

EFEKTI POBOLJŠANJA PROGNOZE IZLAZNE SNAGE VETROELEKTRANA**EFFECTS OF WIND FARM POWER FORECAST IMPROVEMENT**Aleksandar Atanasovski, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast - ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu je analizirana prognoza izlazne energije vetroelektrana. Nakon opšteg opisa karakteristika energije vetra i njene konverzije u električnu, dat je pregled dostupnih metoda prognoze kao i njihova uloga u procesu upravljanja elektroenergetskim sistemom. Procenjeni su i pozitivni tehno-ekonomski efekti poboljšanja prognoze na rad sistema i vrednost energije vetra na tržištu.

Ključne reči: Vetroelektrane, prognoza izlazne snage, metode prognoze

Abstract – This paper deals with wind farm power forecasting. After general description of wind power characteristics and conversion into electricity, attention was focused on various power forecasting methods and models. Their importance and role in power system's operation and planning is explained. Benefits of forecast improvements are assessed in respect to reducing the integration problems, improving the power system and increasing the wind power value on the market.

Keywords: Wind farm, power forecasting, forecasting methods

1. UVOD

Globalna želja i potreba čovečanstva za korišćenjem čistih i obnovljivih izvora energije (OIE) uz postepenu smenu elektrana zasnovanih na fosilnim gorivima, dovodi do velikih promena u načinu funkcionisanja elektroenergetskih sistema. Planiranje i upravljanje sistemom, kao i mehanizmi trgovine električnom energijom se prilagođavaju potrebama OIE, koji zbog svoje intermitentne prirode predstavljaju veliki izazov.

Danas je od svih vrsta OIE najviše kapaciteta instalisano za korišćenje energije vetra [1]. Pored velikih benefita, zbog promenljive prirode vetra, odnosno zbog promenljive izlazne snage vetroelektrana, planiranje i upravljanje elektro-energetskim sistemom (EES) znatno je složenije. Da bi se to poboljšalo, razvijaju se različite metode predviđanja ili prognoze energije vetra, koje se više ili manje slaži sa stvarnim parametrima vetra.

Iako je i teoretski nemogućepostići 100% tačnu prognozu, svako njeno poboljšanje donosi niz prednosti. Ovo je već uočeno primenomnajjednostavnije metode, kada je, u odnosu na period bez prognoziranja prosečna srednja kvadratna greška prognoze izlazne snage po satima za dan smanjena sa 30-35% na oko 15-20% [2,3].

NAPOMENA:

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

To je omogućilo primenu vetroelektrana kao (donekle) predvidivog izvora, kojeg je moguće koordinirati sa termo, nuklearnim ili hidro-agregatima na način da se očuva stabilan i pouzdan rad EES-a.

Cilj ovog rada je da razmotri postojeće metode prognoze i uporedi efekte njihove primene na elektro-energetske i ekonomske parametre vetroelektrana.

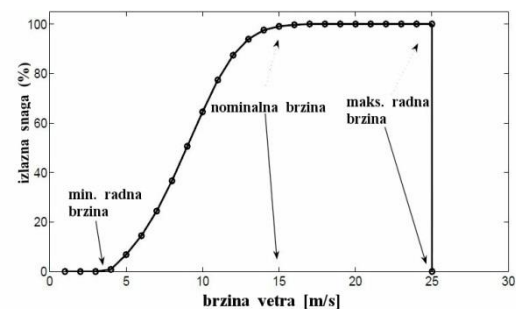
2. PROMENLJIVOST SNAGE VETRA

Mehanička snaga koju vetroturbina razvija na svom vratilu se definiše kao:

$$P_{meh} = C_p P_{vetra} = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

gde je ρ gustina vazduha (standardna gustina pri temperaturi 15°C iznosi $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$), C_p – koeficijent iskorišćenja snage turbine (obično 0,4 – 0,45; max 0,59 Betzova konstanta), A površina kruga koji pri obrtanju prebrišu lopatice, v brzina vetra u m/s.

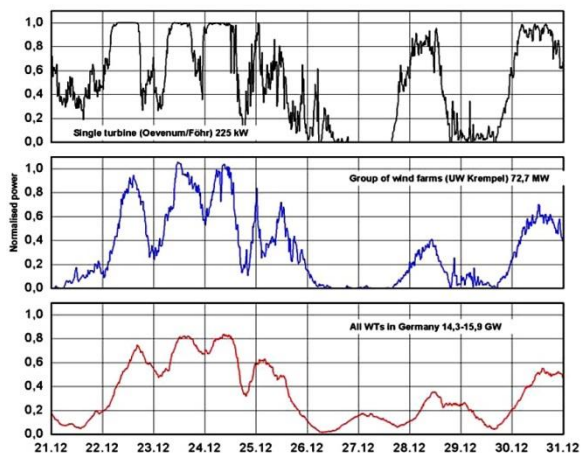
Koliko aktivnu snagu vetrogenerator može razviti pri različitim brzinama vetra proizvođači opisuju karakterističnom „S“ krivom snage (*wind turbine power curve*). Tipična kriva snage prikazana je na slici 1.



Slika 1 - Karakteristika snage vetrogeneratora [4]

Iz izraza (1) se uočava da je brzina vetra dominantna promenljiva koja utiče na izlaznu snagu vetroturbine. Na krivoj snage vetroturbine ta se kubna zavisnost odražava u delu između minimalne i nominalne radne brzine, gde mala promena brzine vetra izaziva velike promene izlazne snage. Samim tim i greška u prognozi brzine vetra (u ovom opsegu) dovodi do još veće greške prognoze izlazne snage vetroturbine, odnosno vetrogeneratora. Kako bi se umanjila ovakva nepredvidivost i prognoziranje olakšalo, proizvodnja električne energije se ne analizira na nivou jedne vetroturbine (VT), nego cele vetroelektrane (VE), a za potrebe sistema se često zajedno posmatraju i grupe vetroelektrana u jednom regionu ili čak celom EES. Time se ukupne varijacije izlazne snage smanjuju (Slika 2), jer se pojedinačne varijacije brzine vetra sa više VT u okviru VE međusobno potiru. Kod objedinjavanja više VE

imamo i pozitivan efekat geografske agregacije pri kojoj je način promene brzine vetra u nekom vremenskom intervalu različit na međusobno udaljenim lokacijama viševetroelektrana.



Slika 2 - Poređenje varijacija izlazne snage pojedinačne vetroturbinе, jedne (ili grupe) vetroelektrana i svih vetroelektrana u jednom EES [2]

Problemi vezani sa integracijom proizvodnje električne energije iz VE uneki EES zavise od toga sa kojim procentom ona učestvuje u ukupnoj proizvedenoj energiji iz svih postojećih izvora u EES-u. Taj udeo se naziva nivo prodora energije vetra (u literaturi se kao sinonimi koriste termini „učestće“, „penetracija“ i sl.). Obično se smatra da su varijacije proizvodnje energije iz VE praktično zanemarljive prema uobičajenim varijacijama potrošnje u sistemu i da ne zahtevaju specijalne mere, dokle god proizvodnja svih VE u jednom sistemu ne prelazi 10% ukupne instalisane snage svih izvora tj. pri niskom nivou prodora snage vetra [2]. Ta granica (do koje se ne očekuje veliki uticaj i problem prilikom integracije energije vetra u sistemu) zavisi pre svega od veličine i fleksibilnosti sistema, tj. postojanja elektrana koje mogu brzo i u velikom rasponu da menjaju izlaznu snagu.

Za upravljanje sistemom su najvažnije tzv. kratkoročne varijacije izlazne snage VE, koje utiču na balans aktivnih snaga u sistemu. U njih spadaju sve one u rasponu od nekoliko sekundi do 24 ili 48 sati, jer se u tom rasponu vrše primarna, sekundarna i tercijarna regulacija aktivnih snaga u sistemu i određuje hidro-termo koordinacija agregata. Takođe, to je vremenski okvir za trgovinu električnom energijom na brzom (spot) tržištu, gde moraju ispoštovati ugovorene količine i plan isporuke energija iz VE, te se njihovoj prognozi posvećuje najviše pažnje.

3. METODE PROGNOZE SNAGE VE

Glavni problem je uspešno prognozirati buduću proizvodnju vetroelektrane na osnovu informacionih skupova sadašnjih i istorijskih poznatih promenljivih.

Neka se ima skup poznatih vrednosti izlazne snage vetroelektrane $\{P_t\}_{t \in T}$, gde je T skup vremenskih indeksa, a P_t snaga VE u trenutku t . Želi se da se predvidi buduća vrednost P u trenutku $t+k$ (k je horizont prognoze), na bazi poznavanja ponašanja procesa $\{P_t\}_{t \in T}$ u ranijem periodu (do trenutka t), tj. implicitno pretpostavljajući da će on nastaviti da se isto ponaša. Matematički to može da se napiše u sledećoj formi [4]:

(2)

$$P_{t+k|t} = g(P_t, \dots, P_{t-l_p}; \xi_t, \dots, \xi_{t-l_\xi}, \hat{\chi}_{t+1|\tau}, \dots, \hat{\chi}_{t+l_\chi|\tau}, \hat{q}_{t+k|t}) + \epsilon_t \\ = g(\Phi'_t, \hat{q}_{t+k|t}) + \epsilon_t \quad (2)$$

gde je ϵ_t beli šum, Φ'_t - informacioni skup promenljivih, a q_t broj dostupnih vetroturbinа. U informacionom skupu su sadržane sve ukupne izlazne snage VE u prošlom periodu (P_t) kao i prošle (ξ) i prognozirane vrednosti eksternih promenljivih ($\hat{\chi}$). Cilj je naći najbolju aproksimaciju funkcije g koja objedinjujući te parametre iz informacionog skupa i prognozu broja dostupnih VT daje izlaznu snagu VE u budućem trenutku $t+k$.

Postoje dva osnovna problema u prognozi izlazne snage dobijene iz vetra. Prvi je transformacija postojećih numeričkih podataka o vremenskim uslovima u izlaznu snagu elektrane, a drugi je pažljiva selekcija faktora iz istorijskih podataka, koji će uticati na proizvodnu snagu u budućnosti. Vremenom su se izdvojila 2 glavna tipa metoda prognoze za rešavanje ovih problema: fizički i statistički [5]. Pored ovih postoje i drugi poput: „naive reference“ - referentni metod, ANN/AI, hibridni i na kraju probabilistički [4,5].

Najjednostavniji metod se naziva „persistence“ prognoza i u suštini je zasnovan na pretpostavci da se vetar u budućem trenutku $t+k$ ponaša tačno onako kako se ponašao do trenutka t kada su poslednji put zabeležene njegove karakteristike, odnosno da će buduća izlazna snaga vetroelektrane biti identična onoj poslednji put izmerenoj [4,5]. Ponekad se koristi i uopštavanje da će buduća vrednost biti jednaka prosečnoj vrednosti prethodnih n merenja. Performanse ovakvog jednostavnog pristupa, gde se uopšte ni ne uzimaju u obzir eksterni parametri terena i atmosfere, drastično opadaju što je taj budući trenutak dalji. Međutim, pokazalo se da u kratkim vremenskim intervalima k (otprilike 4-6 sati) tj. veoma kratkom horizontu prognoze, ovaj metod daje prilično tačne rezultate te se zbog toga on uzima kao referenca za poređenje svih drugih, složenijih i naprednijih metoda [4,5].

Fizičke metode se zasnivaju na obradi meteoroloških podataka pomoću takozvane „parametrizacije“, kojom se stvara statistički model zasnovan na empirijskim podacima o parametrima atmosfere i reljefa (lokalni termalni efekti, turbulencije, aerodinamička dužina hrapavosti okolnog terena itd.) merenim ili procenjenim na tačnoj lokaciji vetroelektrane [5]. Dalje postoje dva pristupa. Prema jednom se koristi logaritamski zakon i procena hrapavosti terena i stepena viskoznoznog trenja vazduha za proračun brzine vetra na tačnoj visini rotora. Drugi pristup je stvaranje vrlo detaljnog modela terena oko vetroelektrane i kretanja fluida oko svake turbine, za šta se koriste *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tehnike modelovanja.

Statističke metode prognoze su zasnovane na jednom ili više modela koji uspostavljaju vezu između istorijskih vrednosti izlazne snage VE, istorijskih i prognoziranih vrednosti meteoroloških parametara i izmerene snage vetra [5]. Ovde se uopšte ne ulazi u objašnjavanje i analiziranje samih fizičkih pojava niti između posmatranih promenljivih mora da postoji neka fizička korelacija. Parametri modela se procenjuju isključivo na osnovu skupa dostupnih istorijskih podataka (bila to brzina vetra ili izlazna snaga iz VE), i redovno tokom

rada u realnom vremenu podešavaju na osnovu trenutnih merenja. Tako dobijen model onda predviđa koje će se vrednosti dobiti u budućnosti.

4. EKONOMSKI EFEKTI POVEĆANJA TAČNOSTI PROGNOZE PROIZVODNJE VE

Realna tržišna vrednost proizvedene energije i njene prognoze se izračunava prema sledećem izrazu [3]:

$$Vrednost = \frac{P_{prog} * C_{ug} + G_{poz} * N_{bpoz} - G_{neg} * N_{bneg}}{P_{up}} \quad (3)$$

gde je: *Vrednost* – fiksna cena koju treba platiti prilikom trgovanja direktnom OTC pogodbom (*Over-the-counter market*), tako da proizvođač električne energije iz VE ima istu zaradu kao da je trgovao energijom na berzi; P_{prog} – prognozirana količina energije vetroelektrane, ugovorena dan pre isporuke; C_{ug} – tržišna cena za tu energiju, ugovorena dan pre isporuke; G_{poz} – greška prognoze kada je realna proizvodnja VE veća od prognozirane (pozitivno odstupanje); N_{bpoz} – naknada za višak energije usled pozitivnog odstupanja u odnosu na prognozu. Ovaj višak energije je moguće prodati na tržištu, ali samo po nižoj ceni, u rasponu 0 - 92% od tržišne cene, tako da je i u ovom slučaju vlasnik VE ima umanjene prihode; G_{neg} – greška prognoze kada je realna proizvodnja VE manja od prognozirane (negativno odstupanje); N_{bneg} – naknada za angažovanu balansnu energiju usled negativnog odstupanja u odnosu na prognozu (Ovde TSO po višoj ceni, do 108% od tržišne, naplaćuje vlasniku energiju koja je morala biti „dokupljena“ da bi se ispunio ugovoreni plan); P_{up} – ukupna proizvedena energija u posmatranom periodu.

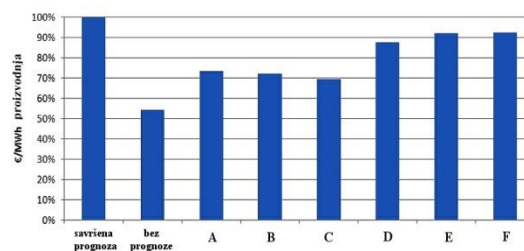
Naknade zbog disbalansa izazvanih greškama u prognozi, koje proizvođač plaća, dovode do gubitka prihoda i smanjenja tržišne vrednosti kompanije. Relativni gubici prihoda (naknade plaćene zbog disbalansa u odnosu na tržišnu cenu) se nazivaju „gubici disbalansa“. U radu su korišćeni podaci dostupni iz dve studije, belgijske [3] i američke [6].

Iz prve studije je na primeru jedne belgijske vetroelektrane snage 8MW, a na osnovu podataka iz 2009. god. analiziran uticaj primene naprednih metoda prognoze. Rezultati su prikazani na slici 3.

Prvo je kao osnova za poređenje izračunata vrednost proizvedene električne energije, koju je moguće postići na tržištu direktnim ugovaranjem u uslovima idealne, 100% tačne prognoze. Ovo je nazvano „savršena prognoza“. Procena tog OTC (*Over-the-Counter*) trgovanja ekvivalenta je 78,3 €/MWh.

Suprotno od toga je teoretska situacija gde se prognoza namerno uopšte ne uvažava (bez prognoze) ili jako retki slučajevi kada se desi da ugovorne strane predlože neku razmenu, ali se taj ugovor ne potvrdi od strane proizvođača/prodavca energije pre nego što se tržište za „dan unapred“ zatvori. U tom, najlošijem slučaju, procenjena OTC vrednost energije je 42,5 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze je 30,9%, i rezultujući gubici disbalansa su čak 46%.

Ostali rezultati prikazani na slici 3, dobijeni kada se primenjuju realne prognoze su sledeći:



Slika 3 - Uticaj poboljšanja prognoze na tržišnu vrednost energije dobijene iz vetra [3]

A. Prognoza je proporcionalna prosečnoj godišnjoj proizvedenoj enegiji na nivou jednog dana – procenjena OTC vrednost energije je 57,5 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze 24%, i rezultujući gubici disbalansa su oko 26,5%.

B. Prognozaprma „*persistence*“ metodi, zasnovanoj na prosečnoj proizvodnji tokom prethodnog dana - procenjena OTC vrednost je 56,5 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze je 26,9%, i rezultujući gubici disbalansa su oko 28%.

C. Prognoza prema „*persistence*“ metodi, zasnovanoj na proizvodnji tokom 2 sata neposredno pre zaključivanja ponude - procenjena OTC vrednost je 54,5 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze je 31,1%, a gubici disbalansa su oko 28%.

D. Prognoza prema savremenim (*state-of-the-art day-ahead*) metodama - procenjena OTC vrednost je 68,6 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze pada na 15,5% i rezultujući gubici disbalansa na 14%.

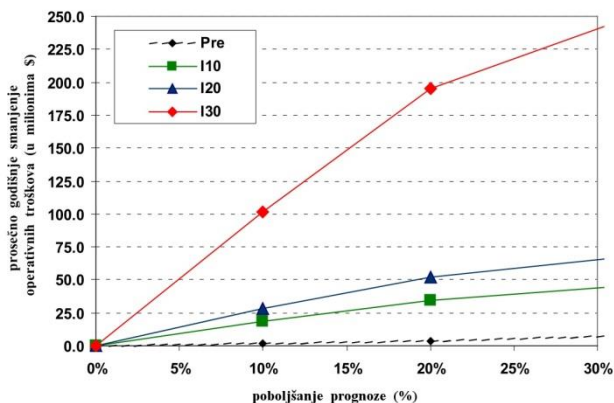
E. Efekti koji se dobijaju savremenim metodama prognoze pri unutar-dnevnom trgovanju, gde se ponude podnose na svaka 4 sata (*4-hour rolling intra-day market*). Procenjena OTC vrednost je oko 72,1 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze pada na 9,2% i rezultujući gubici disbalansa na 8,6%.

F. Efekti koji se dobijaju savremenim metodama prognoze pri unutar-dnevnom trgovanju, gde se ponude se podnose na svaka 2 sata (*2-hour rolling intra-day market*). Procenjena OTC vrednost je oko 72,4 €/MWh, srednja kvadratna greška prognoze pada na 8,5% i rezultujući gubici disbalansa na 7,3%.

Vidi se da je metoda F najbliža idealnoj, savršenoj prognozi i da se njom postižu najmanji gubici disbalansa.

Druga studija [6] je rađena 2011. godine za potrebe američke regulatorne organizacije WECC (*Western Electricity Coordinating Council*). Cilj je bio da se pokaže da li i kolike uštede pri upravljanju sistemom donosi poboljšanje tačnosti postojećih metoda prognoze (onih koje su u vreme analiziranih podataka studije smatrane za „*state of the art*“ - SOA) za 10, 20 i 30%. Pri tome su na osnovu planova izgradnje novih vetrelektrana pretpostavljena 3 moguća scenarija što se tiče budućih nivoa prodora snage vetra u odnosu na postojeće stanje: 10%, 14% i 24%. Efekti poboljšanja tačnosti prognoze su sagledani kroz analizu eksploatacionih troškova, troškova nedostatka operativne rezerve, količine potisnute i neiskorišćene energije.

Na slici 4 prikazano je prosečno godišnje smanjenje eksploatacionih troškova sistema sa poboljšanjem prognoze. Pod eksploatacionim troškovima sistema se podrazumevaju godišnji promenljivi troškovi, pre svega pogonski troškovi stavljanja agregata u pogon i njegovog zaustavljanja, troškovi goriva i promenljivog rada agregata, kao i troškovi održavanja. Tu ne spadaju fiksni troškovi poput investicionih troškova ili vraćanja dugova i sl.



Slika 4 - Prosečno godišnje smanjenje eksploatacionih troškova sistema sa poboljšanjem prognoze [6]

Za scenario I20 (14% učešća energije vetra u WECC) rezultati pokazuju da poboljšanje prognoze od 10% donosi prosečnu uštedu godišnjih eksploatacionih troškova od 28 miliona US dolara (\$, USD), a poboljšanje prognoze za 20% štodi čak 52 miliona \$. Za scenario I30 (24% učešća energije vetra u WECC) rezultati pokazuju da poboljšanje prognoze od 10% donosi prosečnu uštedu godišnjih eksploatacionih troškova od 100 miliona \$, a poboljšanje prognoze za 20% štodi 198 miliona \$.

Nedostatak operativne rezerve je situacija kada u sistemu nema dovoljno dostupnih proizvodnih kapaciteta da se ispune svi zahtevi nametnuti potrebama operativne rezerve. Pri ovoj situaciji proizvodnja energije u sistemu je i dalje dovoljna da podmiri zahteve potrošača, ali je nema dovoljno da popuni propisani nivo npr. rotirajuće regulacione ili havarijske rezerve. Godišnji nedostatak operativne rezerve je ukupna suma svih količina nedostajuće energije tokom radnih sati jedne kalendarske godine. U EES koji i po „klasičnim“ pravilima sigurnosti i pouzdanosti imaju pravilno određenu sigurnosnu marginu kapaciteta operativne rezerve, ovakve situacije se jako retko dešavaju, čak i kada se uvodi energija dobijena iz VE. Stoga su rezultati pokazali zanemarljivo poboljšanje u scenarijima I10 i I20 (prodor snage vetra u sistemu od 10% i 14%) i tek pri scenariju I30 i učešću energije vetra od 24% i više imamo primetne uštede sa poboljšanjem prognoze proizvodnje VE. Tada prosečni godišnji nedostatak operativne rezerve opada sa 43 GWh na 24 GWh sa poboljšanjem prognoze od 10%, i na 15 GWh ako se prognoza poboljša 20%.

Slična je situacija i što se tiče potisnute i neiskorišćene energije, kada se višak energije iz VE odbacuje i ne može da bude prihvaćen u mreži. Rezultati studije pokazuju da poboljšanje „dan-unapred“ prognoze proizvodnje VE nema značajnih efekata za scenarije I10 i I20. Za scenario I30 se dobija daprosečna godišnja potisnuta energija opada sa 655 GWh na 628 GWh (ušteda 4%) sa

poboljšanjem prognoze od 10%, i na 613 GWh (ušteda 6,3%) ako se prognoza poboljša 20%.

5. ZAKLJUČAK

Poslednjih godina načinjeni su veliki pomaci u prognozi izlazne snage VE, usavršavanjem metoda prognoze i primenom savremenih softverskih alata. Iako su fizičke i statističke metode, koje su danas u standardnoj upotrebi širom sveta, već ostvarile značajan napredak u odnosu na najranije i najjednostavnije *persistence* metode, još postoji prostora za poboljšanje tačnosti primenom „stateofheart“ probablističkih, hibridnih metoda, kao i kombinovanjem postojećih.

Srednju kvadratnu grešku prognoze moguće je danas, uz određene uslove, spustiti i ispod 10%. Analizom podataka i primera iz literature pokazano je da i relativno malo smanjenje greške prognoze donosi velike uštede, kako u novcu, tako i u energiji i da je isplativo i vlasnicima/operatorima VE i operatorima sistema i tržišta.

6. LITERATURA

- [1] ***, „WIND IN POWER 2017 - Annual combined onshore and offshore wind energy statistics“, Wind Europe, Brisel, 2018.
- [2] F. Van Hulle, P. Gardner, „Wind Energy - The Facts: Part II – Grid Integration“, EWEA, 2009.
- [3] R. Belmans, W. D’haeseleer, G. Palmers, J.C. Maun, „Balancing wind energy in the grid: an overall, techno-economic and coordinated approach SD/EN/02A Final Report“, Brussels, 2011.
- [4] L. Järvenpää, „Production Planning of a Wind Farm Based on Wind Speed Forecasting“, M.Sc. Thesis, Aalto University, 2010. god.
- [5] P. Pinson, „Estimation of the uncertainty in wind power forecasting“, Ph.D. Thesis, MINES ParisTech, Paris, 2006.
- [6] R. Piwko, G. Jordan, „Impacts of Improved Day-Ahead Wind Forecasts on Power Grid Operations“, GE Energy Consulting, New York, 2011.

Kratka biografija:



Aleksandar Atanasovski rođen je 1986. godine u Smederevu. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije upisao je školske 2004/2005. Na studijama se opredelio za modul Elektroenergetski sistemi i diplomski-master rad odbranio 2018. god.



Vladimir A. Katić, red.prof. rođen je 1954. godine u Novom Sadu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1978. god., a magistrirao i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. i 1991. godine, respektivno. Oblasti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, kvalitet električne energije i električna vozila.