vodiča
NN	niski napon
P	djelatna snaga
p.u.	jedinična vrijednost (engl. <i>per unit</i> )
Q	jalova snaga
R	djelatni otpor
$R_1$	jedinični otpor izvoda
rms	efektivna vrijednost napona (engl. <i>Root Mean Square</i> )
S	prividna snaga
SN	srednji napon
$X_1$	jedinični reaktancija izvoda
$\lambda$	udaljenost od sabirnice. (0 mjesto sabirnice, 1 kraj izvoda)
P	specifični otpor materijala

## **SAŽETAK**

Pojava distribuirane proizvodnje donosi novi način u vođenju mreže. Mreža je u prošlosti bila pasivna, a danas sve više postaje aktivna. Zbog se tokovi snaga mijenjaju. To donosi nove izazove u vođenje mreže. Tržište električnom energijom postaje interesantno investitorima, te oni žele ulagati u ovo područje. Zbog specifičnosti elektroenergetsko sustava, potrebno je analizirati kako će investicije utjecati na rad i pouzdanost mreže.

**Ključne riječi:** razina integracije, distribuirana proizvodnja, naponski limiti

## **Impact of distributed generation from renewable generation to the voltage magnitude in electric grid**

### **ABSTRACT**

Emergence of distributed generation brings new methods in operation of network. In the past electrical grid was passive, but today it become more active. Distributed generation starts to change direction of power. This brings new challenges in managing of electric grid.

Market of electric energy become interested to private investors, so that they want to invest. But due to the specifics of electric system it is necessary to analyze how the investments will impact to performance and reliability of grid.

**Key words:** hosting capacity, distributed generation, voltage limits



## **Životopis**

Antonio Horvat, rođen je 1991. godine u Varaždinu. Nakon osnovne škole upisuje Elektrostrojarsku školu u Varaždinu, te dobiva zvanje elektrotehničar. Nakon srednje škole upisuje stručni studij elektroenergetike 2010. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, gdje diplomira pod mentorstvom mr.sc. Milice Pužar, Nakon toga upisuje razlikovnu godinu, te 2014. godine upisuje diplomski studij elektroenergetike.

Član je međunarodne i HRO CIGRÉ.

Antonio Horvat

U Osijeku, 11. srpnja 2016

---

## Prilozi

Tablica P3.1. Popis transformatora u mreži

Naziv transformator	Snaga	Proizvođač	Spoj
T 160 kVA Tenja 19	0,16 MVA	ASEA	Dyn5
T 160 kVA Tenja 20	0,16 MVA	ASEA	Dyn5
T 160 kVA Tenja 5	0,16 MVA	ASEA	Dyn5
T 160 kVA Tenja 13	0,16 MVA	ASEA	Dyn5
T 250 kVA Tenja 4	0,25 MVA	ASEA	Dyn5
T1 110/35 kV Osijek 1	40 MVA	Končar	Dyn5
T1 35/10kV ORLOVNJAK	4 MVA	Končar	Yd5
T1 35/110kV Istok	8 MVA	Končar	Yd5
T1 Elektrana	2,5 MVA	Končar	Yd5
T2 110/35 kV Osijek 1	40 MVA	Končar	Yd5
T2 35/10 Orlovnjak	4 MVA	Končar	Yd5
T2 35/10kV Istok	8MVA	Končar	Yd5

Tablica P3.2. Popis vodova

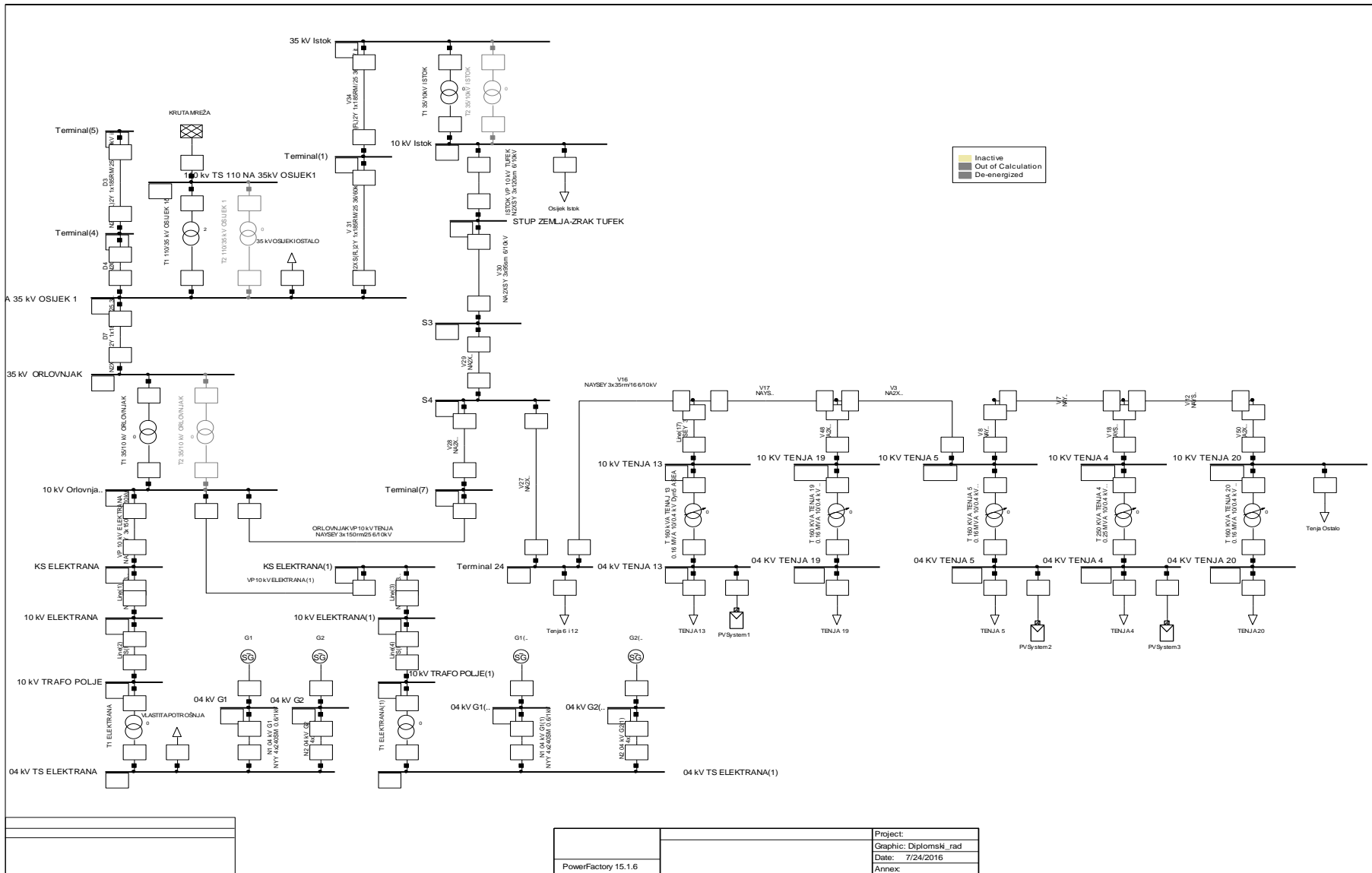
Naziv izvoda	Tip kabela	Napon	Duljina [km]
N2 04 kV G2	NYN 4X240	0,6/1kV	0,01
N1 04kV G1	NYN 4X240	0,6/1kV	0,01
V8	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	0,6
V7	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	0,255
V18	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	0,342
V17	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	0,207
V16	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	0,647
V12	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	0,036
ORLOVNJAK VP 10 kV Tenja	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	1
Line(17)	NAYSEY 3X35mm/16	6/10 kV	1
V30	NA2XSY 3X95mm	6/10kV	2,818
V3	NA2XSY 3X95mm	6/10kV	0,026
V29	NA2XSY 3X95mm	6/10kV	2,34
V28	NA2XSY 3X95mm	6/10kV	1,188

V27	NA2XSY 3X95mm	6/10kV	0,425
VP 10kV ELEKTRANA	NA2XS2Y 3X150	6/10kV	0,001
V50	NA2XS2Y 3X151	6/10kV	0,38
V48	NA2XS2Y 3X152	6/10kV	0,3
Line(1)	NA2XS2Y 3X153	6/10kV	0,5
ISTOK VP 10kV TUFEK	N2XSY 3X120 mm	6/10kV	0,827
V34	N2XS(FL)2Y 1X185RM/25	36/60kV	1,197
V31	N2XS(FL)2Y 1X185RM/25	36/60kV	5,06
D7	N2XS(FL)2Y 1X185RM/25	36/60kV	6
D4	N2XS(FL)2Y 1X185RM/25	36/60kV	5,079
D3	N2XS(FL)2Y 1X185RM/25	36/60kV	0,84
Line(2)	N2XS(F)2Y 1X70RM/16	12/20kV	0,001

Tablica P3.3 Naponi na sabirnicama Tenja 13 i Tenja 20 ovisno o broju generatora,  
i podešenom naponu sredjenaponske mreže

Napon na transformatoru	2		2,5		0		-2,5		-5	
	Tenja 13	Tenja 20	Tenja 13	Tenja 20	Tenja 13	Tenja 20	Tenja 13	Tenja 20	Tenja 13	Tenja 20
0	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
2	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
4	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
6	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
8	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
10	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
12	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
14	1,04	1,03	1,01	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92





Slika P3.1. Mreža sa paralelnom elektranom, i fotonaponskim sustavom