

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.23](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.23)**C2.23****OPTIMIZACIJA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE KROZ REAKTIVNU
KOMPENZACIJU U OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE****OPTIMIZATION OF POWER QUALITY THROUGH REACTIVE COMPENSATION IN
RENEWABLE ENERGY SOURCES****Pavle Gorašević*, Ognjen Pantović, Nebojša Jović, Milan Ivanović**

Kratak sadržaj: Sve veći udeo obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije u kombinaciji sa striktnim zahtevima operatora prenosnog sistema za reaktivnom podrškom naponu u velikom broju slučajeva iziskuje primenu kompenzacionih uređaja reaktivne snage. Primena reaktivne kompenzacije rešava problem reaktivne podrške naponu, ali može dodatno narušiti parametre kvaliteta električne energije u zavisnosti od same strukture energetske parka. U ovom radu je analiziran uticaj ugradnje reaktivne kompenzacije na parametre kvaliteta električne energije u tački priključenja energetske parka. U sklopu rada je predstavljena vetroelektrana modelovana u programskom paketu *DigSILENT PowerFactory* sa ugrađenom reaktivnom kompenzacijom u cilju ispunjavanja kriterijuma za naponsko-reaktivnim mogućnostima i ispitan je njen uticaj na parametre kvaliteta električne energije. Analiziran je uticaj čisto reaktivne kompenzacije (kondenzator) na parametre kvaliteta električne energije, kao i uticaj filtera na njihovo poboljšanje. Takođe, obrađen je i uticaj uvažavanja frekvencijske zavisnosti elemenata elektrane na kvalitet električne energije.

Ključne reči: *kvalitet električne energije, filteri, obnovljivi izvori energije*

Abstract: The increasing share of renewable energy sources in electricity generation, combined with the strict requirements from transmission system operators for reactive power support, often necessitates the use of reactive power compensation devices. The application of reactive compensation addresses the issue of reactive power support for voltage control, but it may also negatively impact the power quality parameters, depending on the structure of the energy park. This paper analyzes the impact of reactive compensation installation on the power quality parameters at the point of connection of the energy park. The paper presents a wind farm modeled in the *DigSILENT PowerFactory* software package, with integrated reactive compensation to meet voltage-reactive capability criteria and investigates its effect on power quality parameters.

* Pavle Gorašević, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, gorasevic.pavle@gmail.com
Ognjen Pantović, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, ognjen.pantovic@ekc-ltd.com
Nebojša Jović, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, nebojsa.jovic@ekc-ltd.com
Milan Ivanović, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, milan.ivanovic@ekc-ltd.com

The impact of pure reactive compensation (capacitors) on power quality parameters are analyzed, as well as the effect of filters in improving these parameters. Additionally, the influence of considering the frequency dependence of power plant components on power quality is also addressed.

Key words: power quality, passive filters, renewable energy sources

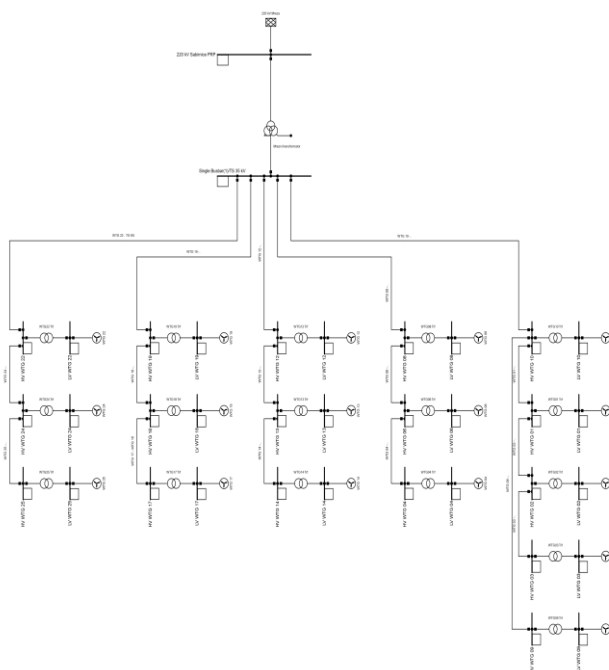
1 UVOD

U ovom radu prikazan je uticaj reaktivne kompenzacije na kvalitet električne energije kao i primena odgovarajućih korektivnih mera u cilju poboljšanja iste. Analiza je izvršena na pokaznom primeru vetroelektrane u softverskom alatu *DigSILENT PowerFactory* u kojoj je ugrađena kapacitivna kompenzacija od 9 MVar i ispitan je uticaj na parametre kvaliteta električne energije. U drugom poglavlju dat je opis pokaznog modela vetroelektrane, kao i opis samog softverskog alata u kome su vršene analize. U trećem poglavlju opisani su zahtevi operatora prenosnog sistema vezani za kvalitet električne energije koje analizirana vetroelektrana mora ispuniti u tački priključenja na prenosnu mrežu. U četvrtom poglavlju dati su rezultati prethodno navedenih analiza, dok je u petom poglavlju iznet zaključak.

2 OPIS SOFTVERSKOG ALATA I POKAZNOG MREŽNOG MODELA

Softverski alat u kome je modelovana vetroelektrana je *DigSILENT PowerFactory*. Prilikom simulacija korišćena je verzija *DigSILENT PowerFactory 2022 SP3*. Ovaj softverski alat omogućava modelovanje i proračun kako u prenosnoj mreži tako i u distributivnim i industrijskim mrežama i obezbeđuje veoma širok spektar funkcija i proračuna [1]. Dodatni modul, korišćen u ovom radu je modul za analizu kvaliteta električne energije.

Na Sl. 2-1 prikazan je pokazni mrežni model vetroelektrane korišćen u simulacijama prikazanim u ovom radu.



Sl. 2-1: Pokazni mrežni model vetroelektrane urađen u programskom paketu DigSILENT PowerFactory

Vetroelektrana se sastoji iz 17 vetrogeneratora, grupisanih u pet klastera. Jedan klaster se sastoji iz pet vetrogeneratora, dok se preostalih četiri klastera sastoji od po tri vetrogeneratora. Vetrogeneratori su modelovani statičkim generatorima. Prenosni odnos mrežnog tronamotajnog transformatora je 220/35/10 kV, gde je 220 kV mrežni napon, 35 kV napon srednjenaponske kablovske mreže, a 10 kV je napon na tercijeru. Prenosni odnos blok transformatora je 35/0.69 kV, gde je 35 kV napon srednjenaponske mreže, a 0.69 kV napon na izlazu vetrogeneratora. Vetroelektrana se preko jednog tronamotajnog mrežnog transformatora priključuje na prenosnu mrežu. Prenosna mreža je modelovana kao naponski izvor sa Tevenenovom impedansom gledano iz tačke priključka.

Osnovni ulazni podaci za proračun harmonika su strujni izvori harmonijskih izobličenja. Korišćene su generičke vrednosti strujnog spektra, pri čemu su vrednosti poznate do 50-tog harmonika, obzirom da standard IEC 61000 ne uzima u obzir vrednosti harmonika iznad 50-tog reda. Harmonijski strujni spektar je dodeljen svim vetroagregatima koji se nalaze u sklopu analizirane vetroelektrane.

U samom softveru definisanje ovih vrednosti je predviđeno kreiranjem komponente *.TypHmccur* koju je potrebno definisati u delu projekta *Equipment Types*. Na slici Sl. 2-2 prikazana je komponenta *.TypHmccur* u koju je potrebno uneti podatke o harmonijskom strujnom spektru. Ova komponenta je dodeljena svim vetroagregatima u sklopu vetroelektrane.

Harmonic Sources - Equipment Type Library\Harmonici Struja TypHmccur

Name:

Type of Harmonic Sources:

☐ Balanced, Phase Correct

☐ Unbalanced, Phase Correct

☒ IEC 61000

Basic Data

Description

Integer Harmonics:

	I_h/I %
f/fn=2	0.63
f/fn=3	0.27
f/fn=4	0.36
f/fn=5	0.42
f/fn=6	1.05
f/fn=7	0.33
f/fn=8	0.65
f/fn=9	0.08
f/fn=10	0.09
f/fn=11	0.16
f/fn=12	0.04
f/fn=13	0.14
f/fn=14	0.07

Non-Integer Harmonics:

Harmonic Order	I_h/I %
1	0.

Sl. 2-2: Prikaz komponente *.TypHmccur* u kojoj se definiše harmonijski strujni spektar

3 ZAHTEVI OPERATORA PRENOSNOG SISTEMA ZA KVALITETOM ELEKTRIČNE ENERGIJE

Na Sl. 3-1 prikazana je tabela u kojoj su definisani limiti harmonika napona za svaki čvor na prenosnoj mreži od strane operatora prenosnog sistema EMS AD [2]. Analizirana vetroelektrana mora ispoštovati ove limite. Limiti su definisani do 50-tog reda i poređenje stvarnih vrednosti emisije vetroelektrane vrši se prema ovim limitima. Planski nivo efektivnih vrednosti pojedinačnih viših harmonika napona ne sme u 95% merenja 10-minutnih intervala prelaziti vrednosti definisane u ovoj tabeli.

Vrednosti sa Sl. 3-1 odnose se na vrednosti pojedinačnih viših harmonika napona do 50-tog reda. Vrednosti totalne harmonijske distorzije napona se porede sa vrednostima iz standarda koji se mogu naći u dokumentu [2]. U normalnim pogonskim uslovima, ukupna harmonijska distorzija napona THD u prenosnoj mreži ne sme prelaziti vrednost od 3%.

Непарни хармоници, недељиви са 3		Непарни хармоници, дељиви са 3		Парни хармоници	
Ред вишег хармоника h	Виши хармоник напона [%]	Ред вишег хармоника h	Виши хармоник напона [%]	Ред вишег хармоника h	Виши хармоник напона [%]
5	2	3	2	2	1,4
7	2	9	1	4	0,8
11	1,5	15	0,3	6	0,4
13	1,5	21	0,2	8	0,4
$17 \leq h \leq 49$	$1,2 \cdot 17/h$	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,19 \cdot 10/h + 0,16$

Sl. 3-1: Planski nivo efektivnih vrednosti pojedinačnih viših harmonika napona[2]

4 ANALIZA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju će biti prikazana analiza kvaliteta električne energije za modelovani vetropark, kao i uticaj reaktivne kompenzacije na istu uz predlaganje različitih pristupa modelovanja i korektivnih mera.

Do harmonijske rezonanse dolazi kada su u mreži prisutni i kapacitivni i induktivni elementi što je uvek slučaj. Harmonijska rezonansa rezultuje pojačanjem harmonika napona i distorzijom struje. Vrednost pojačanja primarno zavisi od količine rezistivnog prigušenja prisutnog u sistemu. Iz ovoga sledi da je za harmonijske studije neophodno precizno poznavanje rezistivnih elemenata prisutnih u sistemu.

Određena vrednost harmonika napona i struje može biti neprihvatljiva što može rezultovati oštećenjima opreme, njenim lošim radom, skraćanjem životnog veka ili pojavom nekih tipova smetnji (flikeri i primetno zvučno zagađenje).

Paralelna rezonansa je česta pri povezivanju otočne kapacitivne kompenzacije koja se povezuje na delove mreže na niskom ili srednjem naponu. Postoji mogućnost ulaska čisto kapacitivne kompenzacije u rezonanciju sa induktansom transformatora.

4.1 Modelovanje prenosne mreže

Za posmatranu vetroelektranu ekvivalent jake mreže je formiran na osnovu regionalnog modela za 2025. godinu korišćenjem tipičnih vrednosti trolnog kratkog spoja i Tevenenove impedanse za sabirnice na naponskom nivou 220 kV, kao što je prikazano u Tab. 4-1. Za reprezentativne režime je uzet režim apsolutnog minimuma, jer je on kritičniji sa aspekta kvaliteta električne energije, upravo iz razloga manje snage trolnog kratkog spoja na mestu priključka na prenosnu mrežu.

Tab. 4-1: Parametri ekvivalenta jake mreže

Naponski nivo [kV]	Režim apsolutnog minimuma	
	Ssc3 [MVA]	R _{TH} [Ω]
220	2780.47	17.407

4.2 Opis metodologije

Kako bi se analizirao uticaj predmetne vetroelektrane na kvalitet električne energije u prenosnoj mreži, napravljen je simulacioni model u programskom paketu *DIGSILENT PowerFactory* na osnovu izabranih tipičnih vrednosti zastupljenosti određenih reda harmonika. Softver je kompaktilan sa nekoliko poznatih grupa standarda, uključujući i IEC 61400-21, prema kojem su uzeta i tipična merenja vezana za opremu sa stanovišta kvaliteta električne energije. Tokom vršenja proračuna, generatori su modelovani kao idealni Nortonovi strujni izvori (najkritičniji slučaj sa stanovišta injektiranja harmonika).

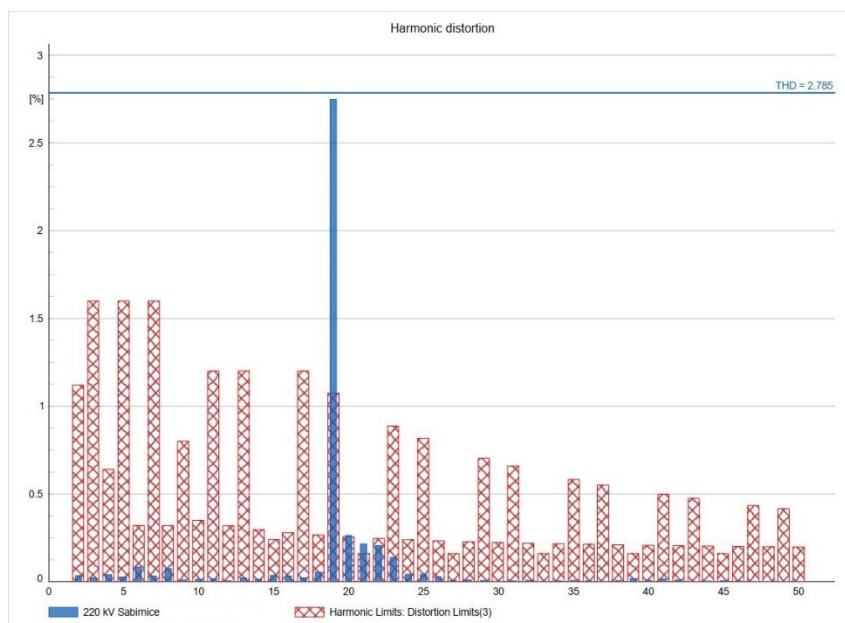
Analizirana su tri pristupa u modelovanju:

- Harmonijska analiza kvaliteta električne energije bez modelovanja frekvencijske zavisnosti elemenata elektrane.
- Harmonijska analiza kvaliteta električne energije sa uvažavanjem frekvencijske zavisnosti elemenata elektrane.
- Harmonijska analiza kvaliteta električne energije bez modelovanja frekvencijske zavisnosti elemenata mreže uz primenu RLC filtra umesto čisto reaktivne kompenzacije.

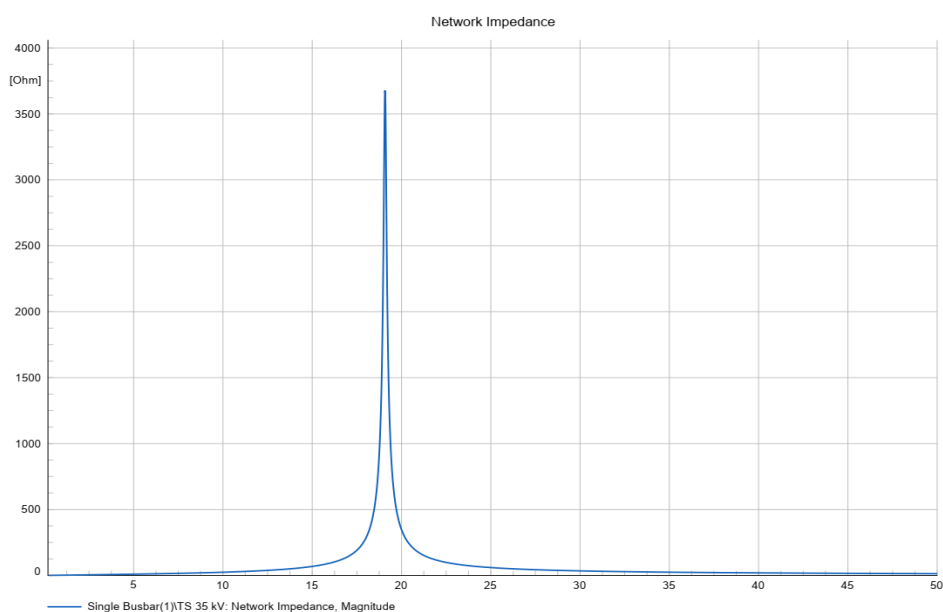
Pravilnik o Radu koji izdaje operator prenosnog sistema definiše dozvoljene granice za svaki pojedinačni harmonik koje moraju biti ispoštovane u tački priključenja vetroparka. Dozvoljene procentualne vrednosti viših strujnih harmonika koje ne smeju biti narušene su definisane u skladu sa Pravilima o Radu Prenosnog Sistema Republike Srbije. U sprovedenim analizama, radi lakše opservabilnosti pomenuti spektar ograničenja nivoa pojedinih harmonika je prikazan crvenom bojom na graficima, dok je doprinos harmonicima napona u tački priključenja prikazan plavom bojom.

4.3 Harmonijske analize bez uvažavanja frekvencijske zavisnosti

Na **Error! Reference source not found.** Sl. 4-1 prikazani su harmonici napona u tački priključenja za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti i bez kompenzacije, dok je na Sl. 4-2 dat prikaz impedanse gledane iz tačke priključka za navedeni režim. Sa navedenih slika se može videti da dolazi do probijanja limita 19-og harmonika upravo iz razloga što u okolini 19-og harmonika dolazi do pojave paralelne rezonanse, što je posledica vrednosti elemenata vetroparka, kao i snage kratkog spoja u tački priključka. Vidi se da vrednost THD faktora za ovu analizu iznosi 2.785.

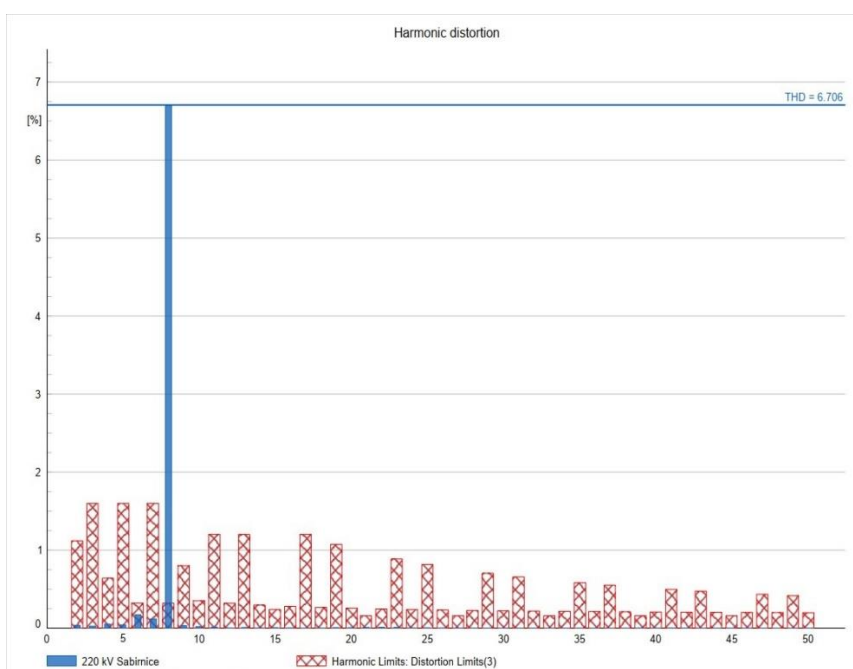


Sl. 4-1: Harmonijska distorzija za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti i bez kompenzacije

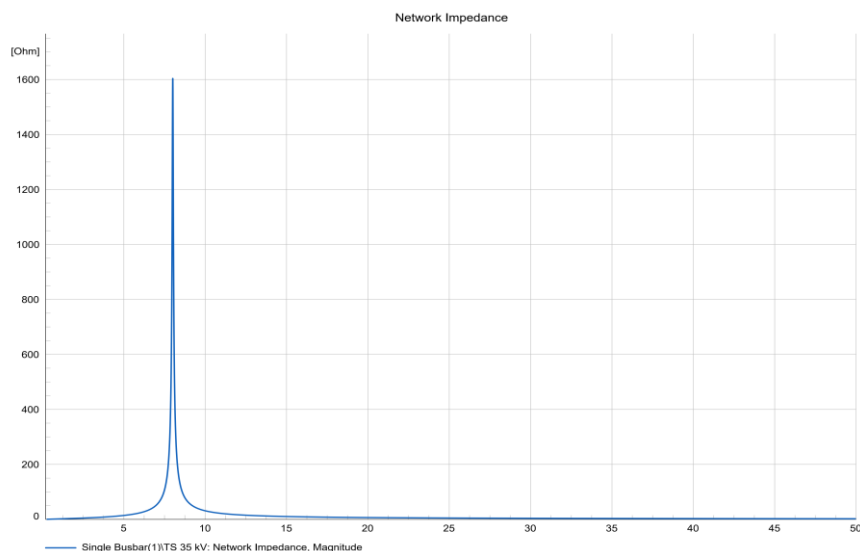


Sl. 4-2: Prikaz impedanse gledane iz tačke priključenja za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti i bez kompenzacije

Na slici **Error! Reference source not found.**Sl. 4-3 prikazane su vrednosti harmonika napona u tački priključenja za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti sa dodatom čisto kapacitivnom kompenzacijom, dok je na slici Sl. 4-4, dat prikaz impedanse gledane iz tačke priključka za navedeni režim. Sa navedenih slika se može videti da dolazi do probijanja limita 7-og harmonika upravo iz razloga što u okolini 7-og harmonika dolazi do pojave paralelne rezonanse, što je posledica vrednosti karakteristika elemenata vetroparka, snage kratkog spoja u tački priključka, kao i dodatke čisto kapacitivne kompenzacije u vidu kondenzatorske baterije. Poredeći režim sa kondenzatorskom baterijom i režim bez kondenzatorske baterije vidi se da prisustvo kondenzatorske baterije pomera tj. smanjuje red harmonika na kome se javlja paralelna rezonansa, ali da povećava ukupni THD factor na vrednost od 6.706.

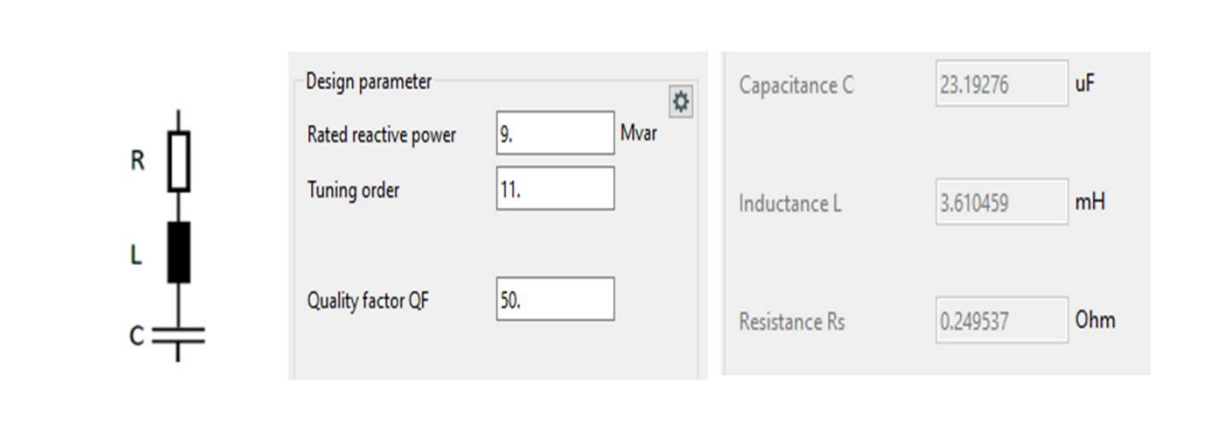


Sl. 4-3: Harmonijska distorzija za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti sa dodatom čisto kapacitivnom kompenzacijom 9 MVar



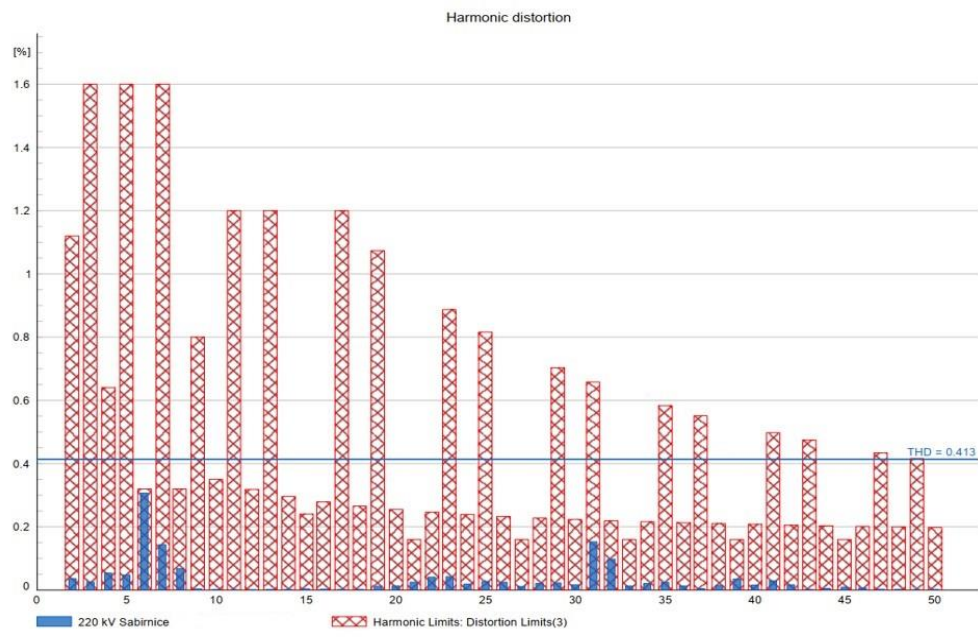
Sl. 4-4: Prikaz impedanse gledane iz tačke priključenja za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti sa dodatom čisto kapacitivnom kompenzacijom 9 MVar

Analizom prethodnih slika se zaključuje da dodavanje čisto reaktivne kompenzacije dodatno pogoršava kvalitet električne energije i da je potrebno izvršiti reaktivnu kompenzaciju u formi RLC filtra koji će obavljati i funkciju reaktivnog kompenzatora i filtra harmonika. Na Sl. 4-5 su prikazane karakteristike primenjenog RLC filtra. Podešena je kompenzacija 11-og harmonika iz razloga što filter u sebi ima kapacitivnost, induktivnost i otpor, pa je utvrđeno da se za ovakvo podešenje dobijaju najbolji rezultati sa stanovišta kvaliteta električne energije.

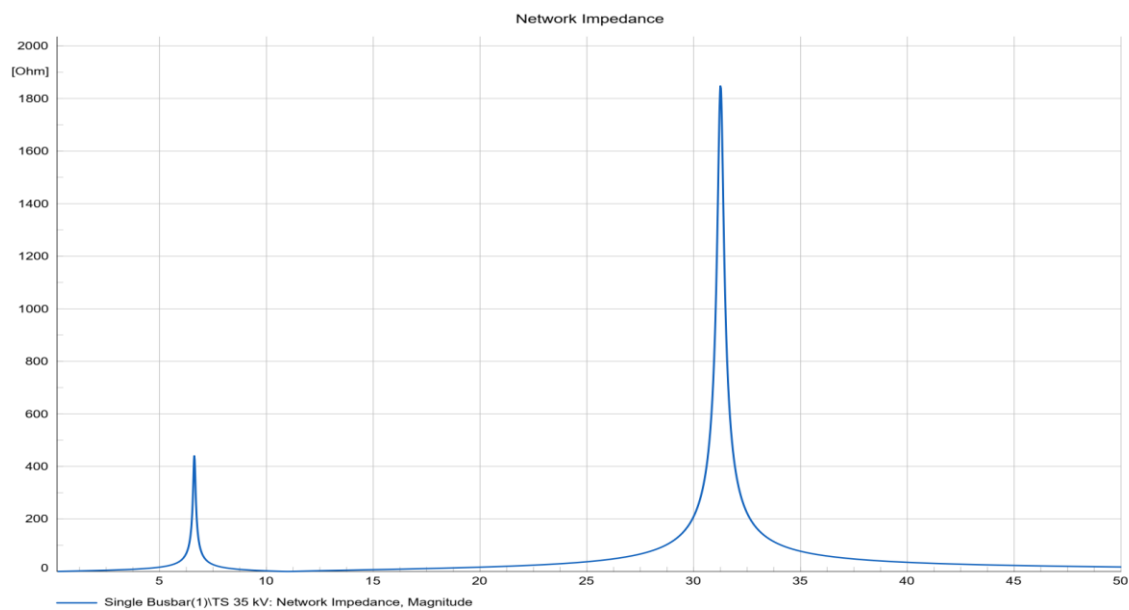


Sl. 4-5: Parametri RLC filtra

Na slici **Error! Reference source not found.** Sl. 4-6 prikazani su harmonici napona u tački priključenja za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti sa dodatim RLC filtrom, dok je na slici Sl. 4-7 dat prikaz impedanse gledane iz tačke priključka za navedeni režim. Sa navedenih slika može se videti da ne dolazi do probijanja nijednog limita harmonika, kao i da RLC filter uspešno otklanja prisustvo harmonika za odgovarajuću podešenu vrednost, ali da nema mogućnost otklanjanja ostalih harmonika jer njegovo prisustvo dovodi do pojave paralelne rezonanse oko 31-og harmonika. THD faktor je sada smanjen na vrednost od 0.413.



Sl. 4-6: : Harmonijska distorzija za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti sa RLC filtrom u funkciji kompenzacije



Sl. 4-7: Prikaz impedanse gledane iz tačke priključenja za režim apsolutnog minimuma bez uvažene frekvencijske zavisnosti sa RLC filtrom u funkciji kompenzacije

4.4 Harmonijska analiza sa uvažavanjem frekvencijske zavisnosti elemenata vetroparka

Harmonijska analiza u ovom potpoglavlju izvršena je korišćenjem alata u sklopu programskog paketa *DlgSILENT Powerfactory*. Otpornost i kapacitivnost za različite elemente elektrane modelovane su uz uvažavanje frekvencijske zavisnosti, tj. „frekvencijskih karakteristika” za svaki element modelovane mreže.

Formule za uvažavanje frekvencijske zavisnosti uzete su iz [3] na način što su otpornost i induktivnost elemenata modelovane prema sledećoj formuli:

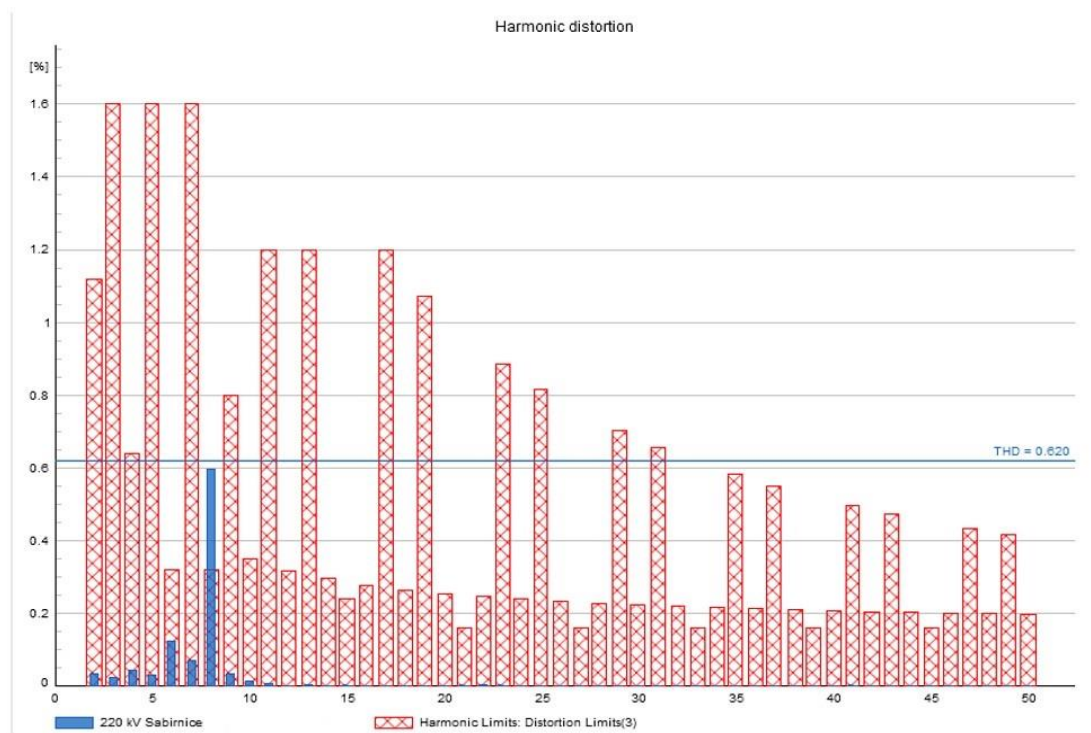
$$y(f_h) = (1 - a) + a \times \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^b \quad (1)$$

Gde a i b uzimaju sledeće vrednosti u zavisnosti od elementa:

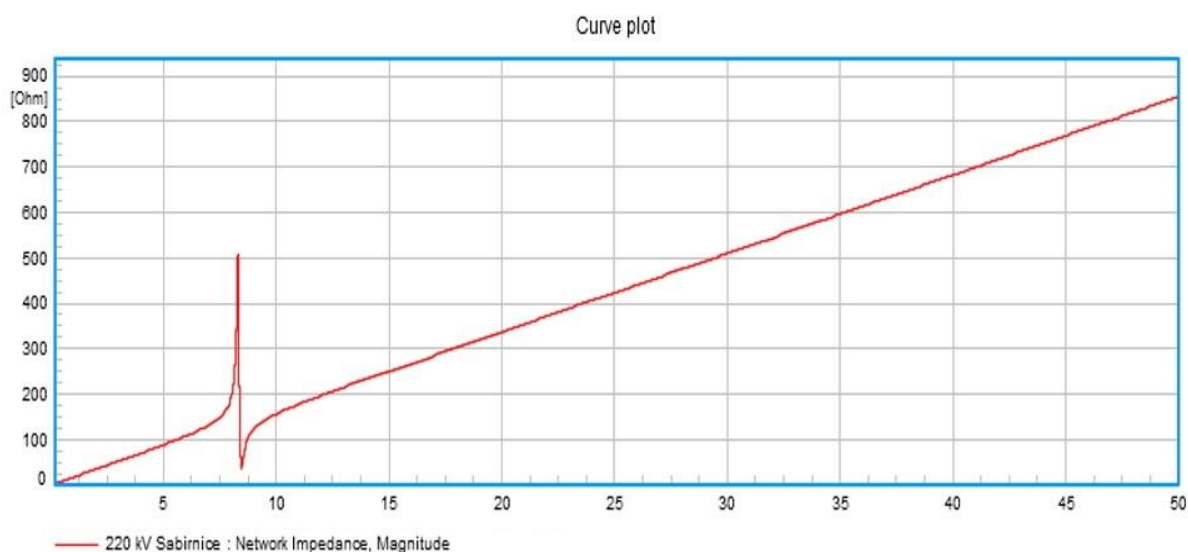
Tab. 4-2: Parametri frekvencijske zavisnosti za otpor i induktivnost elemenata [3]

Komponenta	a	b
Vetrogenerator	1	0.5
Jaka mreža	1	0.5
Transformator	1	0.9
Vod	1	0.3
Kabl	1	0.5

Na slici Sl. 4-8 prikazani su harmonici napona u tački priključenja za režim apsolutnog minimuma sa uvaženom frekvencijskom zavisnošću i bez kompenzacije, dok je na slici Sl. 4-9 dat prikaz impedanse gledane iz tačke priključka za navedeni režim. Sa navedenih slika može se videti da dolazi do probijanja limita 7-og harmonika usled povećane vrednosti impedanse gledane iz tačke priključenja na tom redu harmonika.

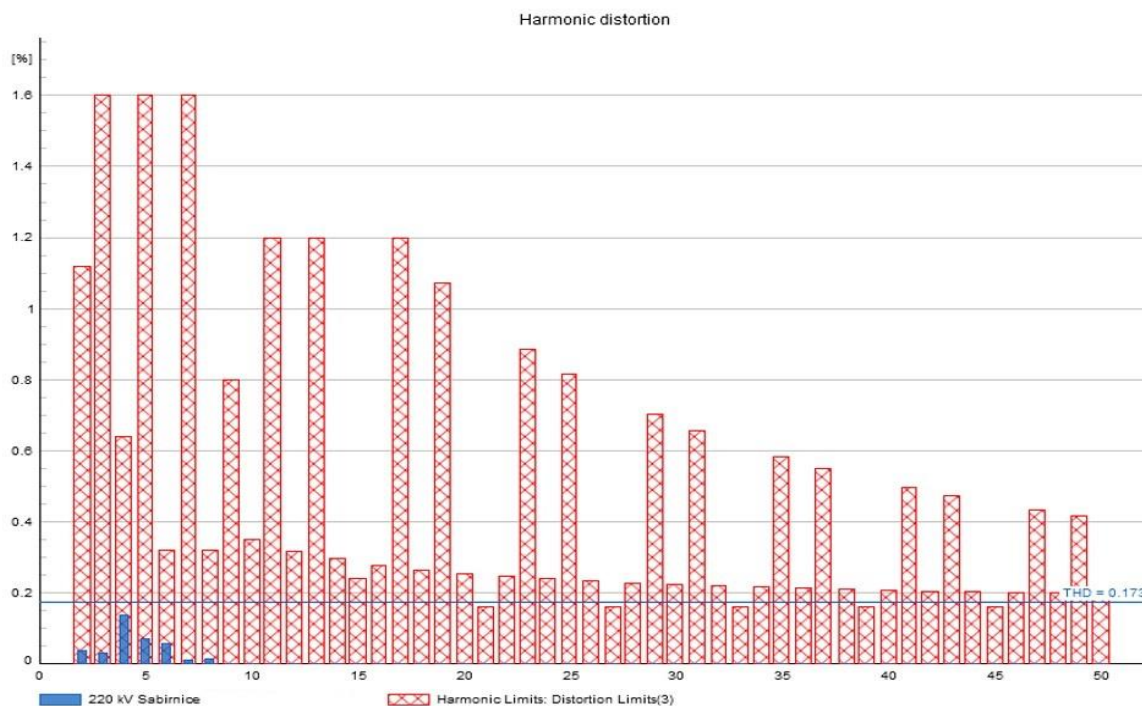


Sl. 4-8: Harmonijska distorzija za režim apsolutnog minimuma sa uvaženom frekvencijskom zavisnosti bez kompenzacije

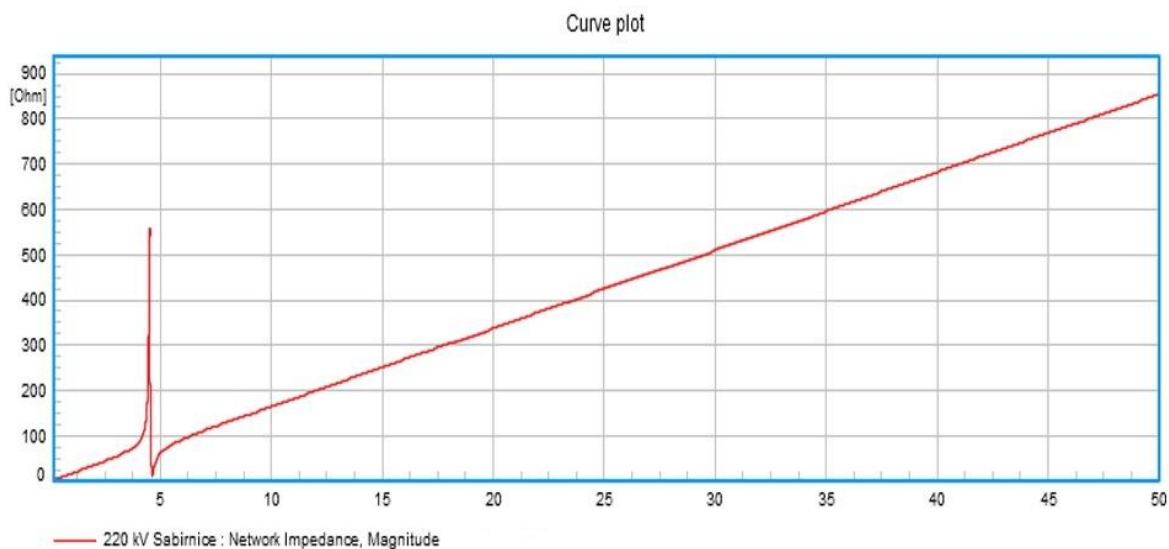


Sl. 4-9: Prikaz impedanse gledane iz tačke priključenja za režim apsolutnog minimuma sa uvaženom frekvencijskom zavisnošću bez kompenzacije

Na slici Sl. 4-10 prikazani su harmonici napona u tački priključenja za režim apsolutnog minimuma sa uvaženom frekvencijskom zavisnošću i sa kompenzacijom, dok je na slici Sl. 4-11 dat prikaz impedanse gledane iz tačke priključenja za navedeni režim. Sa navedenih slika može se videti da ne dolazi do probijanja limita harmonika. Takođe se vidi da prilikom ugradnje kompenzacije u vidu kondenzatorske baterije dolazi do pomeranja ulevo karakteristike impedanse gledane iz tačke priključka na prenosnu mrežu.



Sl. 4-10: : Harmonijska distorzija za režim apsolutnog minimuma sa uvaženom frekvencijskom zavisnosti sa kapacitivnom kompenzacijom 9 MVar



Sl. 4-11: Prikaz impedanse gledane iz tačke priključenja za režim apsolutnog minimuma sa uvaženom frekvencijskom zavisnošću sa kompenzacijom

Sa svih prikazanih grafika može se videti da prilikom uvažavanja frekvencijske zavisnosti elemenata vetroparka dolazi do drugačijih vrednosti impedanse gledane iz tačke priključenja, a samim tim i do drugačijih vrednosti harmonika napona u tački priključenja na prenosnu mrežu. Iz svega navedenog, vidi se potreba za uvažavanjem frekvencijske zavisnosti, kako bi se dobila realnija slika parametara kvaliteta električne energije u tački priključenja na prenosnu mrežu.

5 ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je uticaj reaktivne kompenzacije na kvalitet električne energije kao i primena odgovarajućih korektivnih mera u cilju poboljšanja kvaliteta električne energije na primeru vetroelektrane priključene na prenosni sistem. Izvršene su provere ispunjenosti zahteva koji propisuje nadležni operator prenosnog sistema. Analizirana je provera ispunjenosti zadovoljavajućih granica limita harmonika napona, kao i uticaj koji reaktivna kompenzacija u vidu kondenzatorske baterije ima na kvalitet i predložene su korektivne mere u cilju poboljšanja kvaliteta električne energije.

Prilikom provere ispunjenosti odgovarajućih limita harmonika napona analiziran je uticaj koji ugradnja kondenzatorske baterije ima na parametre kvaliteta električne energije u odnosu na slučaj bez nje.

Pokazano je da dolazi do narušenja zahteva za kvalitetom električne energije sa i bez kondenzatorske baterije (bez modelovanja frekvencijske zavisnosti elemenata) usled pojave paralelne rezonanse gledano iz tačke priključenja. Uočeno je da ugradnja kondenzatorske baterije utiče na pomeranje reda harmonika pri kojem se javlja paralelna rezonansa.

Ugradnja RLC filtra pokazala se kao dobro rešenje, obzirom da je dovela do dobijanja boljih parametara kvaliteta električne energije i otklanjanja paralelne rezonanse na kritičnom harmoniku.

Analiziran je i uticaj na vrednosti harmonika uz uvažavanje frekvencijskih karakteristika svakog elementa modelovane mreže. Pokazano je da prilikom uvažavanja ovih karakteristika dolazi do znatnog smanjenja vrednosti harmonika u tački priključenja (bez kompenzacije), a da uvođenje kompenzacije uz uvažavanje frekvencijske zavisnosti dovodi do dodatnog poboljšanja kvaliteta u odnosu na slučaj bez nje.

Provera parametara kvaliteta električne energije predstavlja indikativnu procenu mogućih problema koji će se javiti prilikom priključenja vetroelektrane na prenosni sistem. Potrebno je detaljnije izvršiti proveru ovih parametara u probnom radu elektrane i na osnovu tih vrednosti dati konačne preporuke. Dalja istraživanja u ovoj oblasti mogu se bazirati na uvažavanju frekvencijske zavisnosti uz satnu procenu parametara kvaliteta električne energije u tački priključenja. Za ovu analizu potrebno je poznavati ili ceo model ostatka prenosne mreže ili vrednosti trolnog kratkog spoja u tački priključenja za svaki sat. Takođe, potrebno je poznavati i satno generisanje snage od strane vetroelektrane, obzirom da vrednosti strujnih harmonika koju injektira vetroagregat zavise od aktivne snage koju on injektira. Ovo bi dalo realniju sliku parametara kvaliteta i samo u slučaju prekoračenja dozvoljenih limita harmonika više od 5% u toku godine pristupilo bi se razmatranju ugradnje filtra i njegovom odabi

6 LITERATURA

- [1] DIgSILENT, PowerFactory User Manual, 2022.
- [2] <https://ems.rs/wp-content/uploads/2023/11/Pravila-o-radu-prenosnog-sistema-07.11.2023-1.pdf> [Online]
- [3] R. Zheng, M. Bollen, and Luleå University of Technology, Skellefteå Electric Power Systems, “Harmonic Resonances Associated with Wind Farms,” report, 2010. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:996973/FULLTEXT01.pdf>