

**PLANIRANJE RADA DISTRIBUTIVNIH SISTEMA SA UČEŠĆEM
DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE**

**DISTRIBUTION SYSTEM OPERATION AND PLANNING IN THE
PRESENCE OF DISTRIBUTED GENERATION TECHNOLOGY**

Stručni članak

*Pred. VŠ Meris Rahmanović dipl.ing.el.teh.**

*Semir Nurkić dipl.ing.el.teh.**

Sažetak

Distribuirana proizvodnja (DG) postaje sve atraktivniji način proizvodnje električne energije. Ekonomska opravdanost, smanjenje emisija štetnih gasova ali i korištenje novih tehnologija su neki od razloga povećanja efikasnosti u odnosu na tradicionalne izvore električne energije. Iako koncept DG nije nešto novo, vrlo malo se istraživalo na tu temu, malo je praktičnih vježbi i primjera rađeno na području DG. Ovaj nedostatak istraživanja, zajedno sa drugim faktorima, usporava prihvatanje DG na tržištima električne energije, osim u industrijske ili komercijalne svrhe kao vid kogeneracije toplotne i električne energije. Ovaj rad se bavi poređenjem tri vrste DG: dizel generatori, mikroturbine i malih vjetroturbina u distributivnoj mreži. DG je analizirana u stacionarnom i tranzijentnom stanju kako bi se utvrdio koji je način rada pogodan za određenu vrstu proizvodnje.

Ključne riječi: distribuirana proizvodnja, dizel generatori, mikroturbine, male vjetroturbine.

**Visoka škola „CMS – Centar za multidisciplinarne studije“ Tuzla, e-mail: meris.rahmanovic@gmail.com*

**JU MSS “Banovići”, e-mail: semir.nurkic@hotmail.com*

Abstract

Distributed generation (DG) is becoming an increasingly attractive power generation paradigm in the field of power engineering as economic and environmental factors drive new technologies to be more efficient and less polluting than their earlier counterparts. Although the concept of DG is not new, little research has been done on the topic and even fewer field tests have been performed. This lack of research, along with other factors, has somewhat slowed the acceptance of DG into markets, other than industrial or commercial co-generation for heat and power. This thesis attempts to examine and compare three types of DG: diesel generators, microturbines, and small wind turbines within the structure of a distribution system. The DG types are compared in both steady-state and transient operation to determine which type is suitable for a particular application.

Key words: distributed generation, diesel generators, microturbines, small wind turbines.

1. UVOD

Počeci distribuirane proizvodnje električne energije datiraju još od trenutka kada je Tomas Edison izumio prvu električnu sijalicu i na taj način otvorio vrata ka ostvarivanju širokih potreba za električnom energijom.

Distribuirani generatori (DG) općenito podrazumjevaju generatore male snage i male fizičke veličine, priključene na postojeću elektroenergetsku mrežu

Korištenje DG može poboljšati kvalitet napajanja potrošača na nekoliko načina, iako svaki ovisi od lokacije i tipa korištenja DG. Korištenje DG može popraviti naponske profile sistema [1], a može i smanjiti gubitke aktivne i reaktivne snage u sistemu kada se nalazi u blizini potrošača.

Distribuirana proizvodnja ima mnoge prednosti za potrošače i proizvođače električne energije, ali također ima i mnogo nedostataka. Jedan od najvećih nedostataka korištenja DG je ekonomičnost. Alternativna rješenja ugljenu i fosilnim gorivima, poput Sunca i vjetra zahtijeva kupovinu tehnologija koje još uvijek imaju vrlo visoke početne troškove.

2. UTICAJ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE NA PONAŠANJE SISTEMA

2.1. Naponski profili

Distribuirani generatori se rjeđe koriste za rješavanje problema odstupanja napona u odnosu na regulatore napona, kondenzatorske baterije. Postoje neka skorašnja istraživanja o mogućnostima korištenja distribuiranih generatora za poboljšanje profila napona.

Studije koje razmatraju priključenje DG-a i povećanja vrijednosti napona koriste različite metode i pokazuju

- vrijednost napona se povećava lociranjem distribuiranog generatora blizu opterećenja;
- vrijednosti napona se mogu povećati i povećanjem snage distribuiranog generatora, pri čemu se snaga ipak treba ograničiti kako pažljivim proučavanjem sistema tako i sopstvenom regulacijom generatora kako bi se spriječila mogućnost pojave prenapona.

2.2 Gubici u sistemu

Položaj DG znatno utiče na smanjenje gubitaka u sistemu, tako da distribuirana proizvodnja generatora većih snaga obično rezultira manjim gubicima [3].

Koristeći DG moguće je smanjiti zagušenje na vodovima tokom velikih opterećenja, a tokom perioda manjih opterećenja više je izražena promjena smjera toka snage nego smanjenje opterećenja voda.

2.3. Pouzdanost i ostrvski rad sistema

Distribuirana proizvodnja ima sposobnost da smanji privremene i stalne ispade u distributivnim sistemima. Ostrvski režim napajanja obično se događa kada dio distributivnog sistema napajan s DG-om biva isključen sa glavne trafostanice tokom tranzijentne pojave

2.4. Kvarovi i koordinacija zaštite od kvara

Tranzijentni kvarovi su dvostruki problem za potrošače distribuirane proizvodnje, pa zaštitni uređaji koji se koriste u sistemima s distribuiranim generatorima moraju biti sposobni za isključenje tih kvarova u sistemu bez pogrešnog djelovanja te da onemoguće stvaranje sistemskih kvarova. To je otežano činjenicom da kvarovi na sistemima s DG zahtijevaju zaštitne uređaje za uklanjanje struja kvara iz više izvora, a ne samo iz jednog.

3. TEHNOLOGIJE DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE

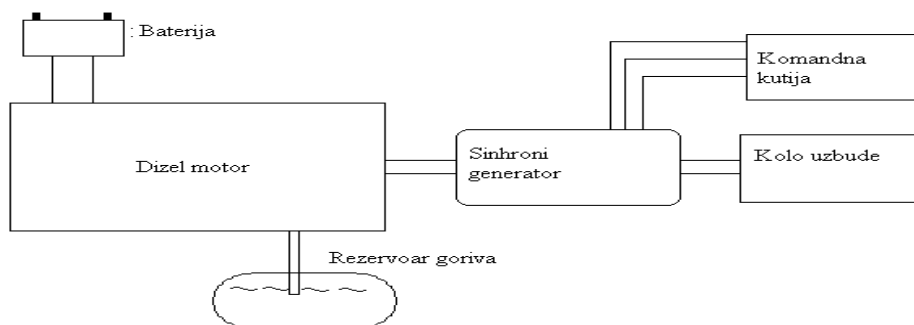
3.1. Pregled

U ovom dijelu rada analizira se rad dizel generatora, mikroturbina i vjetroturbina koje se obično primjenjuju u distributivnoj proizvodnji. Pri tome dizel generatori i mikroturbine najčešće koriste sinhronne generatore, a vjetroturbine najčešće koriste asinhronne generatore.

3.2. Dizel generatori

Dizel generatori se najčešće koriste kod stambenih potrošača, preduzeća i važnih javnih ustanova kao što su policija i bolnice, a razlog je što su jeftin i pouzdan izvor energije.

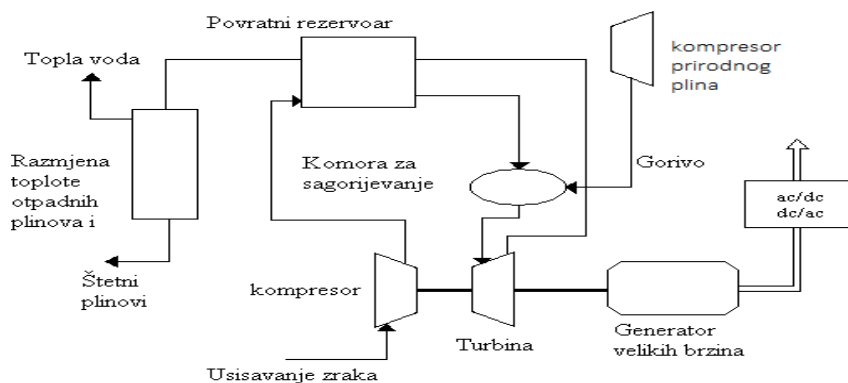
Osnovni dijelovi dizel generatora su: dizel motor i sinhroni generator. Blok dijagram dizel generatora prikazan je na slici 1:



Slika 1: Blok dijagram dizel generatora [4]

3.3. Mikroturbine

Mikroturbine su savremena tehnologija u oblasti distribuirane proizvodnje iz razloga što se počela razvijati u posljednjih 10 do 15 godina. Tehnologije mikroturbine nude mnoge prednosti od kojih je najvažnija da mogu koristiti različite vrste goriva poput tečnih dizela i benzina, plinskih goriva dobijenih iz sagorijevanja otpada, prirodni plin i slično. Mikroturbina se sastoji od dva dijela: visokobrzinske plinske turbine i sinhronog generatora. Blok dijagram tipične mikroturbine prikazan je na slici 2 [4].

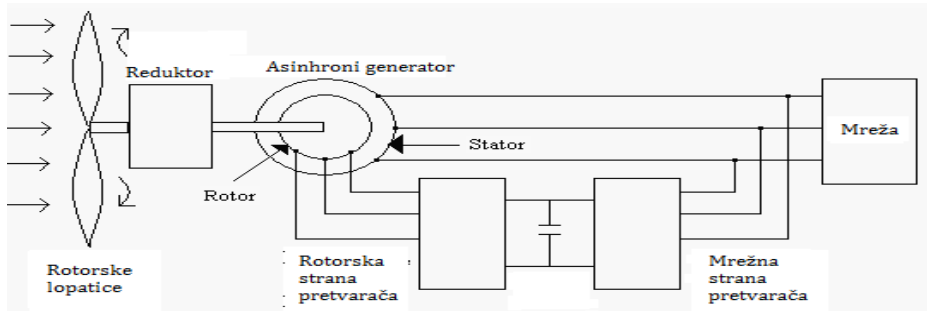


Slika 2: Blok dijagram mikroturbine [4]

3.4. Vjetroturbine

Vjetroturbine imaju nekoliko prednosti u odnosu na ostale tipove generatora. Najznačajnije su da je izvor energije besplatan, neograničen i nema potrebe za skladištenjem i transportom.

Također ne proizvode emisije štetnih plinova kao generatori na fosilna goriva.



Slika 3: Blok dijagram vjetroturbine i asinhronog generatora [5]

4. REZULTATI PROVEDENIH SIMULACIJA

4.1. Testni sistem

Testni sistem koji je korišten je IEEE sistem sa 34 sabirnice prikazan u Prilogu A.1. Sistem je kreiran u DIgSILENT pri čemu su korišteni parametri sistema IEEE [8] prikazani u prilogu tabelama B.1 i B.2. Izraz (1) [6] se koristi za proračun impedansi distributivnih vodova simetričnih komponenti.

$$[(R + jX)_{012}] = [A_2]^{-1} \cdot [(R + jX)_{abc}] \cdot [A_2]^{-1} \quad (1)$$

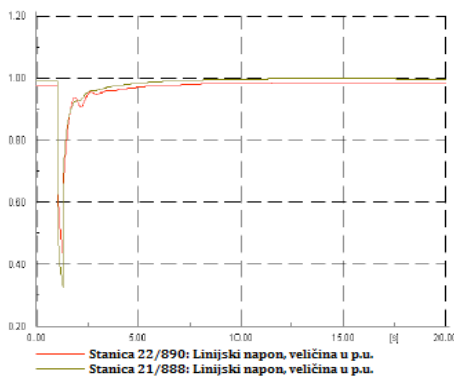
gdje je:

- $[(R + jX)_{012}]$ – matrica simetričnih komponenti,
- $A_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$ operator a je kompleksan broj,
- $[(R + jX)_{abc}]$ – matrica impedansi faznih komponenti.

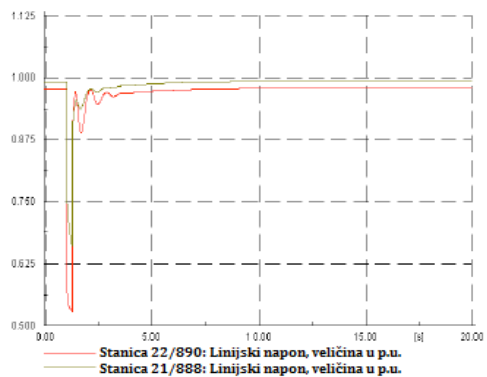
Sistem je verificiran korištenjem stanja nesimetričnih tokova snage u DIgSILENT-u sa ograničenjem reaktivne snage i automatskom regulacijom opterećenja.

4.2. Analiza jednofaznog kratkog spoja

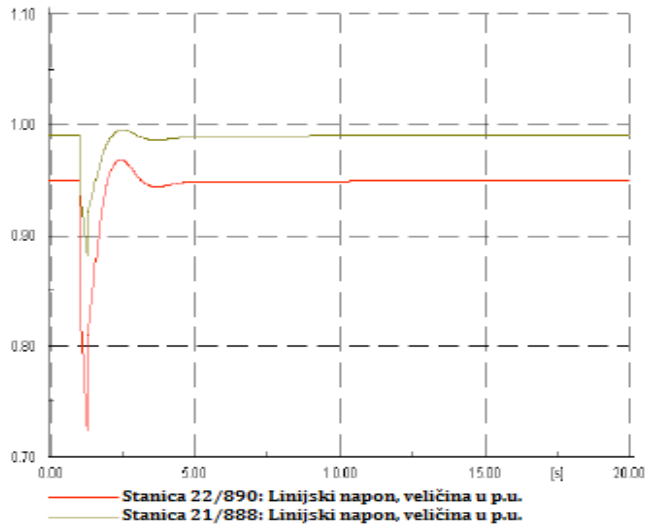
Prva analiza urađena je za jednofazni kratki spoj koji se desio u $t=1$ sekundi a kvar je otklonjen u $t=1.25$ sekundi. Snaga DG povećana je za 15% svakog slučaja a rezultati su predstavljeni na slikama 4 do 6. Rezultati simulacije pokazuju da mikroturbina i dizel generator proizvode veće oscilacije napona od vjetroturbine. Razlog ovome je što generator vjetroturbine zahtjeva napon uzbude iz mreže. Uslov za eliminisanje kvara jeste da je vjetroturbina priključena na mrežu, što znači da je izvor struje kratkog spoja eliminisan.



Slika 4: Vrijednosti napona tokom jednofaznog kratkog spoja kod napajanja sistema dizel generatorom [7]



Slika 5: Vrijednosti napona tokom jednofaznog kratkog spoja kod napajanja sistema mikroturbinom [7]

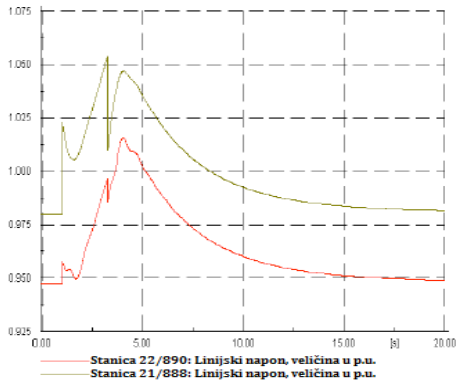


Slika 6: Vrijednosti napona tokom jednofaznog kratkog spoja kod napajanja sistema malom vjetroturbinom [7]

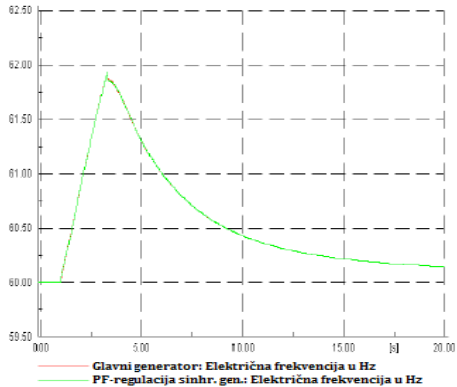
Mirkoturbinu je stabilnija tokom kratkog spoja od dizel generatora, što je uzrokovano time što dizel generator ne može proizvoditi reaktivnu energiju i zbog samog opterećenja na DG sabirnici. Kako dizel generator proizvodi samo aktivnu snagu to znači da pri realnim opterećenjima dolazi do potražnje dodatne reaktivne snage iz glavnog generatora, dok u slučaju sa mikroturbinom nema potrebe za tim. Ova dodatna struja iz glavnog generatora dovodi do toga da jednofazni kratki spoj ostavlja velike posljedice na naponske prilike sabirnica pogođenim kratkim spojem. Analiza pokazuje da neovisno od vrste DG-a dolazi do popravljivanja stabilnosti bez obzira na prolaznost kvara što se vidi na slikama 4 do 6.

4.3. Analiza rasterećenja sistema

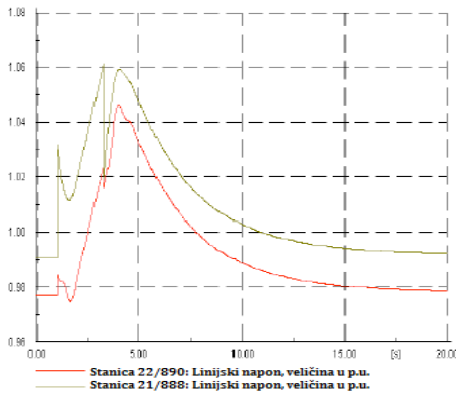
Sljedeći korak analize tranzijentne stabilnosti jeste analiza ponašanja sistema pri privremenom rasterećenju sistema. To podrazumjeva isključenje sabirnica 842, 844, 846 i 848 u trenutku $t=1$ sekundi i ponovno uključenje u $t=3.25$ sekundi. Ovo je simulacija pogrešnog uključjenja releja i rekonekcije, a rezultati su prikazani slikama 7 do 12.



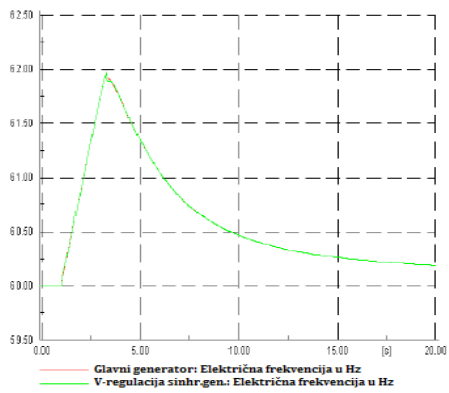
Slika 7: Vrijednosti napona tokom rasterećenja sistema kod napajanja dizel generatorom [7]



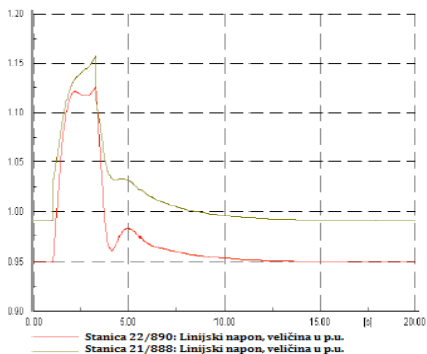
Slika 8: Vrijednosti frekvencija generatora tokom rasterećenja sistema kod napajanja dizel generatorom [7]



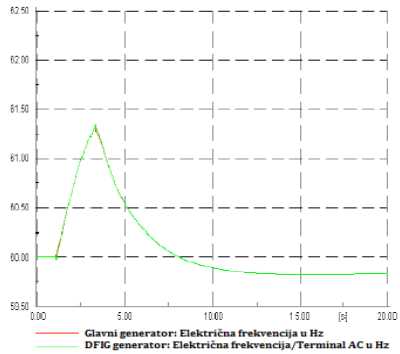
Slika 9: Vrijednosti napona tokom rasterećenja sistema kod napajanja mikroturbinom [7]



Slika 10: Vrijednosti frekvencija generatora tokom rasterećenja sistema kod napajanja mikroturbinom [7]



Slika 11: Vrijednosti napona tokom rasterećenja sistema kod napajanja malom vjetroturbinom [7]

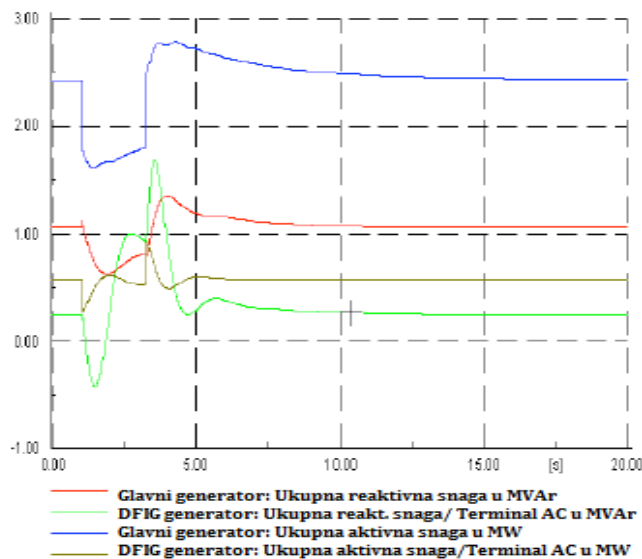


Slika 12: Vrijednosti frekvencija generatora tokom rasterećenja sistema kod napajanja malom vjetroturbinom [7]

Rasterećenje sistema pokazuje da iako vjetroturbina znatno više utiče na frekventnu stabilnost za razliku od mikroturbine i dizel generatora, može uticati i na pojavu prenapona, slika 11. Ukoliko se teži da se napon drži u relativno uskim granicama oko nominalne vrijednosti, doći će do pojave podsinkronih frekvencija, slika 12. To je uzrokovano prenošenjem momenta tereta na glavni generator nakon ponovnog uključanja opterećenja.

Povećanje proizvodnje reaktivne i aktivne snage od strane glavnog generatora može se vidjeti sa slike 13. Također se može vidjeti da će vjetroturbina preuzeti reaktivnu energiju iz mreže na nekoliko desetina sekundi od rasterećenja potrošnje. Minimalna vrijednost reaktivne snage apsorpcije je otprilike zadana reaktivnom snagom od -0.3 MVar. Ovo se može iskoristiti za popravljjanje naponskih prilika sabirnica.

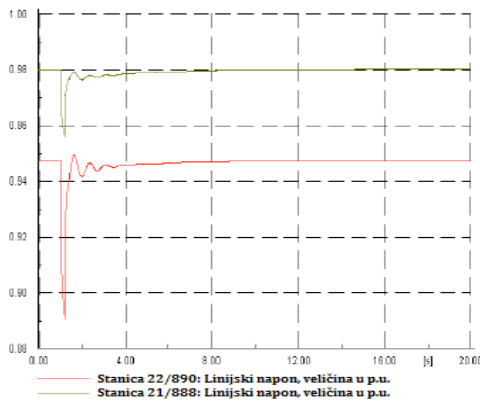
Analiza pokazuje da se sistem vraća u stabilno stanje korištenjem bilo koje vrste DG.



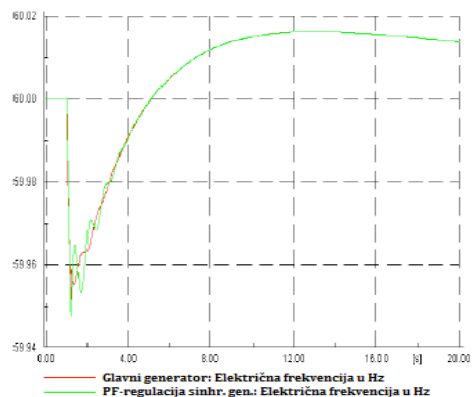
Slika 13: Izlazne snage generatora tokom rasterećenja sistema kod napajanja malom vjetroturbinom [7]

4.4. Analiza povećanja opterećenja

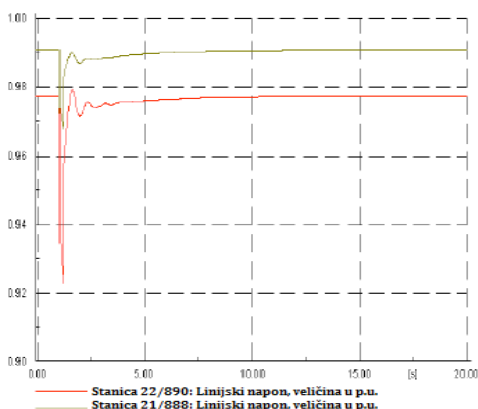
Konačna analiza tranzijentne stabilnosti sistema posmatra ponašanje sistema pri povećanju snage potrošnje. Ovo je simulirano povećanjem opterećenja potrošnje sabirnice 890 za 25 % u trenutku $t=1$ sekunde od ukupnog vremena trajanja simulacije i rasterećenjem sistema na prvobitno opterećenje nakon 1.2 sekundi. Analiza je predstavljena graficima na slikama 14 do 19.



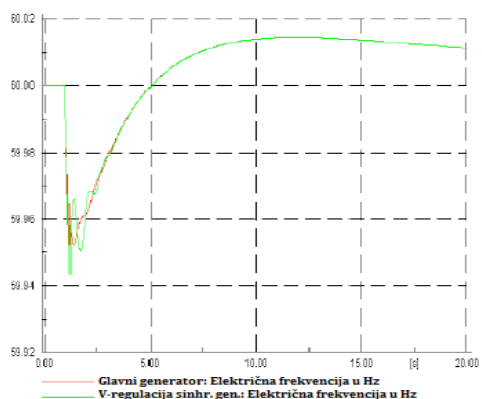
Slika 14: Vrijednosti napona tokom povećanja potrošnje kod napajanja sistema dizel generatorom [7]



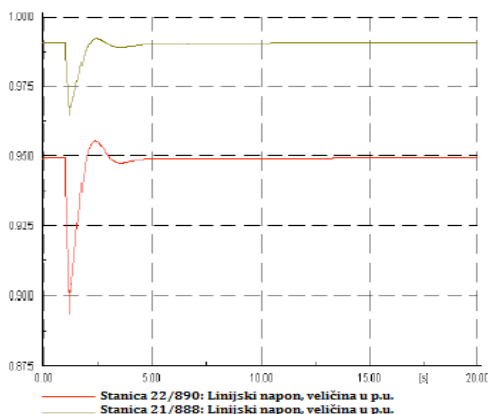
Slika 15: Vrijednosti frekvencija generatora tokom povećanja potrošnje kod napajanja sistema dizel generatorom [7]



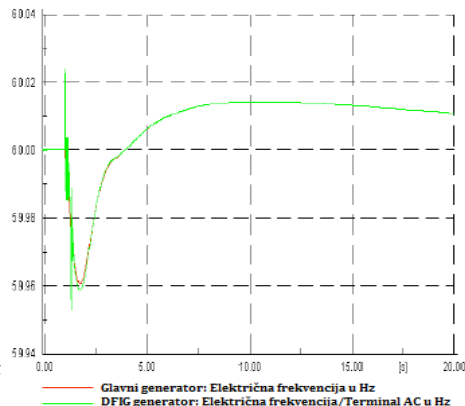
Slika 16: Vrijednosti napona tokom povećanja potrošnje kod napajanja sistema mikroturbinom [7]



Slika 17: Vrijednosti frekvencija generatora tokom povećanja potrošnje kod napajanja sistema mikroturbinom [7]



Slika 18: Vrijednosti napona tokom povećanja potrošnje kod napajanja sistema malom vjetroturbinom [7]



Slika 19: Vrijednosti frekvencija generatora tokom povećanja potrošnje kod napajanja sistema malom vjetroturbinom [7]

Analiza pokazuje da vjetroturbina znatno povećava oscilacije frekvencije pri povećanju opterećenja, ali u relativno kratkom vremenu te oscilacije se smire oko frekvencije glavnog generatora, Slika 16. Dizel generatori i mikroturbine pokazuju veće oscilacije frekvencije i napona sabirnica, iako se te oscilacije napona stabilizuju prije nego je to slučaj kod vjetroturbine što se vidi na slikama 14 do 19.

Sistem dolazi u stabilno stanje nakon povećanja opterećenja bez obzira na vrstu DG, što znači da DG ne utiče mnogo na stabilnost sistema za ovu vrstu poremećaja.

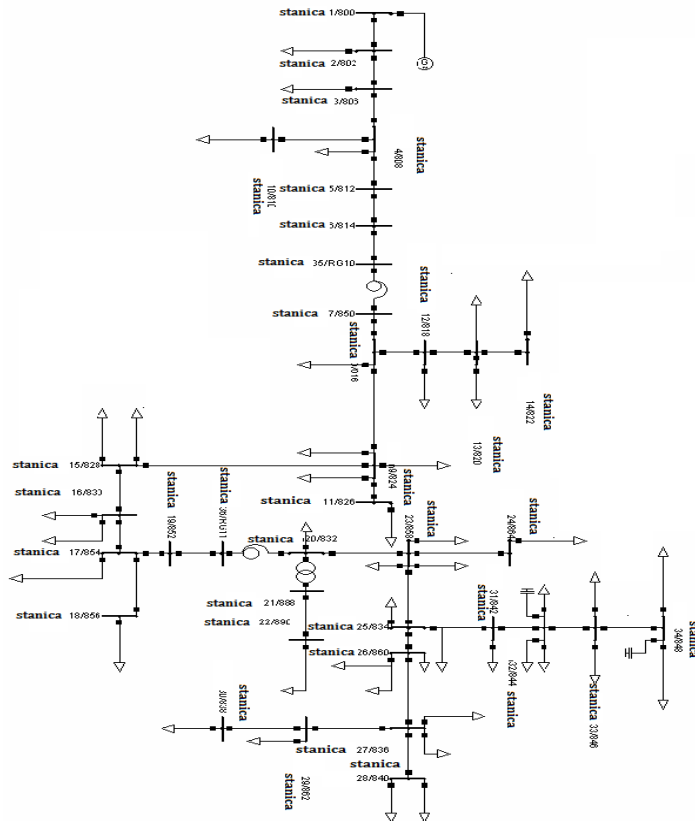
5. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane tri vrste distribuiranih generatora: dizel generatori, mikroturbine i vjetroturbine.

Analiza tranzijentnih režima rada pokazuje da svaki tip distribuiranih generatora dovodi do značajnih oscilacija u sistemu (promjene napona i frekvencije). Vjetroturbina uzrokuje najveće oscilacije u slučaju jednofaznog kvara i povećanja potrošnje. Utvrđeno je da dizel generator i mikroturbina imaju relativno iste uticaje, što se može objasniti time da su oba modelirana kao sinhroni generator. Mikroturbine imaju nešto malo bolje tranzijentne karakteristike, zbog proizvodnje reaktivne snage.

Analiza sistema u slučaju rasterećenja sistema pokazala je najveće oscilacije frekvencije, iako je to uzrokovano dužim vremenskim trajanjem ovog režima rada za razliku od druga dva režima.

Prilog A1: DIGSILENT MODEL



Slika A.1 DIGSILENT model sistema sa 34-sabirnice [7]

	Linija	Model	Udaljenost (km)	Napon (kV)	Frekvencija (Hz)
800	802	300	0.7862	24.9	60
802	806	300	0.5272	24.9	60
806	808	300	9.8216	24.9	60
808	810	303	1.7687	24.9	60
808	812	300	11.4276	24.9	60
812	814	300	9.0598	24.9	60
814	RG10	301	0.003	24.9	60
850	816	301	0.0945	24.9	60
816	818	302	0.5211	24.9	60
818	820	302	14.873	24.9	60
820	822	302	4.1871	24.9	60
824	826	301	0.256	24.9	60
830	854	301	0.1585	24.9	60
854	856	303	7.1095	24.9	60
854	852	301	11.2234	24.9	60
852	RG11	301	0.003	24.9	60
888	890	300	3.218	4.16	60
832	858	301	1.4932	24.9	60
858	864	303	0.4937	24.9	60
858	834	303	1.7766	24.9	60
834	842	301	0.0853	24.9	60
842	844	301	0.4114	24.9	60
844	846	301	1.1092	24.9	60
846	848	301	0.1004	24.9	60
834	860	301	0.6516	24.9	60
860	836	301	0.8167	24.9	60
836	840	301	0.2612	24.9	60
836	862	301	0.0853	24.9	60
862	838	304	1.481	24.9	60
890	sistem	kratki	0.0001	4.16	60

Tabela B.1 Vrijednosti po linijama [7]

Model	Tip	Nazivne struje (kA)	Faza/neutralni	$R_0 + jX_0$ (Ω/km)	$R_{12} + jX_{12}$ (Ω/km)	B_0 ($\mu\text{S}/\text{km}$)	B_{12} ($\mu\text{S}/\text{km}$)
300	nadzemni	1	3/1	1.0875+j1.4741	1.6961+j0.5179	1.8702	3.8259
301	nadzemni	1	3/1	1.4838+j1.6024	1.0504+j0.5228	3.6696	1.8227
302	nadzemni	1	3/1	0.58+j0.3077	0.58+j0.3077	0.8753	0.8753
303	nadzemni	1	3/1	0.58+j0.3077	0.58+j0.3077	0.8753	0.8753
304	nadzemni	1	3/1	0.3981+j0.2944	0.3981+j0.2944	0.904	0.904
kratki	nadzemni	1	3/1	0.0001+j0.0001	0.0001+j10.0001	0.0001	0.0001

Tabela B.2 Parametri modela po linijama [7]

LITERATURA

1. P. Chiradeja, R. Ramakumar, “Voltage profile improvement with distributed wind turbine generation-a case study,” Power Engineering Society General Meeting, IEEE, vol. 4, 2003.
2. Operation Technology, Inc., [<http://www.etap.com/>], accessed June 29, 2007.
3. V.H.M. Quezada, J.R. Abbad, T.G. San Román, “Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, issue 2, pp. 533-540, May 2006
4. F.A. Farrey, M. Godoy Simões, Integration of Alternative Sources of Energy, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
5. A.D. Hansen, E. C. Lopez, J. Persson, H. Knudsen, J.N. Nielsen, Wind Power in Power Systems, edited by T. Ackermann, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2005.
6. W.H. Kersting, Distribution System Modeling, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
7. G.W. Jones, “Distribution system operation and planning in the presence of distributed generation technology, ” University of Missouri-Rolla, 2007.
8. Power System Analysis, Computing, and Economics Committee of the IEEE Power Engineering Society, “IEEE 34 Node Test Feeder,” accessed January 9, 2007.