

USREDNJNI MODEL FN INVERTORA SA NAPREDNIM UPRAVLJANJEM**AVERAGED MODEL OF PV INVERTER WITH ADVANCED CONTROL**Jovana Marković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je prikazan usrednjeni model FN invertora sa naprednim upravljanjem. Prikazani su načini modelovanja kao i rezultati simulacije modela u realnom vremenu koristeći Typhoon HIL uređaj.

Ključne reči: Usrednjeni model, FN inverter, Simulacija sistema, Modelovanje u realnom vremenu

Abstract – In this paper averaged model of a PV inverter with advanced control is explained. Methods of modelling, as well as simulation results in real-time using the Typhoon HIL simulator are given.

Keywords: Power Electronics, Averaged model, PV inverter, Real time simulation.

1. UVOD

Prilikom modelovanja i kontrole nekog ispravljača obično je praksa da se krene od usrednjenog modela i da se u tom modelu izvrši strujna i naponska regulacija, da se odrede parametri regulacije, kao i da se postave odgovarajući filteri, da bismo te parametre kasnije mogli primeniti na prekidački model. Ono što je prednost usrednjenog modela u odnosu na prekidački jeste:

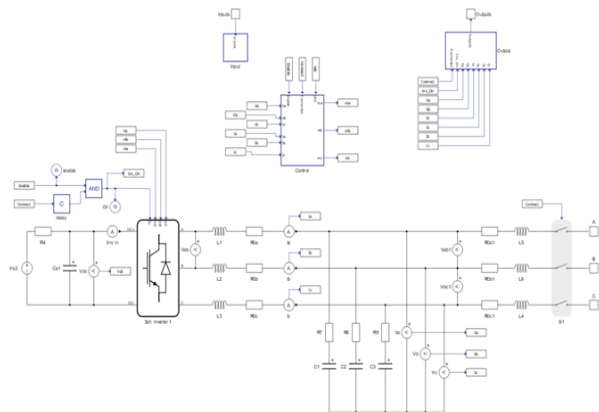
- Dosta brža simulacija sa stanovišta kompjajlera,
- Jeftinija u odnosu na prekidački model (prekidačke komponente su jako skupe),
- Talasni oblici struje su čistiji u odnosu na prekidački model
- Ne gubi se na kvalitetu rezultata simulacije

U ovom radu je predstavljen metod usrednjavanja, kao i verifikacija rezultata usrednjenog u odnosu na prekidački model.

2. USREDNJNI MODEL FN INVERTORA

U današnjoj distributivnoj mreži i mikromreži povezani su sve više i više pametnih pretvarača - konvertora. Razvijanje i testiranje kontrole za ovaj veliki i složeni sistem zahteva nove simulacijske alate. Detaljna simulacija pretvarača je skupa, dok se sa drugim, usrednjenim, načinom modelovanja mogu postići dovoljno dobri rezultati. Cilj ovog rada je istražiti mogućnost zamene prekidačkog modela pretvarača sa naponom iza reaktanse i/ili kontrolisanim izvorom napajanja. Prilikom ovog postupka kontrola treba da bude

sa minimalnim brojem izmena. Sastavni deo ovakvih kontrolera je prekidač, koji je prilično skup, cilj ovog rada je bio da se ovaj prekidač zameni sa kontrolisanim naponskim izvorima pri čemu bi kontrola trebalo da bude nepromenjena.



Slika 1. Izgled modela sa prekidačkim upravljanjem [1].

Model se sastoji od DC dela sa krajnje leve strane, zatim invertora, koji je ovde najbitnija komponenta, LCL filtra i na kraju imamo mrežu. Jednosmerni deo čine kondenzator i naponski izvor, kao i merač napona i struje. Zadatak je bio da se zameni ovaj inverter sa kontrolisanim naponskim signalima i u zavisnosti od modela da izmodeluje DC deo prilagodjen tom primeru, a da se pri tome kontrola ne menja. Modelovanje ovog pretvarača sastoji se iz četiri koraka, koja su navedena u nastavku:

- Ispitati kako kontrolom međufaznih napona V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} može da se utiče na mrežne struje u stacionarnom stanju. U ovom delu su ispisane jednačine Kirhofovih zakona. Za rešavanje ovih, kao i svih ostalih jednačina, kao pomoć korišćen je Matlab.
- Modelovanje LCL filtra
- Treći korak je dinamika sistema
- Modelovanje DC linka

2.1. Karakteristike FN invertora

Invertori su sistemi energetske elektronike, koji jednosmerni napon ili struju pretvaraju u naizmenični napon ili struju. Prema prirodi ulazne promenljive mogu biti naponski (*VSI - voltage source inverters*) ili strujni (*CSI - current source inverters*) invertori. Prema broju faznih priključaka na izlazu, invertori su najčešće monofazni ili trofazni, ali za pogon motora postoje

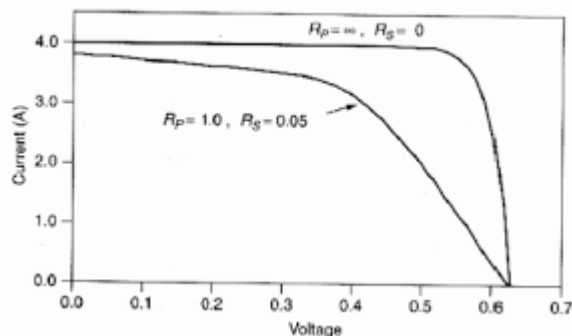
NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Vladimir Katić, red.prof.

invertori i sa drugačijim brojem faza. Od invertora se zahteva da konverziju energije ostvare sa visokim koeficijentom korisnog dejstva, pa su na raspolaganju za sintezu invertora prekidači i reaktivni elementi. Izlazna veličina često treba da bude sinusoidalnog talasnog oblika, ali ponekad to nije slučaj. Sinusoidalni talasni oblik nije moguće bez disipacije stvoriti od napona ili struja konstantnih u vremenu, pa se zahtev za sinusoidalnim oblikom svodi na sinusoidalni oblik srednje vrednosti izlazne veličine tokom periode prekidanja. Stoga se usrednjavanje često koristiti prilikom analize invertora, što na nivou periode prekidanja, što na nivou periode modulišućeg signala, koja je obično znatno veća od periode prekidanja, pa se ovo usrednjavanje svodi na određivanje jednosmerne komponente DC napona [1]. Solarni invertori pretvaraju jednosmerni napon solarnih modula u naizmenični napon odgovarajuće faze i frekvencije sinhronizovan sa naponom mreže. Invertori se sa stanovišta regulacije dele na:

- Naponsko kontrolisani
- Strujno kontrolisani

Kada je reč o FN invertorima uglavnom se predstavljaju UI krivom iz koje se mogu pročitati podaci za modelovanje ovakve vrste invertora.



Slika 2. UI karakteristika FN panela [2]

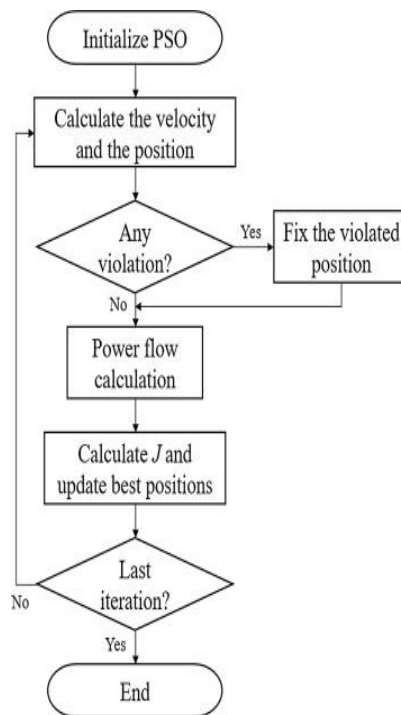
2.2. Uslovi priključenja FN invertora na mrežu

Grid kod podrazumeva uslove priključenja FN invertora na mrežu. U Nemačkoj je poznat BDEW standard, dok u Americi UL1741. Što se tiče BDEW kod njih je kriterijum sledeći: Ako je deo relevantne srednje naponske ili prenosne mreže višeg nivoa privremeno preopterećen, operator distribucijske mreže bi trebao biti sposoban da ograniči moć decentralizovanih postrojenja za proizvodnju električne energije u većem stepenu od 10% P_{nom} . Da bi to uradio, operater obično šalje kontrolni signal koji se obrađuje shodno tome i mora se implementirati kao ograničenje aktivne snage (tipično 60, 30 ili nulti procenat nominalne snage). Odgovarajuće potrebno ograničenje mora izvršiti inverter u roku od 60 sekundi. Frekvencija mreže naizmenične struje je konstantna u strogim granicama, u Evropi tačno 50 Hz. Napon se mora držati unutar određenih granica za sve nivoe mreže - posebno u distributivnoj mreži. Međutim, povećanje napona može se desiti tamo gde imamo povećanje aktivne snage na nisko naponskim i srednje naponskim nivoima, koji čine vezu dodatnih energetskih postrojenja više teško ili nemoguće. Pored toga, postojeća

fazna smena u procentima reaktivne snage u mreži smanjuje svoj prenosni kapaciteti povećava akumulisane gubitke prenosa. Tipični uzroci faznih smena su transformatori, veliki motori ili duže kablovske rute. Invertori sa reaktivnom snagom mogu pomoći nadoknađuje ravnotežu reaktivne snage u mreži ili da drže napon stabilan na mreži, da bi se obezbedio kvalitet napona u skladu sa standardom EN 50160 na taj način. Shodno tome, regulativa za srednji napon zahteva proizvodnju energije tako da se mogu snabdevati ili apsorbovati obe, i aktivna i reaktivna snaga. Operator mreže može zahtevati faktor snage $\cos(\varphi)$ između 0.95 i 1 [2].

3. LCL FILTER

Filter je neophodno staviti između VSI invertora i mreže, nametajući struju performanse za kontrolu povratne sprege i smanjenje harmonika izlazne struje. Može se koristiti jednostavan filter koji se sastoji od samo jednog kalema povezanog na red, ali harmonično slabljenje nije izraženo. Uglavnom se koristi LCL filter visokog reda konvencionalnog L-filtera za izravnavanje izlaznih struja iz VSI. LCL filter postiže veće slabljenje uz uštedu troškova, s obzirom na ukupnu težinu i smanjuje veličine komponenti. LCL filteri su korisni se u mrežnim priključcima i PWM ispravljačima, jer smanjuju količinu trenutne distorzija ubačene u komunalnu mrežu. Da bi se dizajnirao efikasan LCL filter, potrebno je imati odgovarajući matematički model filtera. Na slici 3. prikazan je algoritam filtera koji je korišćen u ovom radu. Prilikom izrade FN invertora sa naprednim upravljanjem za potrebe ovog rada, pasivno rešenje za prigušivanje je usvojeno, ali i druga rešenja se mogu aktivno primenjivati [3].



Slika 3. Algoritam LCL filtra [4]

4. MODELOVANJE DC LINKA

DC link je zapravo samo deo između ispravljača i invertora u opremi za konverziju energije u čvrstom stanju. Svrha DC konverzije je zapravo ta da nam je lakše upravljati DC talasima, koji su u suštini ravna linija nego talasima, koji su u obliku sinusoide. Neka definicija DC linka bila bi sledeća: DC link je metoda koja služi za povezivanje dva AC sistema koji imaju različite napone i frekvencije preko srednje DC faze. Nakon što se snaga konvertuje u DC, ona se čuva u kondenzatoru dok se konvertuje u AC [5]. Karakteristike kondenzatora DC linka su:

- visok napon (veći od 400 V DC),
- manji faktor disipacije,
- nisku induktivnost.
- formule za energiju.

DC link u ovom modelu je iz modelovan preko formule za energiju:

$$\frac{dW}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2} C * V_{dc}^2 \quad (2)$$

$$i = C * \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Imamo dve snage, snagu sa FN panela i snagu mreže koje ulaze u sabirač, zatim imamo integrator koji je zamenio kondenzator i dalje preko formule za energiju smo došli do Vdc napona, koji dalje ulazi u kontrolu koja je ostala nepromenjena.

5. REZULTATI SIMULACIJE

U tabeli 1. prikazani su parametri koji su korišćeni prilikom modelovanja usrednjenog modela FN invertora sa unapredjenom kontrolom.

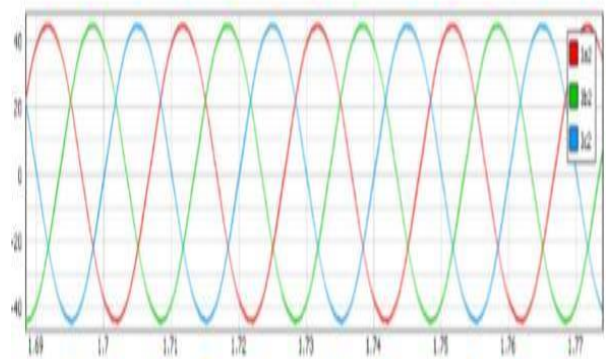
Tabela 1. Parametri simulacije

Nominalni napon	480 [V]
Nominalna snaga	5e6 [VA]
Frekvencija	60 [Hz]
Prekidačka frekvencija	10000 [Hz]
Napon DC linka	800 [V]
Površina panela	5556 [m ²]
Efikasnost panela	20 [%]
Korak simulacije	100e-6 [s]

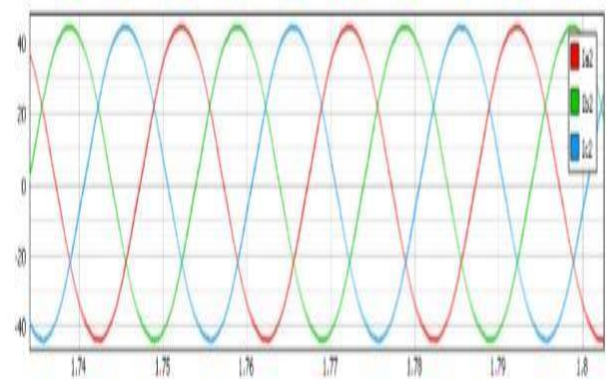
5.1. Poređenje rezultata simulacije u usrednjenom i u prekidačkom modelu

Kada uporedimo rezultate simulacije u usrednjenom modelu sa rezultatima iz prekidačkog modela vidimo da kada prekidače, koji su skupi i unose šumove u talasni oblik, zamenimo kontrolisanim naponskim izvorima, dobijamo potpunu istu funkcionalnost invertora. To vidimo iz cinjenice da smo pri istoj kontroli dobili potpuno iste amplitude u oba modela. Takođe vreme

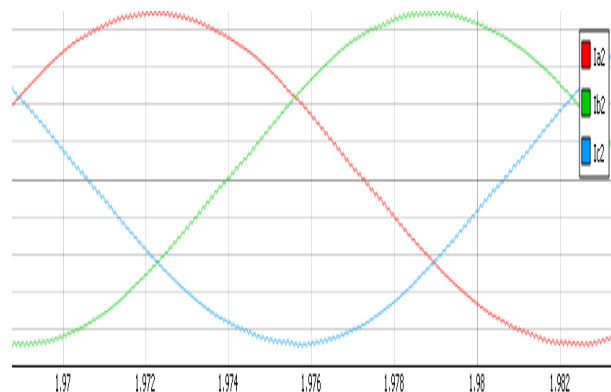
potrebno za izvršavanje simulacije znatno je redukovano u usrednjenom modelu u odnosu na prekidački model.



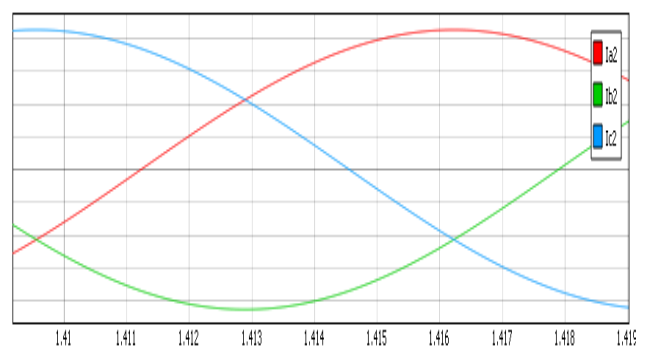
Slika 4. Izgled faznih struja u usrednjenom modelu



Slika 5. Izgled faznih struja u usrednjenom modelu



Slika 6. Uvećan prikaz talasnih oblika faznih struja u prekidačkom modelu



Slika 7. Uvećan prikaz talasnih oblika faznih struja u usrednjenom modelu

6. ZAKLJUČAK

Rad opisuje način modelovanja i simulacije u realnom vremenu usrednjenog FN invertora. U ovom radu su objašnjene osnove FN invertora, kao i simulacija u realnom vremenu. Opisane su ostale topologije i načini rada, kao i mane i prednosti svake. Rečeno je nešto više o samom Virtual HIL hardveru i softveru kao i njihovim mogućnostima. Testiranje i simulacija u realnom vremenu postaje sve bitnija u razvoju svakog projekta jer omogućuje bolje saznanje i ponašanje samog sistema i pre njegove implementacije u realnom sistemu. Ovaj rad pokazuje mogućnosti PV invertora kao i njeno priključenje na mrežu. Simulacija nam omogućava da sa velikom preciznosti pratimo vrednosti svih važnih signala.

7. LITERATURA

- [1] <http://www.cei.upm.es/master-on-industrial-electronics/master-theses/>
- [2] J. Kolar and T. Friedli, "The essence of three-phase pfc rectifier systems part i," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, no. 1, pp. 176– 198, Jan2013
- [3] https://www.google.com/search?q=uv+kriva+pv+panela&rlz=1C1CHZL_enRS836RS836&oq=uv+kriva+p&aqs=chrome..69i57j69i59.6506j0j9&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- [4] https://standardscatalog.ul.com/standards/en/standard_1741_2
- [5] https://www.google.com/search?q=algoritam+lcl+filtera&rlz=1C1CHBF_enRS839RS839&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=QKxxKpCsM9OM%253A%252CHL7PVmCHI5BkM%252C_&vet=1&us

Kratka biografija



Jovana Marković rođena je u Loznici 1994. god. Gimnaziju je završila u Loznici, 2013 god. je upisala Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i tele-komunikacije. Na studijama se opredelila za smer Elektroenergetika Elektroenergetski sistemi i diplomirala 17. 10. 2017. god. Na master studijama se opredelila za smer Distribuirani elektroenergetski resursi.