



Matematički modeli tipova obnovljivih izvora energije



Zagreb, 2018.

Projekt: Integracija vjetroelektrana u elektroenergetski sustava sa smanjenom tromosti

WIND energy integration in Low Inertia Power System - WINDLIPS

Dokument: Matematički modeli tipova obnovljivih izvora energije

Isporuka: 15.2.

Partneri:



Autori:

Igor Kuzle, prof.dr.sc., FER

Matej Krpan, mag.ing., FER

Tomislav Baškarad, mag.ing., FER

Nenad Debrecin, prof.dr.sc., FER

Goran Levačić, dr.sc., HOPS

Boris Avramović, mag.ing., HOPS

Sadržaj

1	Modeliranje vjetroagregata za potrebe dinamičkih simulacija EES-a i sudjelovanje vjetroelektrana u regulaciji frekvencije	8
1.1	Modeliranje vjetroagregata za potrebe dinamičkih simulacija EES-a.....	8
1.1.1	Model vjetra	8
1.1.2	Model rotora.....	10
1.1.3	Mehanički model.....	12
1.1.4	Model generatora.....	13
1.1.5	Model pretvarača i upravljanja.....	15
1.1.6	Model sustava zakreta lopatica	16
1.1.7	Model sustava zaštite	17
1.2	Sudjelovanje vjetroelektrana u regulaciji frekvencije EES-a	18
1.2.1	Inercijski odziv	18
1.2.2	Primarna regulacija frekvencije	25
1.2.3	Sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije	28
2	Modeliranje fotonaponske elektrane	29
2.1	Utjecaj sunčevog zračenja i temperature na parametre FN celije	32

Popis slika

Slika 1: Generalna struktura vjetroagregata	8
Slika 2: Generirani signal brzine vjetra	10
Slika 3: IEC/WECC tip III I tip IV model generatora.....	14
Slika 4: GE tip III I tip IV model generatora	14
Slika 5: Upravljanje električnom snagom vjetrogeneratora: a) tip III: upravljanje rotorskim naponima; b) tip IV: upravljanje naponima pretvarača.....	16
Slika 6: Sustav upravljanja zakretom lopatica	17
Slika 7: Inercijski odziv različitih vrsta vjetroagregata.....	19
Slika 8: Koncept virtualnog inercijskog odziva za tip III/IV	21
Slika 9: Neki upravljački algoritmi za virtualni inercijski odziv [24]	23
Slika 10: Neki virtualni inercijski odzivi: a) izlazna snaga VA; b) mrežna frekvencija.....	24
Slika 11. MPPT krivulja i krivulje rasterećenja	26
Slika 12. Koncept primarne regulacije frekvencije za tip III/IV	27
Slika 13. Primarni frekvencijski odziv VA tipa III/IV za neke načine upravljanja a) promjena izlazne snage VA; b) kut zakreta lopatica	28
Slika 14 Shema idealne FN celije	29
Slika 15 Realna shema FN celije.....	30
Slika 16 Utjecaj serijskog otpora na <i>P-U</i> karakteristiku (lijevo) i <i>I-U</i> karakteristiku (desno) FN panela	31
Slika 17 Utjecaj paralelnog otpora na <i>P-U</i> karakteristiku (lijevo) i <i>I-U</i> karakteristiku (desno) FN panela	32
Slika 18 Utjecaj promjene temperature na <i>P-U</i> karakteristiku (lijevo) i <i>I-U</i> karakteristiku (desno) FN panela	34
Slika 19 Utjecaj promjene sunčevog zračenja na <i>P-U</i> karakteristiku (lijevo) i <i>I-U</i> karakteristiku (desno) FN panela	34

Popis tablica

Tablica 1: Tipične mehaničke konstante vjetroagregata	21
Tablica 2 Parametri 180 W ZED FN panela pri STC [37].....	31

Popis kratica

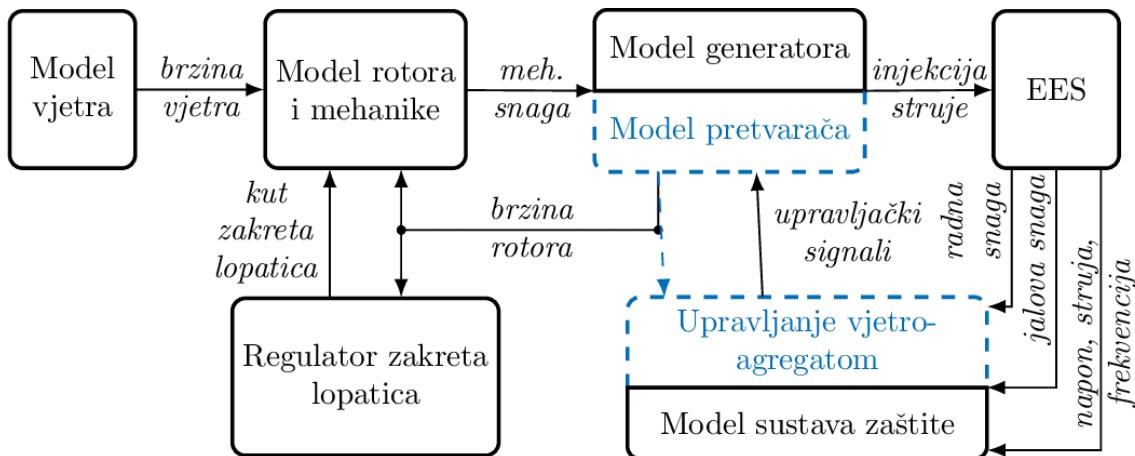
AGKKR	Asinkroni generator s klizno-kolutnim rotorom
AGKR	Asinkroni generator s kaveznim rotorom
CHE	Crpna hidroelektrana
CPS	Crpna stanica
DFIG	<i>Doubly-Fed Induction Generator;</i> Dvostruko-napajani asinkroni generator
EES	Elektroenergetski sustav
ELTO	Elektrana-toplana
ENTSO-E (CE)	<i>European Network of Transmission System Operators for Electricity (Continental Europe)</i>
EU	Europska unija
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
FN	Fotonaponski
FN	Fotonaponske elektrane
FRC	<i>Frequency Restoration Control</i>
GE	General Electric
HE	Hidroelektrana
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava
HVDC	<i>High Voltage Direct Current;</i> Visoki istosmjerni napon
IEC/WECC	<i>International Electrotechnical Commission/Western Electricity Coordinating Council</i>
KTE	Kombinirana termoelektrana
LFSM-O	<i>Limited Frequency Sensitive Mode – Overfrequency</i>
LFSM-U	<i>Limited Frequency Sensitive Mode – Underfrequency</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NE	Nuklearna elektrana
NP	Niskopropusni
OIE	Obnovljivi izvori energije
PPM	<i>Power Park Modules</i>
PSS	<i>Power System Stabilizer;</i> Stabilizator elektroenergetskog sustava

PWM	<i>Pulse-Width Modulation; Pulsno-širinska modulacija</i>
RH	Republika Hrvatska
RHE	Reverzibilna hidroelektrana
ROCOF	<i>Rate-of-change-of-frequency, brzina promjene frekvencije</i>
SG	Sinkroni generator
SGPM	Sinkroni generator s permanentnim magnetima
TE	Termoelektrana
TETO	Termoelektrana-toplana
TS	Transformatorska stanica
TSO	Transmission System Operator; Operator prijenosnog sustava
VA	Vjetroagregat/i
VE	Vjetroelektrana/e
VP	Visokopropusni

1 Modeliranje vjetroagregata za potrebe dinamičkih simulacija EES-a i sudjelovanje vjetroelektrana u regulaciji frekvencije

1.1 Modeliranje vjetroagregata za potrebe dinamičkih simulacija EES-a

Vjetroagregat (VA) je složeni elektromehanički sustav za pretvorbu energije vjetra (*wind energy conversion system*). Generalna struktura VA prikazana je na slici Slika 1, gdje su crnim linijama ilustrirani podsustavi koji su zajednički za sva 4 tipa VA, a plavim isprekidanim linijama podsustavi koji su specifični za VA s promjenjivom brzinom vrtnje (tipovi III i IV). Pojedinačni podsustavi opisani su u nastavku.



Slika 1: Generalna struktura vjetroagregata

1.1.1 Model vjetra

Model vjetra predstavlja izvor signala vjetra koji služi kao ulazna veličina za proračun snage vjetra, odnosno mehaničke snage razvijene na vratilu turbine. Signal brzine vjetra može biti dobiven iz mjerena ili generiran iz matematičkog modela. Matematički model je fleksibilniji i obuhvaća sve karakteristike vjetra te se može prilagoditi prema potrebi, dok to ne mora biti slučaj u slučaju izmjerjenih podataka [1]. Matematički model za generiranje signala brzine vjetra ukratko je opisan u nastavku prema [2] [1].

Signal brzine vjetra sastoji se od zbroja četiri komponente: srednje vrijednosti brzine v_{mean} , rampe v_{ramp} koja predstavlja linearnu promjenu brzine, udara v_{gust} koji predstavlja nagle nalete (udare) vjetra, te komponentu turbulencije v_{turb} .

$$v_w(t) = v_{\text{mean}} + v_{\text{ramp}}(t) + v_{\text{gust}}(t) + v_{\text{turb}}(t). \quad (10)$$

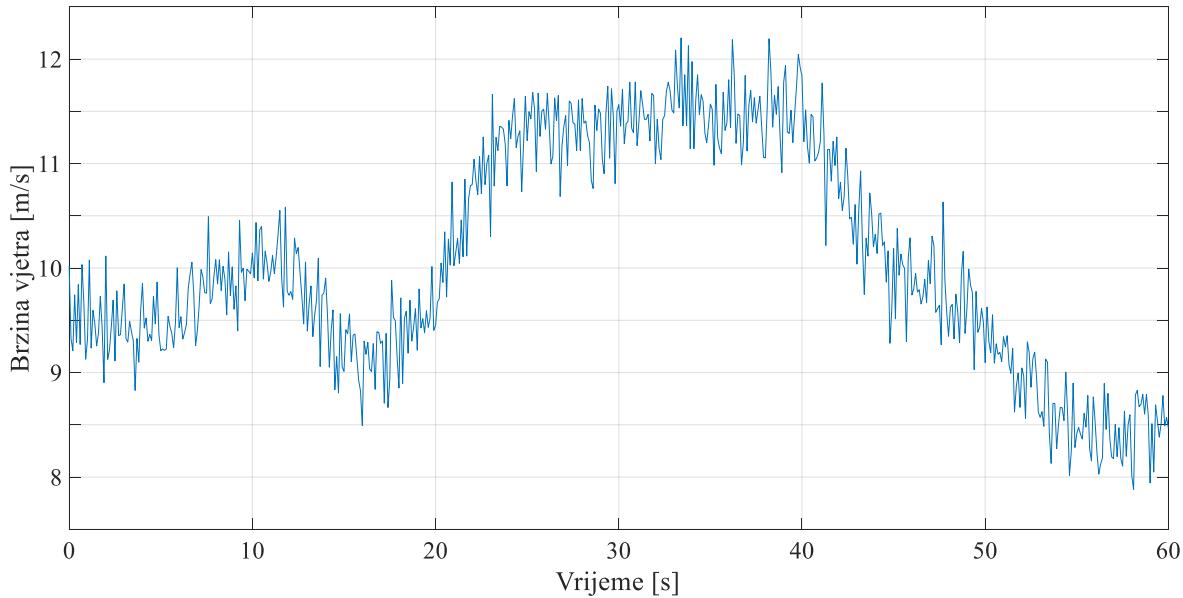
Srednja brzina vjetra v_{mean} , u slučaju kada VA radi ispod nazivne snage, dobiva se inicijalizacijom dinamičkog modela proračunom tokova snaga i rješavanjem nelinearne jednadžbe (14) uz poznatu mehaničku brzinu rotora i kut zakreta lopatica od 0° . Ako VA radi na nazivnoj snazi onda srednja brzina vjetra mora biti unaprijed poznata jer nije jedinstveno određena zbog regulatora zakreta lopatica. Izrazi za $v_{\text{ramp}}(t)$, $v_{\text{gust}}(t)$ i $v_{\text{turb}}(t)$ su (11), (12), (13), a primjer generiranog signala vjetra prikazan je na slici Slika 2.

$$v_{\text{ramp}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq T_{r1} \\ A_r \left(\frac{t - T_{r1}}{T_{r2} - T_{r1}} \right), & T_{r1} < t \leq T_{r2} \\ A_r, & t > T_{r2} \end{cases} \quad (11)$$

$$v_{\text{gust}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq T_{g1} \\ \frac{A_g}{2} \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{t - T_{g1}}{T_{g2} - T_{g1}} \right) \right], & T_{g1} < t \leq T_{g2} \\ 0, & t > T_{g2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\text{turb}}(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N (s(\omega_i) \Delta \omega)^{0.5} \cos(\omega_i t + \phi_i), \\ \omega_i = (i - 0.5) \Delta \omega, \\ \Delta \omega = 0.5 - 2 \text{ rad/s}, \\ s(\omega_i) = \frac{u_*^2 105 \frac{z}{v_{\text{mean}}}}{\left[1 + 33 \frac{z}{v_{\text{mean}}} \frac{\omega_i}{2\pi} \right]^{5/3}}, \\ u_* = \frac{0.4 v_{\text{mean}}}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}, \end{array} \right. \quad (13)$$

T_{r1} i T_{r2} su vrijeme početka i završetka rampe, A_r je vršna vrijednost rampe. T_{g1} i T_{g2} su vrijeme početka i završetka naleta vjetra, A_g je vršna vrijednost naleta. $s(\omega_i)$ je Kaimalova spektralna gustoća koja opisuje spektar frekvencija u atmosferi, ϕ_i je fazni kut uniformno distribuiran između 0 i 2π . Parametri u_* , z i z_0 opisuju ovisnost intenziteta turbulencije o vrsti terena. Tipične vrijednosti tih parametara dane su u [1].



Slika 2: Generirani signal brzine vjetra

1.1.2 Model rotora

Rotor turbine VA je složeni aerodinamički sustav koji se modelira pomoću teorije segmenata lopatica (*blade element theory*) i gdje je potrebno koristiti polje signala brzine vjetra koji se raspoređuju po lopaticama rotora kao i geometriju rotora [2] što je vrlo složeno i računski zahtjevno, a i ti podaci često nisu dostupni elektroenergetičarima. Stoga se primjenjuje jednostavniji model kada su u pitanju simulacije električnih pojava poput dinamičkog ponašanja EES-a.

Mehanička snaga razvijena na vratilu turbine računa se prema (14):

$$P_t(\lambda, \beta, v_w) = \frac{1}{2} \rho R^2 \pi C_p(\lambda, \beta) v_w^3(t). \quad (14)$$

ρ je gustoća zraka, R je polumjer rotora (duljina lopatice), C_p je aerodinamički koeficijent čija je teoretska gornja granica $16/27$, odnosno $0,593$ (Betzov koeficijent). C_p modernih turbina iznosi $0,52\text{--}0,55$, no često su u njega uključeni mehanički i električki gubitci. U tom slučaju se C_p kreće u rasponu $0,46\text{--}0,48$ [1].

C_p je funkcija kuta zakreta lopatica β i omjera λ . λ je omjer obodne brzine rotora turbine $\omega_t R$ i brzine vjetra (15). C_p ovisi o aerodinamičkim svojstvima pojedine turbine i bitan je, među ostalim, za proračun prinosa energije. Razlike između pojedinih C_p krivulja različitih turbina su zanemarive sa stajališta dinamike EES-a [2] [3] te se mogu koristiti generičke numeričke aproksimacije (npr. (16) prema [2]). Programska implementacija može se ostvariti koristeći analitički izraz (16), jednostavnije polinomne aproksimacije [1] ili pomoću preglednih tablica (*look-up tables*). Prema IEC/WECC modelima, razlikuju se tri prikaza aerodinamičkog dijela [4], koji u suštini predstavljaju linearizaciju aerodinamike (14)–(16) s pretpostavkom konstantne brzine vjetra s ciljem smanjenja broja parametara koji operatorima sustava u principu nisu poznati.

$$\lambda(\omega_t, v_w) = \frac{\omega_t R}{v_w} \quad (15)$$

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0,58\beta - 0,002\beta^{2,14} - 13,2 \right) e^{\frac{-18,4}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0,02\beta} - \frac{0,003}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (16)$$

Još postoje dva efekta koji se mogu uključiti u model rotora: prvo, visoke frekvencije u promjenama brzine vjetra su lokalnog karaktera koje se priguše preko cijele površine rotora što se može aproksimirati nisko-propusnim filtrom čija vremenska konstanta τ ovisi o polumjeru rotora, intenzitetu turbulencije i srednjoj brzini na visini glavčine (*hub height*) [5]. Drugo, zasjenjenje tornja (*tower shadow*) je pojava koja uzrokuje kratkotrajno smanjenje okretnog momenta svaki put kada lopatica prolazi ispred tornja [1]. Zasjenjenje tornja aproksimira se dodavanjem periodičnih pulsacija mehaničkoj snazi. Prijenosna funkcija periodičnih pulsacija definirana je u [5] i ovisi o broju lopatica, brzini vrtnje i intenzitetu turbulencije. Amplituda ove pulsacije iznosi nekoliko postotaka mehaničke snage i bitna je prilikom istraživanja kvalitete električne energije i interakcija između turbina koje su međusobno električki blizu; zasjenjenje tornja je izraženija u slučaju VA koji gledaju niz vjetar te VA tipa I i II, no nije utjecajna u slučaju tipova III i IV zbog energetske elektronike koja razdvaja mehaničko i električno djelovanje.

1.1.3 Mehanički model

Mehanički model odnosi se jedino na diferencijalne jednadžbe koje opisuju podvozje (*drivetrain*): zamašne mase turbine i generatora međusobno povezane vratilima i multiplikatorom koje povezuju mehanički i električki dio agregata. Ostale oscilacije i vibracije koje se mogu pobuditi u mehaničkoj konstrukciji agregata (toranj, lopatice) se u principu zanemaruju jer nemaju znatan utjecaj s mrežne strane [4] [6]. Mehanički se dio obično opisuje jednomasenim ili dvomasenim modelom, gdje se obično zahtijeva da VA tipa I i II sadržavaju dvomaseni model zbog čvrste povezanosti brzine rotora i električnih parametara asinkronog stroja [6], dok za tipove III i IV nema strogog konsenzusa te se može koristiti i jednomaseni model zbog razdvajajućeg učinka energetske elektronike [1] [2] [4] [6]. S druge strane, predlaže se da se u većini slučajeva koristi dvomaseni model [6], a IEC/WECC modeli pružaju mogućnost izbora između jednomasenog i dvomasenog modela [4] prigodnim odabirom parametara. Poseban slučaj kada bi se tip III trebao opisivati dvomasenim modelom je kada se simulira prorada zaštite (*crowbar protection*) koja u principu kratko spaja rotorske stezaljke [7] te se u tom trenutku tip III ponaša kao tip I.

Dvomaseni model opisan je s (17), odnos između brzine vrtnje turbine i mehaničke brzine vrtnje generatora definiran je prijenosnim omjerom multiplikatora N (za *direct-drive* sustave $N = 1$), dok je odnos mehaničke brzine vrtnje rotora generatora i električne brzine vrtnje definiran preko broja pari polova p . H_t i H_g su konstante tromosti turbine, odnosno generatora; T_g i T_e su mehanički moment na turbini, odnosno električni moment generatora; K_s i D_s su krutost, odnosno prigušenje vratila; γ je kut uvijanja (razlika kuta između sporohodnog vratila turbine i brzohodnog vratila generatora); f_n je mrežna frekvencija.

$$\left\{ \begin{array}{l} 2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - K_s \gamma - D_s(\omega_t - \omega_g) \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_s \gamma + D_s(\omega_t - \omega_g) - T_g \\ \frac{d\gamma}{dt} = 2\pi f_n (\omega_t - \omega_g) \\ \omega_t = \frac{\omega_g}{N} \\ \omega_g = \frac{\omega_e}{p} \end{array} \right. \quad (17)$$

Radi potpunosti, jednomaseni model definiran je s (18) gdje su sve veličine preračunate na brzohodnu stranu, gdje je $H = H_t/N^2 + H_g$.

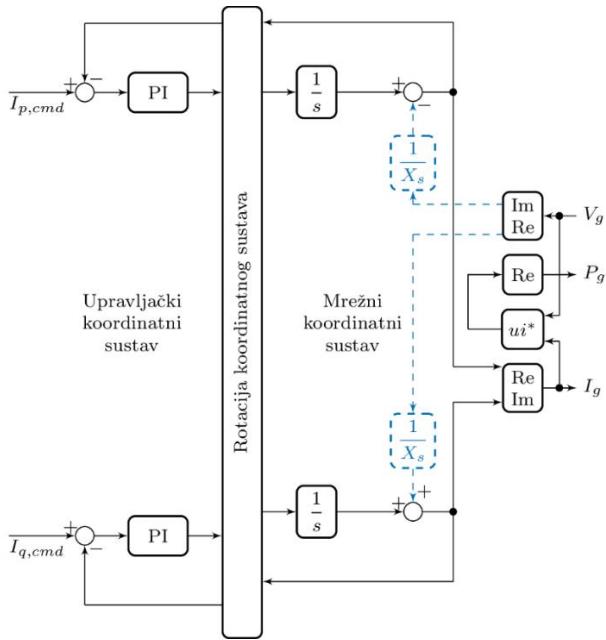
$$2H \frac{d\omega_g}{dt} = T_t - T_e \quad (18)$$

Kako se u elektroenergetskim proračunima upotrebljavaju p.u. vrijednosti, potrebno je pravilno odabratи dodatne bazne mehaničke veličine kako bi p.u. sustav ostao dosljedan prilikom preračunavanja mehaničkih veličina na električne, što je opisano u [1].

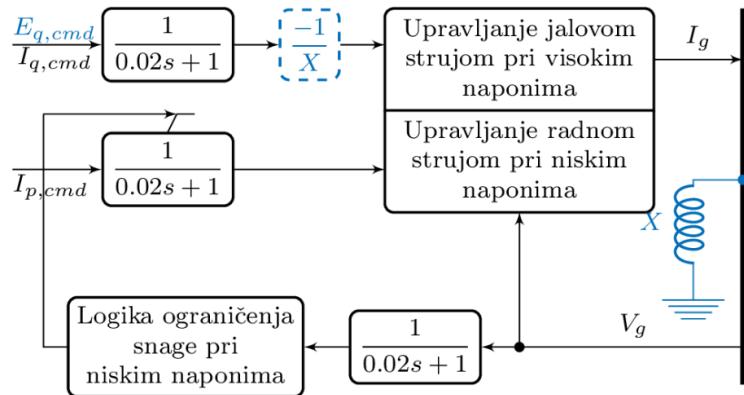
1.1.4 Model generatora

U literaturi se mogu pronaći različiti pristupi modeliranju generatora za potrebe dinamičkih simulacija EES-a te ne postoji strogi standard koji se primjenjuje. U programskim paketima (npr. PSS/E, DIgSILENT PowerFactory, NEPLAN, itd.) integrirani su generički modeli prema IEC/WECC i General Electric (GE). Standardni modeli sinkronih i asinkronih generatora opisani jednadžbama u dq sustavu koji rotira proizvoljnom brzinom također se mogu koristiti. Ti modeli također dolaze integrirani u programskim paketima ili se mogu ručno izmodelirati u npr. Simulinku.

IEC/WECC radne grupe za tipove I i II predlažu korištenje već integriranih modela asinkronih generatora u programskim paketima za simulaciju EES-a, dok je oko modeliranja tipova III i IV bilo dosta rasprave posljednjih godina [4]. Ukratko, na slici Slika 3 je prikazan blok dijagram modela generatora tipova III (bez zaštite) i IV za dinamičke simulacije EES-a koji su prihvatile obje radne grupe [4]. Na slici Slika 4 prikazan je službeni model GE agregata [8].



Slika 3: IEC/WECC tip III I tip IV model generatora



Slika 4: GE tip III I tip IV model generatora

S obje slike vidljivo je da su generator i pretvarač nadomješteni sa upravljačkim sustavom čiji je izlaz struja I_g koja se injektira u mrežu, a ulazi su upravljački signali. Iz prikazanih modela vidljivo je da je bilo kakva dinamika iz klasičnih dinamičkih modela generatora zanemarena (mehaničke varijable stanja rotora, dinamika magnetskog toka $d\psi/dt$) što ilustrira brzi odziv pretvarača na upravljačke signale. Dinamičko ponašanje VA tipa III i IV u potpunosti je određeno pretvaračem te se cijeli sustav prema mreži ponaša kao algebarski, upravljivi strujni izvor [8]. Razlika između

tipa III i IV ilustrirana je plavo-iscrtkanim elementima: stator tipa III je izravno spojen na mrežu te će promjena napona na stezaljkama generatora uzrokovati promjenu jalove snage koja se izmjenjuje s mrežom. Ova prijelazna pojava modelirana je dodavanjem reaktancije X u model generatora/pretvarača [4]. Zbog toga je u GE modelu, upravljački signal za jalovu snagu napon $E_{q,cmd}$ umjesto struje.

S druge strane, postoji i pristup gdje su jednadžbe i dinamika generatora uključene u model VA tipa III i IV. Ovi modeli dobro su poznati te se mogu pronaći u nizu literature ([7], [1], [9], [2], [10], [11], [3], [12], [13]) i zbog toga ovdje neće biti reproducirani.

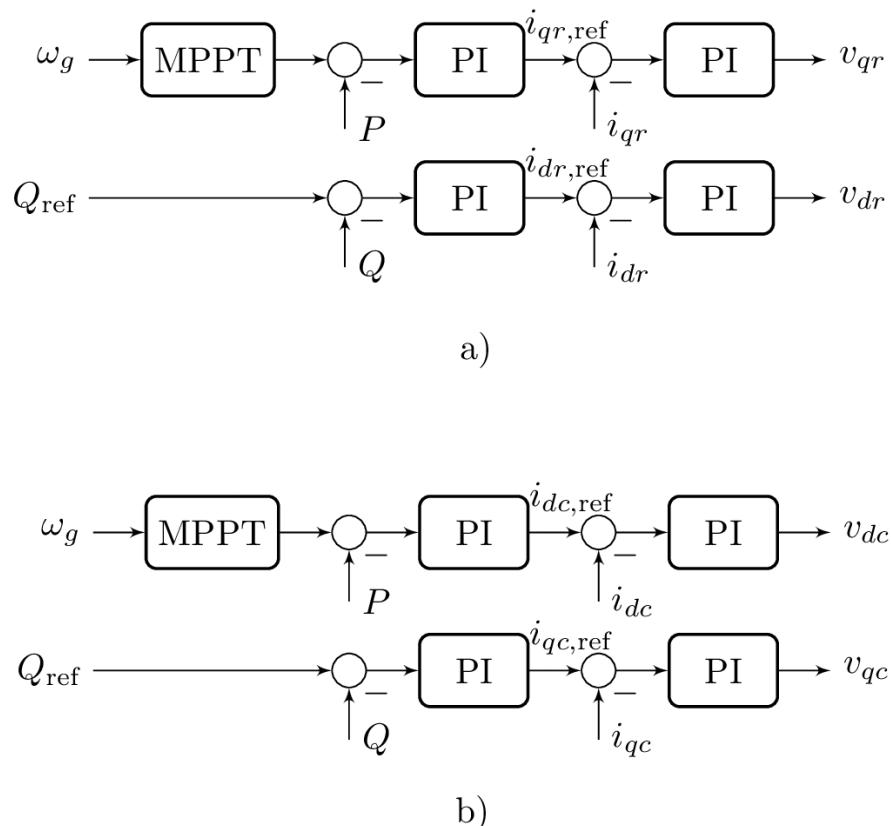
1.1.5 Model pretvarača i upravljanja

U većini literature, pretvarači u slučaju tipa III ili IV modelirani su upravljačkim sustavima koji generiraju potrebne signale. U nekim modelima DC međukrug, pripadajući pretvarač i upravljanje nisu posebno modelirani, dok u nekima jesu. U prvima su u obzir uzeti samo oni upravljački krugovi koji upravljaju radnom i jalovom snagom. Kod tipa III, pretvarač s rotorske strane (*rotor-side converter*) upravlja radnom i jalovom snagom, dok pretvarač s mrežne strane (*grid-side converter*) upravlja naponom DC međukruga i drži faktor snage pretvarača na 1. Kod tipa IV, pretvarač sa generatorske strane (*generator-side converter*) upravlja naponom DC linka, te naponom i uzbudom generatora, dok pretvarač s mrežne strane upravlja radnom i jalovom snagom koju sustav razmjenjuje s mrežom. Bez obzira na pristup, kada se promatra samo osnovni harmonik što je slučaj u simulacijama stabilnosti EES-a, pretvarač je modeliran kao zavisni naponski, odnosno strujni izvor bez gubitaka koji poštaje očuvanje radne snage između AC i DC dijela.

U literaturi postoji mnogo pristupa sustavu upravljanja s obzirom na to kojim veličinama se upravlja, na koji način te koji su ulazni i izlazni signali između podsustava. U nastavku će biti prikazane neke upravljačke strukture za upravljanje radnom i jalovom snagom tipova III i IV.

Na slici Slika 5a prikazana je upravljačka struktura rotorskog pretvarača tipa III prema [1] [14]: Optimalna aerodinamička učinkovitost postiže se mjeranjem brzine rotora na temelju koje se generira maksimalna radna snaga (*maximum power point tracking—MPPT*) koja se može postići pri trenutnoj brzini vjetra. Na temelju radne snage, generira se referentna rotorska struja u q -osi na temelju koje se dobiva potreban iznos rotorskog napona u q -osi. Upravljanje jalovom snagom je identično, samo što se upravlja s rotorskim veličinama u d -osi. Referenca jalove snage može se postaviti izravno ili neizravno ako se upravlja s naponom određene sabirnice ili faktorom snage. Upravljačka struktura je identična za tip IV (Slika 5b), s razlikom da se ovdje upravlja s veličinama pretvarača sa strane mreže prema [14]. Kako je u ovom slučaju koordinatni sustav orijentiran tako

da je d -os kolinearna s amplitudom napona mreže, radnom snagom se upravlja veličinama u d -osi, a jalovom snagom veličinama u q -osi. U literaturi se mogu pronaći i druge strukture: prema [1] [6], radnom i jalovom snagom upravlja se preko generatorskog pretvarača gdje veličina kojom se upravlja radnom snagom kut opterećenja δ (kut između napona na sabirnicama statora i napona na sabirnicama pretvarača).



Slika 5: Upravljanje električnom snagom vjetrogeneratora: a) tip III: upravljanje rotorskim naponima; b) tip IV: upravljanje naponima pretvarača

1.1.6 Model sustava zakreta lopatica

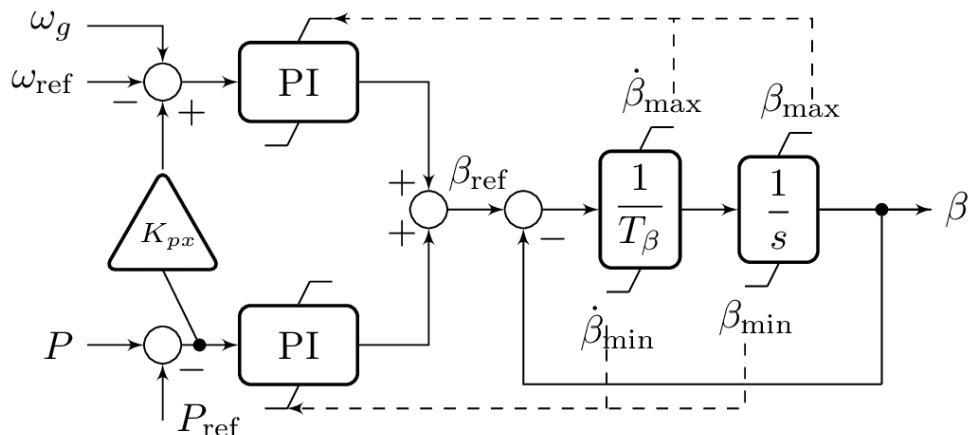
Sustav zakreta lopatica aktiviran je pri brzinama vjetra većim od nazivne čija je zadaća ograničavanje aerodinamičkog momenta na vratilu turbine. U literaturi se spominje više izvedbi sustava zakreta lopatica s obzirom na ulazne veličine [4] [15]: brzina vjetra, brzina vrtnje generatora ili radna snaga VA.

Međutim, mjerjenje brzine vjetra nije precizno [4] [15] te se u literaturi ne koristi. Stoga, u literaturi se obično mogu pronaći izvedbe s mjerenjem brzine vrtnje generatora, snage generatora ili hibridna verzija s kompenzacijom snage.

Prema [14], postoje dvije strategije upravljanja vjetroagregatom:

1. Ako pretvarač upravlja snagom (Slika 5a,b gdje se generira referenca radne snage preko MPPT krivulje na temelju brzine vrtnje generatora) onda sustav zakreta lopatica upravlja brzinom turbine;
2. moguće je da pretvarač upravlja brzinom vrtnje generatora: u tom slučaju generira se referenca brzine na temelju inverzne MPPT karakteristike. U ovoj izvedbi, sustav zakreta lopatica upravlja radnom snagom agregata.

Često se koristi i hibridna izvedba koja ima dodatnu petlju za kompenzaciju radne snage generatora, iako se ta dodatna petlja može i zanemariti [4]. Na slici Slika 6 prikazana je hibridna izvedba [4]. Izvedbe 1 i 2 sadržane su u hibridnoj izvedbi te se mogu dobiti zanemarivanjem ili donje regulacijske petlje snage ili gornje regulacijske petlje brzine. Faktor K_{px} može biti i 0.



Slika 6: Sustav upravljanja zakretom lopatica

1.1.7 Model sustava zaštite

Sustav zaštite sprječava oštećenje VA od prevelikih struja prilikom kratkog spoja te sprječava otočni rad agregata nakon kvara [1]. Sustav zaštite također je bitan za tipove III i IV jer je potrebno štititi pretvarače od prevelikih struja te prenapona i podnapona. Honrubia-Escribano *et al.* [4] dokumentiraju kako se najviše diskusije vodilo oko modeliranja tipa III koji je samo djelomično odvojen od mreže preko rotorskog pretvarača. Starije izvedbe tipa III su koristile tzv. pajser-zaštitu

(*crowbar protection*) koja se u principu izvodi preko impedancije koja kratko spaja rotorske stezaljke neposredno nakon detekcije kvara; time se zaobilazi rotorski pretvarač i tada se tip III ponaša kao tip I. Novije izvedbe koriste čoper i/ili veći pretvarač [4]. Zaštita generatorskih namota nije toliki problem u tipu IV jer je generator u potpunosti odvojen od mreže.

U literaturi ([4] [8]) može se vidjeti da je zaštita u simulacijskim modelima primijenjena u upravljačkim sustavima kao zasićenja s donjim i gornjim granicama te određenom logikom. Stoga je u principu dovoljno djelovati na upravljačke signale kako bi se simuliralo zaštitno djelovanje. Dodatna diskusija oko sustava zaštite može se pronaći u [1] [2] [4].

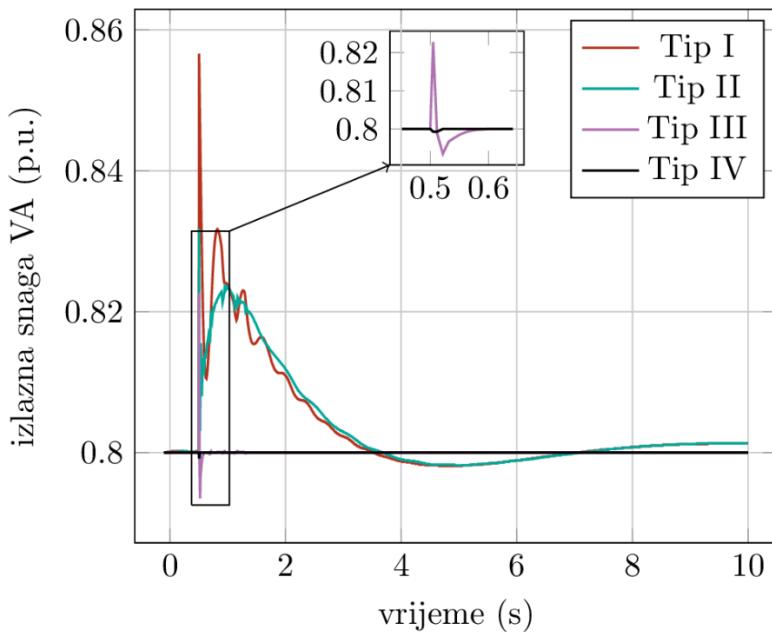
1.2 Sudjelovanje vjetroelektrana u regulaciji frekvencije EES-a

U posljednjih desetak godina, vrlo značajan porast udjela VE diljem svijeta motivirao je brojna istraživanja utjecaja VE na frekvencijski odziv EES-a te istraživanja mogućnosti sudjelovanja VE u regulaciji frekvencije EES-a. Razvoj energetskih elektroničkih pretvarača i povećanje broja izvora energije koji se preko njihovog sučelja spajaju s mrežom za posljedicu ima smanjenje konstante tromosti sustava i povećanje zahtjeva na konvencionalne izvore da reguliraju frekvenciju. Ovo je problem koji nije vezan isključivo za VE, stoga uloga VE predstavlja podskup u ovom glavnem problemu. No, s obzirom da VE imaju najveći udio u instaliranoj snazi OIE izuzev hidroelektrana, njihov utjecaj je značajan te će biti predmet nastavka istraživanja.

U nastavku ovog poglavlja, dan je pregled literature sudjelovanja VE u regulaciji frekvencije EES-a prema podjeli na: inercijski odziv, primarnu regulaciju frekvencije, te na kraju sekundarnu i tercijarnu regulaciju frekvencije.

1.2.1 Inercijski odziv

Vraćajući se na 4 glavne izvedbe VA razlikuju se dva inercijska odziva: inercijski odziv VA tipa I i II i inercijski odziv VA tipa III i IV. Iako između pojedinih odziva postoje vidljive razlike, odzivi prva dva tipa i odzivi zadnja dva tipa su dovoljno slični da se mogu promatrati zajedno. Inercijski odzivi četiri tipa VA prikazani su na slici Slika 7.



Slika 7: Inercijski odziv različitih vrsta vjetroagregata

Tipovi I i II su izravno spojeni na mrežu te je njihovo ponašanje prilikom pada mrežne frekvencije tipično za asinkroni stroj. Tip I radi u uskom nadsinkronom području te je promjena brzine reda veličine 1% zbog čega se pojavljuju velika mehanička naprezanja zbog amplitude snage prilikom inercijskog odziva. Ovo je manje izraženo, ali svejedno značajno u slučaju tipa II gdje će upravljanje rotorskim otpornikom ipak omogućiti da se kinetička energija disipira na otporniku. S druge strane, inercijski odziv tipova III i IV nije značajan zbog djelovanja energetske elektronike. U slučaju tipa III, frekvencijski pretvarač odvaja mehaničku frekvenciju rotora od mrežne frekvencije, no stator je i dalje spojen na mrežu izravno te će stoga postojati određena injekcija radne snage u mrežu neposredno nakon poremećaja. Međutim, na slici Slika 7 može se vidjeti da je ta amplituda snage svega nekoliko postotaka početne vrijednosti, a cijela prijelazna pojava završava unutar 100 ms te je oslobođena kinetička energija zanemariva. Generator tipa IV je u potpunosti odvojen od mreže preko pretvarača te je inercijski odziv nepostojeći jer je ponašanje VA u potpunosti određeno pretvaračem: sa slike Slika 7 vidljivo je da nema injekcije radne snage u mrežu, odnosno da VA tipa 4 ne osjeti promjenu mrežne frekvencije i snaga ostaje konstantna.

Dakle, VA tipa I i II imaju inherentni inercijski odziv kojim se ne može upravljati te u literaturi nije od pretjeranog interesa [16] [17] [18]. Nadalje, to su agregati starije izvedbe te je njihova zastupljenost u sustavima vrlo mala [19]. S druge strane, VA tipa III i IV danas su na tržištu najzastupljeniji jer omogućuju maksimalnu aerodinamičku učinkovitost u velikom rasponu brzina

vjetra, no s druge strane njihova integracija u sustav smanjuje konstantu tromosti sustava jer VA tipa III i IV imaju smanjen, odnosno nemaju inercijski odziv zbog razdvajajućeg učinka frekvencijskih pretvarača. Međutim, mogućnost fleksibilnog upravljanja VA s promjenjivom brzinom vrtnje omogućuje dodavanje umjetnog inercijskog odziva pomoću sekundarnih upravljačkih krugova osjetljivih na ROCOF, što se u literaturi naziva virtualni/sintetički inercijski odziv (*virtual/synthetic inertia*) ili brzi frekvencijski odziv (*fast frequency response*).

1.2.1.1 O tromosti vjetroagregata

Vjetroagregati posjeduju zamašnu masu sumjerljivu konvencionalnim termo/hidro-agregatima. Moment tromosti vjetroturbine može se aproksimirati empirijskim izrazom prema (19) [20]:

$$J_t = 1.12P_r^{2.135} \quad (19)$$

gdje su J_t moment tromosti turbine u 10^6 kgm^2 ; P_r je nazivna snaga agregata u MW. Moment tromosti generatora J_g je značajno manji i kreće se u rasponu od 65 do 200 kgm^2 za aggregate 2–5 MW prema podacima iz [1] [20] [21]. Rotirajuća masa turbine i rotirajuća masa generatora u općenitom su slučaju povezane preko prijenosnog omjera mjenjačke kutije. Ekvivalentni moment tromosti preračunat na brzohodno vratilo računa se prema (20):

$$J = \frac{J_t}{n^2} + J_g \quad (20)$$

gdje je n prijenosni omjer mjenjačke kutije (za *direct-drive* sustave $n = 1$).

Konstanta tromosti H računa se prema izrazu (21) gdje su sve veličine preračunate na električnu stranu:

$$H = \left(\frac{J_t}{n^2 p^2} + \frac{J_g}{p^2} \right) \frac{\omega_e^2}{2S_b} \quad (21)$$

gdje je p broj pari polova, S_b je bazna snaga (obično nazivna snaga), a ω_e je električna brzina vrtnje. Konstanta tromosti H za nekoliko agregata tipičnih nazivnih snaga i nazivnih brzina vrtnje ω_r prikazana je u tablici Tablica 1 [22] (konstanta tromosti izračunata je pod pretpostavkom da je nazivna brzina vrtnje ω_r 20% veća od sinkrone brzine $\omega_s = 2\pi f$). Za razliku od konvencionalnih jedinica, brzina rotora VA III/IV može značajno varirati te pasti čak za 50–60% nazivne brzine, a

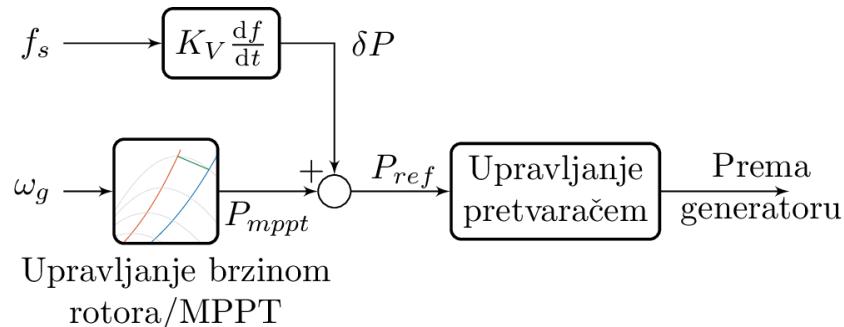
time pada i konstanta tromosti [22]. Npr. trenutna konstanta tromosti 5MW vjetroagregata može varirati između 1,5 i 6 sekundi.

Tablica 1: Tipične mehaničke konstante vjetroagregata

S [MVA]	J_t [10^6 kgm 2]	J_g [kgm 2]	n	p	ω_r [rpm]	H [s]
1	1,121	70	75	2	24	4,78
2	4,924	130	100	2	18	5,52
5	34,830	200	150	2	12	6,21

1.2.1.2 Koncept virtualnog inercijskog odziva

Koncept upravljanja VA s uključenim virtualnim inercijskim odzivom prikazan je na slici Slika 8. Dodatna regulacijska petlja mjeri mrežnu frekvenciju f_s te na temelju ROCOF-a df/dt i pojačanja K_V injektira dodatni signal δP koji zbrojen sa signalom optimalne snage P_{mppt} iz normalne petlje upravljanja brzinom rotora daje novu referentnu snagu koja se propagira u upravljački sustav pretvarača. K_V se naziva virtualnom konstantnom tromosti te ne posjeduje nikakvo fizičko značenje kao što to predstavlja stvarna konstanta tromosti [22]. K_V se teorijski može postaviti na bilo koju vrijednost, te je virtualni inercijski odziv, za razliku od stvarnog, u potpunosti upravlјiv: to znači da VA tipa III/IV mogu pružiti čak i veći inercijski odziv nego konvencionalne jedinice [23]. Međutim, stvarne mogućnosti ovise o fizičkim ograničenjima agregata te autori u [21] argumentiraju da se pojačanje K_V postavi na maksimalno $1,85H_{wtg}$ čime se sprječava smanjenje brzine rotora ispod minimalne što može dovesti do zaustavljanja turbine.

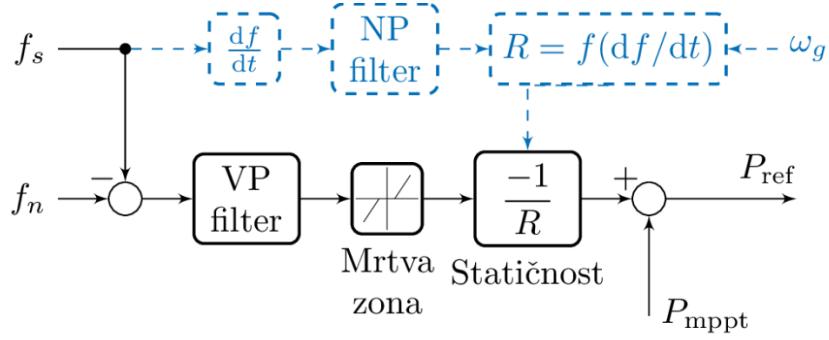


Slika 8: Koncept virtualnog inercijskog odziva za tip III/IV

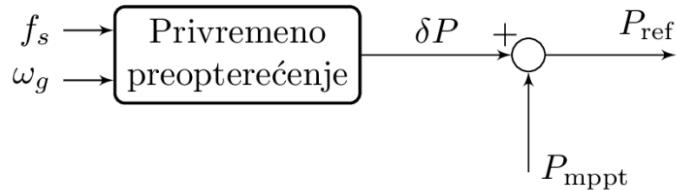
Na slici Slika 8 prikazan je algoritam tzv. "prirodnog" inercijskog odziva (*natural inertial response*). Naziva se "prirodnim" jer je proporcionalan ROCOF-u što je analogno stvarnom inercijskom odzivu. Međutim, postoje još neke izvedbe algoritma inercijskog odziva koje su dokumentirane u [24]:

1. inercijski odziv s fiksnom statičnosti (*fixed-droop*);
2. inercijski odziv s promjenjivom statičnosti (*variable-droop*);
3. konstantni inercijski odziv (*step-wise inertial control*);
4. virtualni inercijski odziv s optimiziranim praćenjem snage (*virtual inertial control*).

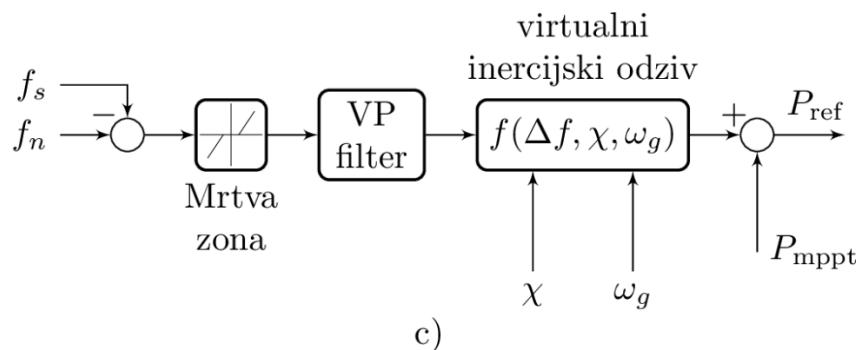
Ono što je zajedničko svim algoritmima je da se vjetroagregat privremeno preoptereće gdje dodatna injekcija snage dolazi iz kinetičke energije rotora zbog čega rotor turbine usporava. Blok-dijagram regulatora za gore navedene algoritme prikazan je na slici Slika 9.



a)



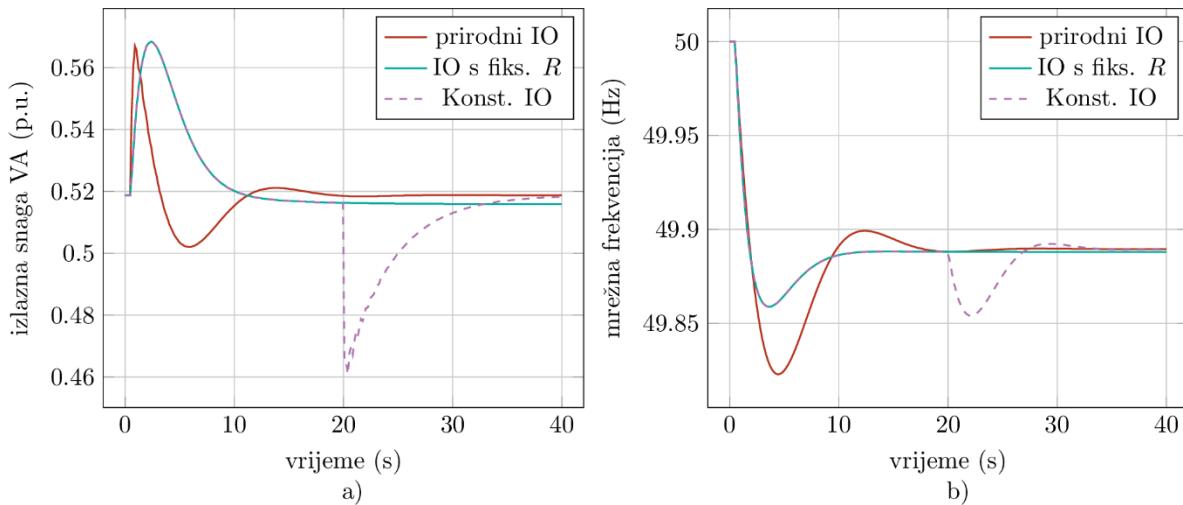
b)



Slika 9: Neki upravljački algoritmi za virtualni inercijski odziv [24]

Inercijski odziv s fiksnom statičnošću (slika Slika 9a) proporcionalan je odstupanju mrežne frekvencije f_s od nazivne frekvencije f_n i pojačanju statičnosti $1/R$ što je slično klasičnoj turbinskoj regulaciji. Visokopropusni (VP) filter uklanja doprinos regulacije u ustaljenom stanju te se agregat vraća u početnu radnu točku prije nastanka poremećaja. Poboljšano ponašanje odziva postiže se dinamičkom promjenom statičnosti R (iscrtkano plavom bojom na slici Slika 9a). Ovdje

je statičnost R funkcija ROCOF-a i brzine rotora ω_g gdje je funkcija takva da je pojačanje veće neposredno nakon poremećaja kada ROCOF dominira frekvencijskim odzivom te se s vremenom smanjuje. Niskopropusni (NP) filter dodaje se nakon derivatora s ciljem smanjenja šuma jer je df/dt proces koji inherentno pojačava smetnje [24]. Sličan algoritam može se pronaći u [25] gdje nema VP filtra. U tom slučaju, doprinos regulatora postoji i u ustaljenom stanju zbog čega rotor trajno usporava i snaga agregata pada ispod početne snage. U algoritmu s konstantnim inercijskim odzivom (konstantnim privremenim preopterećenjem, slika Slika 9b) dobro definirani konstantni iznos dodatne snage superponira se referentnoj vrijednosti te se drži određeno vrijeme. Nakon što brzina rotora dosegne određenu donju granicu, proces preopterećenja se uklanja te se referentna vrijednost radne snage smanjuje za drugu konstantnu vrijednost tako da je sada dostupna mehanička snaga veća od električne čime se omogućuje rotoru da ubrza do početne radne točke. Posljedica ovog algoritma je sekundarni propad mrežne frekvencije tijekom ubrzanja rotora do početne radne točke. Navedeni sekundarni propad mrežne frekvencije nastaje jer se izlazna električna snaga vjetroagregata privremeno smanjuje kako bi rotor mogao ubrzati i vratiti se u početnu radnu točku prije poremećaja. Primjer ovog algoritma može se pronaći u [26]. Algoritam virtualnog inercijskog odziva s optimiziranim praćenjem snage [27] (slika Slika 9c) koristi optimiziranu krivulju praćenja snage gdje se prilikom detekcije poremećaja frekvencije ponašanje agregata i dodatna injektirana snaga ponaša po unaprijed definiranoj inercijskoj krivulji praćenja snage ovisnoj o f_s , ω_g te dobro definiranom faktoru χ koji u obzir uzima stvarni moment tromosti agregata, mrežnu frekvenciju i brzinu rotora prije poremećaja. Ovaj algoritam nudi bolje prigušenje poremećaja [27] i ne može izazvati sekundarni propad frekvencije [24]. Ilustracija nekih virtualnih inercijskih odziva prikazana je na slici Slika 10.



Slika 10: Neki virtualni inercijski odzivi: a) izlazna snaga VA; b) mrežna frekvencija

1.2.2 Primarna regulacija frekvencije

Da bi primarna regulacija frekvencije bila moguća, potrebno je osigurati određenu količinu rotirajuće rezerve. Prilikom pada mrežne frekvencije, turbinski regulatori sinkronih jedinica povećavaju protok primarnog energenta proporcionalno promjeni mrežne frekvencije $\Delta f = f_s - f_n$. VE su dosad u primarnoj regulaciji frekvencije sudjelovale samo s mogućnošću smanjenja izlazne snage u slučaju viška proizvodnje u sustavu. Izuzetak su neki sustavi poput Irskog koji zahtijevaju da VE podignu svoju radnu snagu u slučaju niske frekvencije sustava. Primarni frekvencijski odziv može se omogućiti slično virtualnom inercijskom odzivu.

VA tipa I i II ne omogućuju fleksibilno upravljanje zbog čvrste povezanosti s mrežom te u literaturi nema puno radova koji se bave primarnom regulacijom frekvencije iz ova dva tipa [28]. Da bi se osigurala rotirajuća rezerva, VA se moraju rasteretiti u normalnom pogonu, odnosno raditi sa snagom koja je manja od dostupne snage P_{ava} . Tip I se može rasteretiti preko sustava za zakret lopatica povećanjem kuta zakreta lopatica β . Tip II se može rasteretiti preko upravljivog otpornika ili isto preko zakreta lopatica. No, rotorski otpornik je aktivran samo pri brzinama vjetra većim od nazivne te se njegova upotreba nastoji minimizirati kako bi se smanjili gubitci, tj. dissipacija topline [28]. U tom slučaju, P_{ref} sa slike Slika 6 može se izračunati npr. kao (22):

$$P_{ref} = P_{res} + \frac{1}{R} \Delta f \quad (22)$$

Energetski pretvarači u tipovima III i IV omogućuju fleksibilno upravljanje brzinom rotora za brzine vjetra ispod nazivne. Glavna zadaća ovog upravljanja je reguliranje optimalne brzine rotora pri kojoj se postiže maksimalna trenutno dostupna snaga (MPPT član na slikama Slika 5a,b i slici Slika 8). Optimalna snaga, odnosno optimalna brzina rotora koja služi kao referentna vrijednost koja se propagira u pretvarač određuje se preko dobro definirane krivulje (23) [7]:

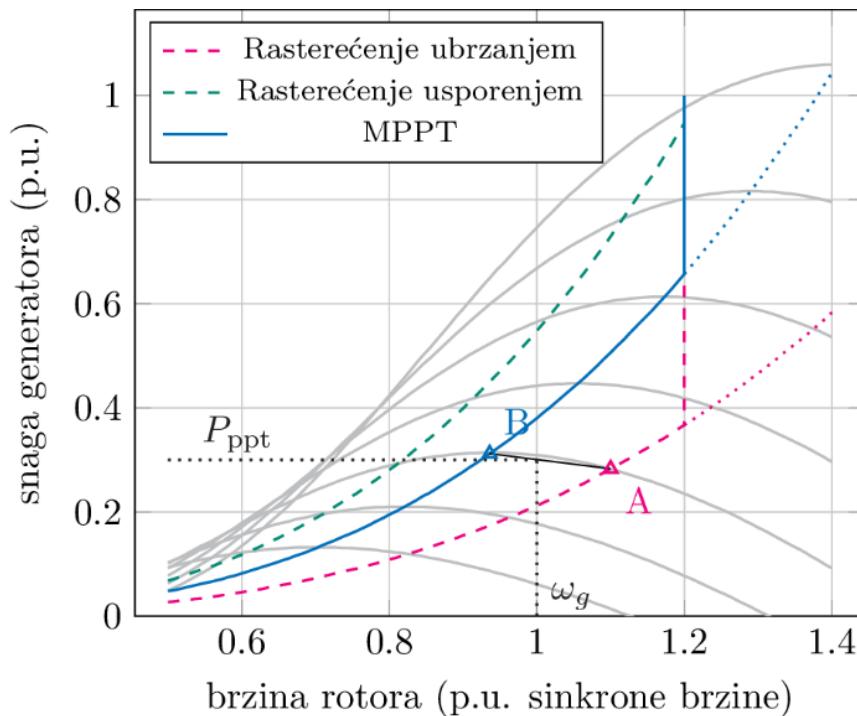
$$P_{mppt} = k_{mppt} \omega_g^3 \quad (23)$$

$$k_{mppt} = 0.5 \rho R^5 \pi \frac{C_{p,opt}}{\lambda_{opt}^3 N^3}$$

Ovisnost snage generatora o brzini generatora prikazana je na slici Slika 11. Sive krivulje u pozadini prikazuju ovisnost mehaničke snage agregata o brzini rotora za različite brzine vjetra

prema (14). Plava krivulja je krivulja optimalne (maksimalne) snage. S obzirom da je regulator zakreta lopatica aktivan samo pri većim brzinama vjetra, rotirajuća rezerva može se postići rasterećenjem tako da se rotor ubrza ili uspori. U literaturi se obično koristi rasterećenje ubrzanjem iz nekoliko razloga:

- veća kinetička energija koja se oslobađa prilikom frekvencijskog odziva;
- rasterećenjem usporenjem, frekvencijski odziv je slabiji jer se mora se utrošiti dio snage kako bi se rotor ubrzao [29];
- rasterećenje usporenjem je nestabilno [21].



Slika 11. MPPT krivulja i krivulje rasterećenja

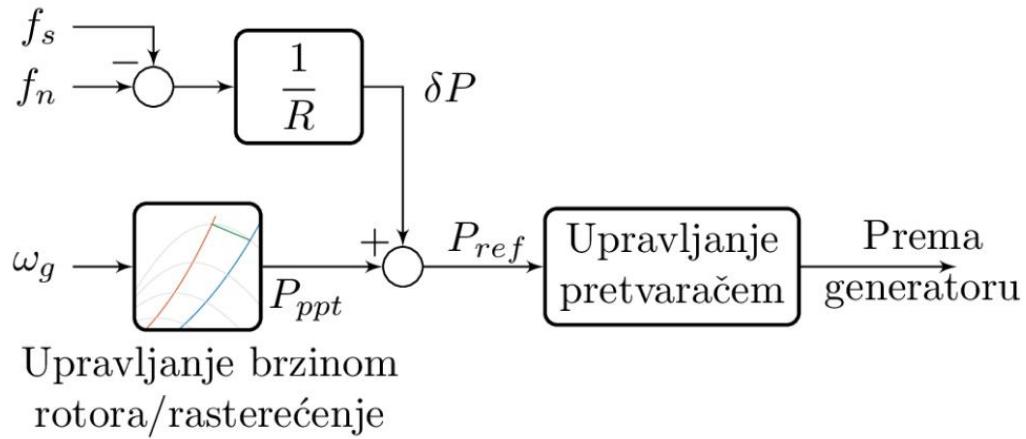
Algoritam koji se često može naći u literaturi [21] [30] [31] je da VA radi prema krivulji rasterećenja u točki A ($P_{\text{del}}, \omega_{\text{del}}$). Prilikom pada frekvencije, referenca radne snage promijeni se za $\Delta f/R$ te se radna točka (P_{ppt}, ω_g) pomiče po linearnom nagibu od točke A prema točki B ($P_{\text{mppt}}, \omega_{\text{mppt}}$). P_{ppt} i P_{ref} definirane su s (24)–(25).

$$P_{\text{ppt}}(\omega_g, v_w) = P_{\text{del}}(v_w) + \frac{P_{\text{mppt}}(v_w) - P_{\text{del}}(v_w)}{\omega_{\text{mppt}}(v_w) - \omega_{\text{del}}(v_w)} (\omega_g - \omega_{\text{del}}(v_w)) \quad (24)$$

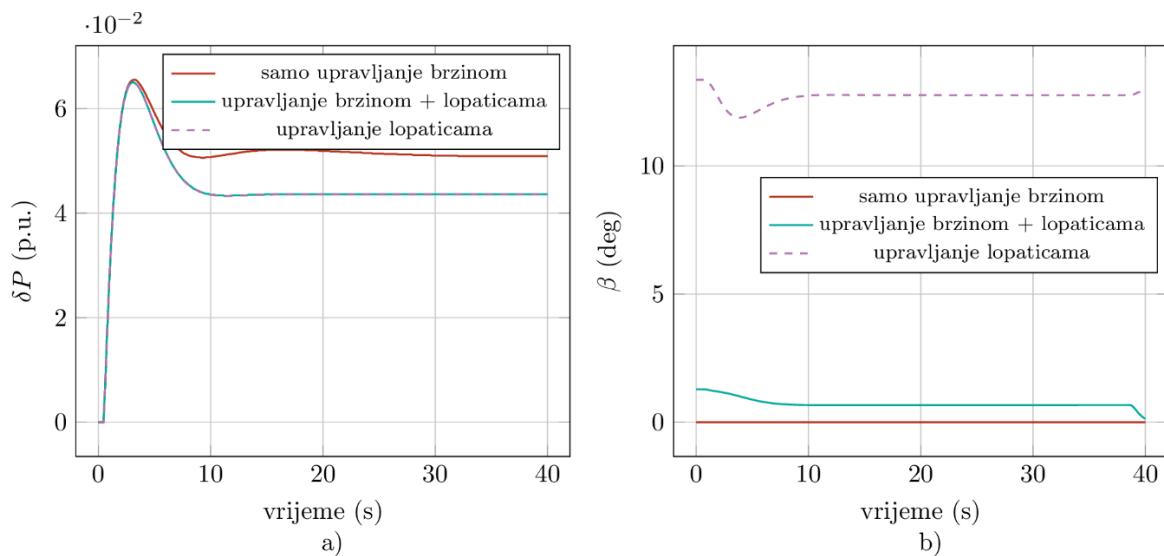
$$P_{\text{ref}}(\omega_g, v_w, \Delta f) = P_{\text{ppt}}(\omega_g, v_w) + \frac{\Delta f}{R} \quad (25)$$

Ovaj algoritam nadopunjava se regulacijom zakreta lopatica koji osigurava da brzina rotora ne prekorači maksimalnu dozvoljenu vrijednost koja je obično oko 1.2 p.u. sinkrone brzine. Dvije izvedbe s ovim algoritmom prikazane su u [21] [31].

Konceptualno, primarna regulacija frekvencije pomoću VA slična je virtualnom inercijskom odzivu i prikazana na slici Slika 12. U literaturi se mogu pronaći još neke izvedbe algoritma za primarnu regulaciju frekvencije, npr: koordinacija inercijskog odziva i rotirajuće rezerve za tip IV [32]; bolji odziv dinamičkom promjenom statičnosti R tipa III [25] [33]; sudjelovanje vjetroparka s tip IV agregatima u primarnog regulaciji frekvencije pomoću zakreta lopatica [34]. Primarni frekvencijski odziv VA tipa III i IV za nekoliko algoritama upravljanja prikazan je na slici Slika 13.



Slika 12. Koncept primarne regulacije frekvencije za tip III/IV



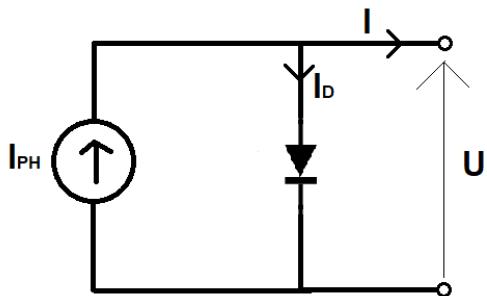
Slika 13. Primarni frekvencijski odziv VA tipa III/IV za neke načine upravljanja a) promjena izlazne snage VA; b) kut zakreta lopatica

1.2.3 Sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije

Sekundarna regulacija frekvencije počinje nekoliko desetaka sekundi nakon poremećaja i traje do nekoliko desetaka minuta. Zadaća sekundarne regulacije frekvencije je održavanje nazivne mrežne frekvencije i zadane razmjene snage između područja te oslobođanje primarne rezerve za sljedeće poremećaje. Tercijarna regulacija je još sporija i povezana je s ekonomskim dispečiranjem elektrana, optimalnim tokovima snaga, tržištem električne energije i generalno optimizacijskim problemima vezanih uz dispečiranje elektrana s obzirom na postavljenu funkciju cilja (*unit commitment*). Ponešto o sudjelovanju vjetroelektrana u sekundarnoj i tercijarnoj regulaciji može se pronaći u [1] [24] [29].

2 Modeliranje fotonaponske elektrane

Fotonaponska ćelija je napravljena od poluvodičkih materijala koji pretvaraju energiju sunčevog zračenja u električnu energiju. Temeljena na električnim svojstvima poluvodičkih materijala, FN ćelija se može prikazati kao strujni izvor. Shema idealne fotonaponske ćelije je prikazana na Slika 14.



Slika 14 Shema idealne FN ćelije

S obzirom na Slika 14, može se napisati izraz za struju FN ćelije:

$$I = I_{PH} - I_D \quad (26)$$

pri čemu su: I [A] – izlazna struja fotonaponske ćelije, I_{PH} [A] – fotostruja, I_D [A] – struja diode

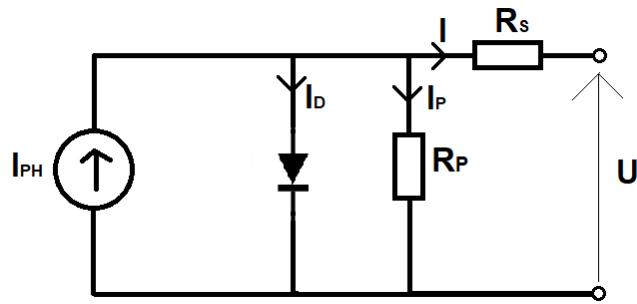
Koristeći poznati izraz (27) za struju diode [35], i uvrštavajući ga u (26), dobiva se izraz (28) koji opisuje $I-U$ karakteristiku fotonaponske ćelije:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (27)$$

$$I = I_{PH} - I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (28)$$

pri čemu su: I_s [A] – struja zasićenja diode, q – naboj elektrona ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C), k – Boltzmanova konstanta ($1.381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$), T [K] – temperatura diode, U [V] – izlazni napon, $A=1$ – faktor kvalitete diode.

Međutim, realna fotonaponska ćelija se sastoji od serijskog i paralelnog otpora. Serijski otpor predstavlja gubitke zbog prolaska struje kroz različite slojeve ćelije. Ovisi uglavnom o spoju metalne baze s p i n slojem poluvodiča. Paralelni otpor predstavlja gubitke zbog lutajućih struja (engl. leakage current). Ovisi uglavnom o procesu proizvodnje FN ćelije. Na Slika 15 prikazana je realna shema FN ćelije.



Slika 15 Realna shema FN ćelije

Jednadžba koji opisuje realnu FN ćeliju [36]:

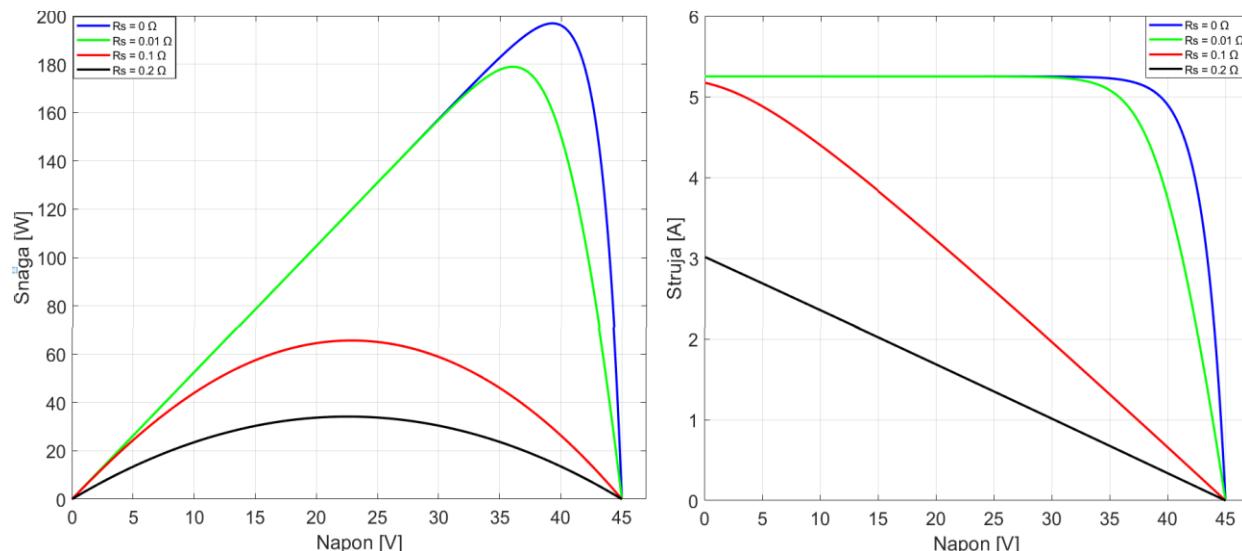
$$I = I_{PH} - I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \quad (29)$$

Na Slika 16 i Slika 17 prikazani su utjecaji paralelnog R_p i serijskog otpora R_s na karakteristike I - U i P - U realnog fotonaponskog panela 180 W ZED mono-kristal sa sljedećim parametrima [37]:

Tablica 2 Parametri 180 W ZED FN panela pri STC [37]

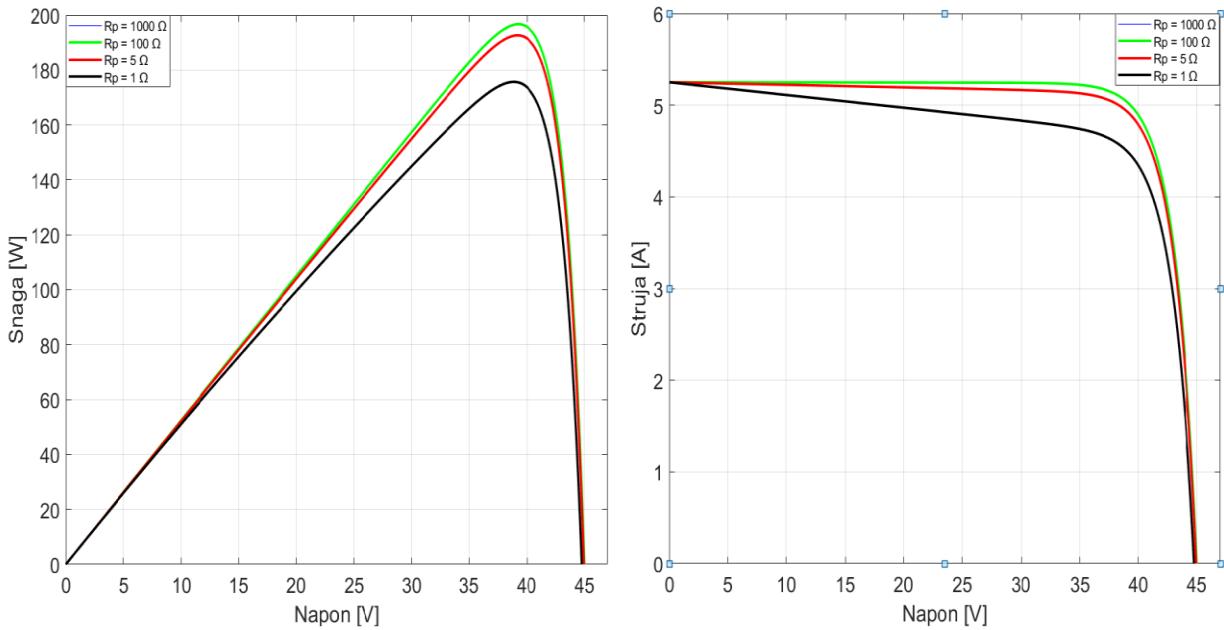
Tehnologija	Kristalni silicij
Broj ćelija u seriji	72
Napon praznog hoda U_{oc}	45 V
Struja kratkog spoja I_{sc}	5.25 A
Napon pri maksimalnoj snazi U_{mp}	36.31 V
Struja pri maksimalnoj snazi I_{mp}	4.98 A
Maksimalna snaga P_{mp}	180 W
Struja zasićenja I_s	1.6595 nA
Temperatura pri standardnim uvjetima	25°C
Sunčev zračenje pri standardnim uvjetima	1000 $\frac{W}{m^2}$

Na Slika 16 (lijevo) vidljivo je kako povećanje R_s znatno smanjuje struju kratkog spoja I_{sc} dok napon kratkog spoja U_{OC} ostaje nepromijenjen. Također, smanjenje struje kratkog spoja vodi i smanjenju proizvedene snage, što je vidljivo na Slika 16 (desno).



Slika 16 Utjecaj serijskog otpora na $P-U$ karakteristiku (lijevo) i $I-U$ karakteristiku (desno) FN panela

Na slici Slika 17 je vidljivo kako smanjenje paralelnog otpora utječe i na smanjenje napona praznog hoda te na smanjenje snage (lijevo), dok struja kratkog spoja ostaje nepromijenjena (desno).



Slika 17 Utjecaj paralelnog otpora na P - U karakteristiku (lijevo) i I - U karakteristiku (desno) FN panela

2.1 Utjecaj sunčevog zračenja i temperature na parametre FN celije

Utjecaj temperature i sunčevog zračenja na fotostruju I_{PH} može se prikazati izrazom [38]:

$$I_{PH} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{SC} + \alpha(T - T_{ref})] \quad (30)$$

pri čemu su: $G \left[\frac{W}{m^2} \right]$ – sunčev zračenje, $G_{ref} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ – sunčev zračenje pri standardnim uvjetima testiranja (engl. STC – standard testing conditions), I_{SC} [A] – struja kratkog spoja pri STC, T_{ref} [K] – temperatura pri STC, $\alpha \left[\frac{mA}{K} \right]$ – temperaturni koeficijent struje.

STC podaci: $G_{ref} = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, $T_{ref} = 25^\circ C$

Utjecaj temperature i sunčevog zračenja na struju zasićenja diode I_S može se prikazati izrazom [39]:

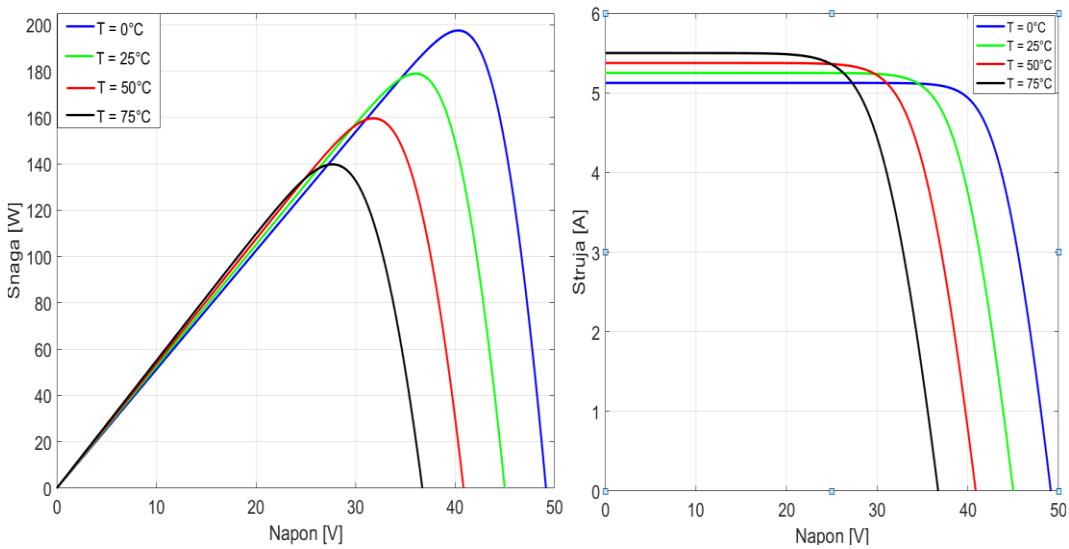
$$I_S = \frac{I_{SC} + \alpha(T - T_{ref})}{e^{\frac{q(U_{OC} + \beta(T - T_{ref}))}{A \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (31)$$

pri čemu su: U_{OC} [V] – napon praznog hoda pri STC, $\beta \left[\frac{mV}{K} \right]$ – temperaturni koeficijent napona.

Uvrštavajući izraze (30) i (31) u izraz (29) dobiva se izraz (32) koji opisuje realnu FN ćeliju u ovisnosti o promjeni temperature i sunčevog zračenja:

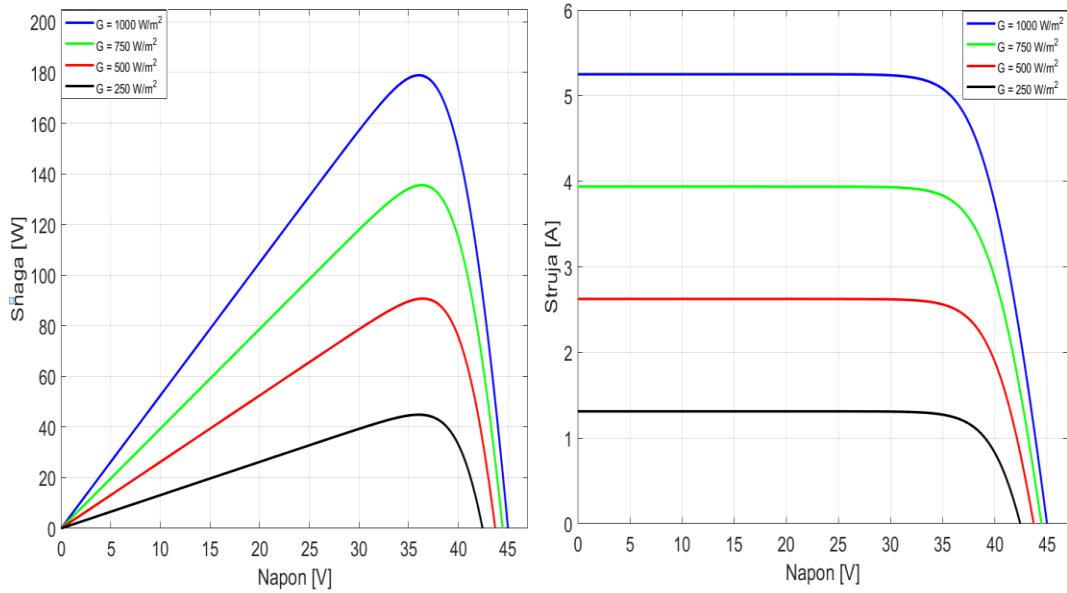
$$I = \frac{G}{G_{ref}} [I_{SC} + \alpha(T - T_{ref})] - \frac{I_{SC} + \alpha(T - T_{ref})}{e^{\frac{q(U_{OC} + \beta(T - T_{ref}))}{A \cdot k \cdot T}} - 1} \left(e^{\frac{q(U + I \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \quad (32)$$

Na Slika 18 prikazan je utjecaj promjene temperature na $I-U$ i $P-U$ karakteristiku FN panela. Može se uočiti kako povećanje temperature FN panela poveća struju kratkog spoja, te smanjuje napon praznog hoda (desno). Smanjenje napona je dosta osjetljivije nego povećanje struje kratkog spoja, stoga se i ukupna proizvedena snaga smanjuje (lijevo).



Slika 18 Utjecaj promjene temperature na P - U karakteristiku (lijevo) i I - U karakteristiku (desno) FN panela

Na Slika 19 prikazan je utjecaj promjene sunčevog zračenja na I - U i P - U karakteristiku FN panela. Smanjenje sunčevog zračenja znatno smanjuje struju kratkog spoja (desno), i snagu FN panela (lijevo).



Slika 19 Utjecaj promjene sunčevog zračenja na P - U karakteristiku (lijevo) i I - U karakteristiku (desno) FN panela

Literatura

- [1] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 2 ur., Wiley, 2012.
- [2] J. G. Slootweg, S. W. H. Haan, H. Polinder i W. L. Kling, »General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 18, pp. 144-151, 2 2003.
- [3] J. G. Slootweg, H. Polinder i W. L. Kling, »Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations,« *IEEE Transactions on Energy Conversion*, svez. 18, pp. 516-524, 12 2003.
- [4] A. Honrubia-Escribano, E. Gómez-Lázaro, J. Fortmann, P. Sørensen i S. Martin-Martinez, »Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: A comprehensive review,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 81, pp. 1939-1952, 1 2018.
- [5] T. Petru i T. Thiringer, »Modeling of wind turbines for power system studies,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 17, pp. 1132-1139, 11 2002.
- [6] V. Akhmatov, »Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power,« 2003.
- [7] G. Abad, J. Lopez, M. A. Rodriguez, L. Marroyo i G. Iwanski, Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation, 1 ur., John Wiley & Sons, 2011.
- [8] K. Clark, N. W. Miller i J. J. Sanchez-Gasca, »Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies,« 2010.
- [9] P. Kundur, Power system stability and control, McGraw-Hill, 1994.
- [10] J. G. Slootweg, H. Polinder i W. L. Kling, »Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator,« u *2001 Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver, 2001.
- [11] J. G. Slootweg, H. Polinder i W. L. Kling, »Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations,« u *Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver, 2001.
- [12] J. G. Slootweg, H. Polinder i W. L. Kling, »Dynamic modelling of a wind turbine with direct drive synchronous generator and back to back voltage source converter and its controls,« u *European Wind Energy Conference*, Copenhagen, 2001.

- [13] P. C. Krause, O. Wasynczuk i S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3 ur., John Wiley & Sons, 2013, p. 676.
- [14] A. D. Hansen, F. Iov, P. E. Sørensen, N. A. Cutululis, C. Jauch i F. Blaabjerg, »Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT,« 2007.
- [15] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen i X. Fu, »Pitch angle control for variable speed wind turbines,« u *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, 2008.
- [16] E. Muljadi, V. Gevorgian i M. Singh, »Understanding Inertial and Frequency Response of Wind Power Plants,« u *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA)*, Denver, 2012.
- [17] L. Holdsworth, J. B. Ekanayake i N. Jenkins, »Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator-based wind turbines,« *Wind Energy*, svez. 7, pp. 21-35, 3 2004.
- [18] K. Watanabe i T. Nanahara, »Study on inertial response of fix-speed wind turbine generator,« u *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Cluj-Napoca, Romania, 2014.
- [19] M. Krpan, »The mathematical model of a wind power plant and a gas power plant,« 2016.
- [20] J. Morren, J. Pierik i S. W. H. Haan, »Inertial response of variable speed wind turbines,« *Electric Power Systems Research*, svez. 76, pp. 980-987, 7 2006.
- [21] Zhang, Sun, J. Lin i G.-J. Li, »Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants,« *IET Renewable Power Generation*, svez. 6, pp. 38-47, 1 2012.
- [22] M. Krpan and I. Kuzle, "Inertial And Primary Frequency Response Model Of Variable-Speed Wind Turbines," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, pp. 844-848, 1 2017.
- [23] P. Tielens i D. V. Hertem, »Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables,« u *6th Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering*, Delft, 2012.
- [24] Z. Wu, W. Gao, T. Gao, W. Yan, H. Zhang, S. Yan i X. Wang, »State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems,« *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, svez. 6, pp. 1-16, 1 2018.

- [25] M. Hwang, E. Muljadi, J. W. Park, P. Sorensen i Y. C. Kang, »Dynamic Droop-Based Inertial Control of a Doubly-Fed Induction Generator,« *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, svez. 7, pp. 924-933, 7 2016.
- [26] N. R. Ullah, T. Thiringer i D. Karlsson, »Support by Variable Speed Wind Turbines — Potential and Applications,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 23, pp. 601-612, 5 2008.
- [27] Y. Wang, J. Meng, X. Zhang i L. Xu, »Control of PMSG-Based Wind Turbines for System Inertial Response and Power Oscillation Damping,« *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, svez. 6, pp. 565-574, 4 2015.
- [28] E. Muljadi, M. Singh i V. Gevorgian, »Fixed-speed and variable-slip wind turbines providing spinning reserves to the grid,« u *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Vancouver, 2013.
- [29] G. Ramtharan, J. B. Ekanayake i N. Jenkins, »Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines,« *IET Renewable Power Generation*, svez. 1, pp. 3-9, 3 2007.
- [30] S. D. Rijcke, P. Tielens, B. Rawn, D. V. Hertem i J. Driesen, »Trading Energy Yield for Frequency Regulation: Optimal Control of Kinetic Energy in Wind Farms,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 30, pp. 2469-2478, 9 2015.
- [31] R. G. Almeida i J. A. P. Lopes, »Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 22, pp. 944-950, 8 2007.
- [32] Z. Wu, W. Gao, J. Wang i S. Gu, »A coordinated primary frequency regulation from Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Generation,« u *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, Denver, 2012.
- [33] K. V. Vidyanandan i N. Senroy, »Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 28, pp. 837-846, 5 2013.
- [34] M. Abbes i M. Allagui, »Participation of PMSG-based wind farms to the grid ancillary services,« *Electric Power Systems Research*, svez. 136, pp. 201-211, 7 2016.
- [35] Ž. D. P. J. B. A. Butković, Elektronika 1, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2006.
- [36] M. V. G. Di Piazza, Photovoltaic Sources: Modelling and Emulation. Photovoltaic Sources, Solar energy, 2013.

- [37] F. U. Nayan, »Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters,,« u *3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET 2015)*, Dhaka, Bangladesh, 11 September, 2015,.
- [38] C. D. A. J. D. M. M. F. C. J. A. Dos Santos, »Contribution of a Computer Tool Using ATP-EMTP TACS to the Modeling of a Photovoltaic (PV) Module,,« u *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, La Coruna, Spain, March 2015.
- [39] S. K. A. S. P. Sumathi, »Solar PV and Wind Energy Conversion Systems,,« u *3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET 2015)*, , Dhaka, Bangladesh, 11 September, 2015.