

Izboljšana metoda za oceno zanesljivosti proizvodnje v elektroenergetskem sistemu

Živa Bricman Rejc, Marko Čepin

Laboratorij za električna omrežja in naprave, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25,
1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: ziva.bricman@fe.uni-lj.si, marko.cepin@fe.uni-lj.si

Povzetek. Namen prispevka je predstaviti izboljšano metodo za oceno zanesljivosti proizvodnje v elektroenergetskem sistemu. Nova metoda zajema odpovedi s skupnim vzrokom, s čimer upoštevamo, da lahko proizvodne enote v sistemu odpovedo hkrati zaradi skupnega vzroka, npr. udara strele. Odpovedi s skupnim vzrokom so pomemben del verjetnostnih varnostnih analiz v jedrski, letalski in vesoljski tehniki ter v kemični industriji. Izraz odpoved s skupnim vzrokom je povezan z dogodkom, ko več komponent odpove hkrati zaradi izvirnega vzroka ali zaradi povezovalnega mehanizma, ki ustvari določene okoliščine ali pogoje, pod katerimi lahko pride do odpovedi več komponent hkrati. Predstavljena je matematična definicija metode. Uporaba metode je prikazana na poenostavljenem IEEE testnem modelu elektroenergetskega sistema. Rezultati kažejo, da lahko z uporabo nove metode natančneje definiramo izpade posameznih proizvodnih enot in posledično podrobneje analiziramo zanesljivost proizvodnje v obravnavanem elektroenergetskem sistemu. Rezultati analiz prav tako kažejo, da se ocenjena zanesljivost proizvodnje v elektroenergetskem sistemu zmanjša, če upoštevamo odpovedi s skupnim vzrokom proizvodnih enot.

Ključne besede: odpovedi s skupnim vzrokom, pričakovano tveganje izpada napajanja, zanesljivost proizvodnje v elektroenergetskem sistemu

An improved method for power system generation reliability assessment

The objective of this paper is to present an advanced probabilistic method for estimating power system reliability. The new method allows consideration that several generating units can share the same source of failure, which causes them to fail or become unavailable simultaneously. These improvements are achieved by the implementation of the common-cause failures.

A mathematical derivation of the method is presented. The method is tested on a standard power system. The results show, that if common-cause failures of several generating units are considered, more detailed outage states of generating units can be defined. Consequently, more detailed power system reliability analyses can be performed. The results show that the estimated power system reliability decreases, if common-cause failures of several generating units are considered.

1 UVOD

Zanesljivost je pomembna lastnost elektroenergetskega sistema (EES) in na splošno pomeni verjetnost, da bo opazovani sistem v določenem časovnem intervalu pravilno deloval [1], [2]. S stališča porabnikov električne energije to pomeni, da bo preskrba odjemalcev z električno energijo stalno zagotovljena s konstantno frekvenco in z določenim potekom napetosti

v sistemu, ki mora biti ves čas znotraj dovoljenih meja. V okviru zanesljivosti sta zajeta dva termina: sigurnost EES, ki opisuje odpornost sistema na motnje in je dinamične narave [3], ter zadostnost EES, ki opisuje obstoj zadostnih proizvodnih in prenosnih zmogljivosti v sistemu, da imajo lahko odjemalci kljub motnjam zagotovljeno zahtevano kakovost dobavljene električne energije, in je statične narave [1]. Zanesljivost EES močno vpliva na stroške obratovanja sistema, saj so stroški razpadov EES lahko izjemno visoki. Razpad sistema je povezan z visokimi stroški ponovne vzpostavitve sistema, ki zajemajo popravila in zamenjave okvarjenih komponent, stroške zakupa električne energije doma in v tujini, stroške nedobavljene energije ter stroške odškodnin. Zato je glavni namen ocenjevanja zanesljivosti EES določanje kvantitativnih povezav med investicijami v nadgradnje ter širitve sistema in med posledicami izpadov napajanja odjemalcev ter razpadov sistema [1].

V sklopu analiz zanesljivosti EES so odpovedi komponent upoštevane kot neodvisne druga od druge, kar pa v splošnem ne drži, saj lahko en dogodek ali napaka v sistemu povzroči odpoved več komponent hkrati in s tem ogrozi zanesljivo obratovanje sistema [4]. Odvisne odpovedi komponent lahko opišemo z odpovedmi s skupnim vzrokom, ki so pomemben del

verjetnostnih varnostnih analiz v jedrski, letalski in vesoljski tehniki ter v kemični industriji. Komponente lahko hkrati odpovedo zaradi izvirnega vzroka, npr. napaka istega proizvajalca, ali pa zaradi povezovalnega mehanizma, ki opisuje okoliščine ali pogoje, pod katerimi pride do odpovedi več komponent hkrati, npr. neustrezne vremenske razmere [5]. Odpovedi s skupnim vzrokom imajo velik vpliv na zanesljivost obravnavanega sistema, zato je lahko njihovo upoštevanje v okviru analiz zanesljivosti proizvodnje v EES ključnega pomena.

Glavni namen prispevka je predstaviti izboljšano metodo za oceno zanesljivosti proizvodnje v EES, ki bo upoštevala hkratne odpovedi proizvodnih enot zaradi skupnega vzroka. Izboljšave so narejene z vpeljavo odpovedi s skupnim vzrokom. Ocena zanesljivosti z izboljšano metodo je podrobnejša, saj lahko z vpeljavo nove metode natančneje definiramo izpade posameznih proizvodnih enot.

2 METODA

V analizah zanesljivosti EES so se v prejšnjih desetletjih uporabljali večinoma deterministični pristopi in kriteriji ocenjevanja zanesljivosti [1]. Pri determinističnem ovrednotenju zanesljivosti EES izhajamo iz določenih pogojev in omejitev delovanja sistema. Za različna obratovalna stanja opravimo analize pretokov moči, kratkih stikov in stabilnosti ter določimo odzive sistema na posamezna obratovalna stanja [1]. Deterministična ocena tako poda ugotovitev, ali sistem ustreza kriterijem zanesljivosti ali ne, in ne poda možnosti ocenjevanja stopnje zanesljivosti sistema [1]. Slabost deterministične ocene je v tem, da analize ne upoštevajo naključnih lastnosti sistema, spreminjajočih se zahtev porabnika in naključnih okvar v sistemu. Zato so se v zadnjih letih uveljavile verjetnostne metode za oceno zanesljivosti EES, s katerimi lahko zajamemo veliko mero naključnih dejavnikov [1], [2]. Z verjetnostnim pristopom ocenjevanja zanesljivosti lahko jasno podamo tveganje izpada ene komponente ali celotnega sistema, ocenimo posledice izpada komponent in dobimo vpogled v delovanje celotnega EES [1].

Zaradi kompleksnosti EES se analize zanesljivosti izvajajo na različnih ravneh sistema in ne na EES kot celoti. Oceno zanesljivosti lahko izvedemo na ravni proizvodnih enot, na ravni prenosnega omrežja ali na ravni distribucijskega omrežja [6], [7]. Oceno zanesljivosti v večini primerov podamo z indeksi, ki večinoma odražajo verjetnost prekinitve napajanja, pri čemer eden ali več porabnikov ostane brez električne energije [1].

EES vsebuje veliko komponent, pri čemer je lahko delovanje katerekoli komponente bistvenega pomena za stabilno in zanesljivo obratovanje sistema. Delovanje komponent lahko na splošno opišemo z dvema osnovnima stanjema: stanje delovanja in stanje odpovedi [8]. Posledično lahko definiramo razpoložljivost (A_v) in nerazpoložljivost (U_n) vsake komponente. Razpoložljivost komponente je definirana

kot razmerje med časom delovanja in trajanjem celotnega cikla, nerazpoložljivost pa kot razmerje med časom izpada in trajanjem celotnega cikla [8]. Ti parametri proizvodnih enot so potrebni za oceno zanesljivosti EES z indeksom pričakovanega tveganja izpada napajanja.

2.1 Indeks pričakovanega tveganja izpada napajanja

V verjetnostnih analizah zanesljivosti EES se je v zadnjih letih uveljavil indeks LOLE (Loss of Load Expectation), ki opisuje pričakovano tveganje izpada napajanja in je definiran na ravni proizvodnih enot. Indeks poda tveganje, ki izraža časovno obdobje v daljšem časovnem obdobju, ko predvidena poraba električne energije ni pokrita (npr. število ur v enem letu) [1], [2].

Izpad ene proizvodne enote še ne pomeni izgube porabe, če je trenutna maksimalna obratovalna moč proizvodnih enot v sistemu večja od trenutne porabe. O izpadu porabe govorimo takrat, ko je po izpadu proizvodne enote poraba večja od razpoložljive moči delujočih enot. EES ima na voljo rezervo moči, ki je namenjena regulaciji frekvence in pokrivanju izpada največje proizvodne enote v sistemu. Rezerva moči lahko zadošča za pokrivanje izpada ene ali več enot, to je odvisno od instalirane moči izpadlih enot in od porabe. Izpad proizvodnih enot, ki preseže velikost rezerve, povzroči pričakovano tveganje izpada napajanja, ki ga določa produkt verjetnosti izpada proizvodne enote ali skupine enot in trajanja izpada pokrivanja porabe.

Indeks LOLE je definiran kot [1], [6], [7]:

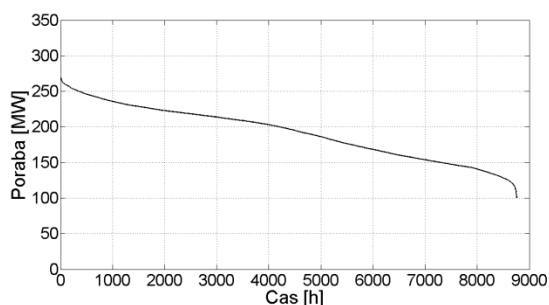
$$LOLE = \sum_{i=1}^n p_i t_i \text{ [ure / leto]}, \quad (1)$$

kjer p_i pomeni verjetnost i -te kombinacije izpadov proizvodnih enot, t_i pa posledičen čas, ko poraba zaradi izpada proizvodnih enot ne bo pokrita. n je število vseh mogočih kombinacij izpadov proizvodnih enot.

Indeks LOLE torej podaja statistično pričakovano število ur v določenem časovnem obdobju, ko poraba ob predvidenih razpoložljivih proizvodnih enotah in ob upoštevanju verjetnosti njihovega izpada ne bo pokrita. Če je vrednost indeksa LOLE manjša ali enaka vnaprej določeni mejni vrednosti, potem lahko obravnavani EES označimo za zanesljiv sistem. V študiji [9] so avtorji postavili to mejo na 10 ur na leto, zato bomo za namen prispevka predpostavili, da je ta vrednost mejna vrednost zanesljivega sistema.

2.1.1 Ovrednotenje indeksa pričakovanega tveganja izpada napajanja

Preprost obravnavan EES vsebuje tri proizvodne enote: A, B in C. Njihove nazivne moči so enake 150 MW, 200 MW in 300 MW, nerazpoložljivosti pa 0,025, 0,03 in 0,025. Slika 1 prikazuje urejen letni diagram porabe za obravnavani sistem.



Slika 1: Urejen letni diagram porabe

Za izračun indeksa LOLE je treba najprej definirati vse mogoče kombinacije izpadov proizvodnih enot in pripadajoče verjetnosti nastopa posameznih dogodkov. V našem primeru lahko izpade vsaka proizvodna enota posamično (A, B ali C), lahko izpadeta dve enoti hkrati (A in B, A in C, B in C), lahko pa izpadejo vse tri enote hkrati (A, B, C). Verjetnost dogodka, ko izpade ena ali več proizvodnih enot, se izračuna kot produkt nerazpoložljivosti izpadlih enot in razpoložljivosti enot v obratovanju. Glede na vsako kombinacijo izpada proizvodnih enot se iz urejenega letnega diagrama porabe odčita čas, ko zaradi izpadle moči poraba ne bi bila pokrita.

Tabela 1 prikazuje izračun indeksa LOLE in vsebuje vse mogoče kombinacije izpadov proizvodnih enot, verjetnosti posameznih izpadov in ocenjen čas nepokrivanja porabe za vsak izpad.

Tabela 1: Ovrednotenje indeksa LOLE

Izpadle enote	Izpadla moč [MW]	Verjetnost izpada p_i	t_i [h]	$p_i \cdot t_i$ [h]
0	0	$Av_A \cdot Av_B \cdot Av_C = 0,9221$	0	0
C	300	$Av_A \cdot Av_B \cdot Un_C = 0,0236$	0	0
B	200	$Av_A \cdot Un_B \cdot Av_C = 0,0285$	0	0
B C	500	$Av_A \cdot Un_B \cdot Un_C = 0,0007$	7293	5,1051
A	150	$Un_A \cdot Av_B \cdot Av_C = 0,0236$	0	0
A C	450	$Un_A \cdot Av_B \cdot Un_C = 0,0006$	4199	2,5194
A B	350	$Un_A \cdot Un_B \cdot Av_C = 0,0007$	0	0
A B C	650	$Un_A \cdot Un_B \cdot Un_C = 0,000019$	8760	0,1664
LOLE 7,79 h/leto				

Indeks LOLE je ocenjen kot 7,79 ure na leto. Ob takšni konfiguraciji sistema bo preskrba odjemalcev v enem letu prekinjena za 7,79 ure. Ker je vrednost indeksa pod dovoljeno mejo, lahko opazovani sistem označimo kot zanesljiv.

2.2 Odpovedi s skupnim vzrokom

Izraz odpoved s skupnim vzrokom je povezan z dogodkom, ko odpove več komponent hkrati zaradi skupnega vzroka [10], [11], [12]. Analize odpovedi s skupnim vzrokom se uporabljajo v analizah zanesljivosti visokozanesljivih sistemov, kot so npr. varnostni sistemi jedrskih elektrarn. Prav tako se uporabljajo v analizah zanesljivosti sistemov z večjim številom redundantnih komponent, ki so vezane vzporedno in s tem dajejo podporo druga drugi, če ena komponenta odpove. Posledično lahko odpovedi s skupnim vzrokom močno ogrozijo prednosti redundance, če neodvisnost in raznolikost komponent nista v zadostni meri zagotovljeni [13].

Komponente lahko odpovedo hkrati zaradi nekega izvornega vzroka, npr. napake istega proizvajalca opreme. Z identifikacijo izvornega vzroka lahko naslednje odpovedi s skupnim vzrokom preprečimo. Komponente pa lahko odpovedo druga za drugo v krajših časovnih presledkih. Vzrok takšne skupne odpovedi lahko opišemo s povezovalnim mehanizmom, ki opisuje okoliščine ali pogoje, pod katerimi odpove več komponent hkrati, npr. neugodni vremenski vplivi [10], [11].

Odpovedi s skupnim vzrokom temeljijo na določenih lastnostih komponent, ki lahko povzročijo njihovo hkratno odpoved, in jih lahko razdelimo v skupine glede na podoben način obratovanja, skupnega proizvajalca, lokacijo ali način vzdrževanja komponent [5].

Odpoved posamezne komponente v sistemu lahko opišemo z osnovnim dogodkom, ki ima predpisano določeno verjetnost odpovedi. Metode za ovrednotenje odpovedi s skupnim vzrokom predvidevajo, da osnovni dogodek, ki opisuje način odpovedi komponente, združuje vplive vseh individualnih odpovedi in vseh odpovedi s skupnim vzrokom [10]. Pri eksplicitnem upoštevanju odpovedi s skupnim vzrokom se tak osnovni dogodek razbije na dva dela: en del opisuje individualno odpoved komponente, drugi del pa opisuje odpovedi komponente zaradi skupnih vzrokov [13]. Skupna verjetnost odpovedi komponente ostane nespremenjena, verjetnost individualne odpovedi in verjetnosti odpovedi s skupnim vzrokom pa so definirane z metodami za ovrednotenje odpovedi s skupnim vzrokom.

Metode, ki se najpogosteje uporabljajo za oceno odpovedi s skupnim vzrokom, so lahko definirane z enim (Metoda Beta faktorja) ali z več parametri (Metoda Alfa faktorja in Metoda grških črk). Metoda Beta faktorja je preprosta in hkrati tudi prva razvita metoda za ovrednotenje odpovedi s skupnim vzrokom, medtem ko Metoda Alfa faktorja in Metoda grških črk omogočata podrobnejšo definicijo in analizo odpovedi s skupnim vzrokom [10], [11], [13].

V sklopu izboljšane metode za oceno zanesljivosti proizvodnje v EES bomo za oceno odpovedi s skupnim vzrokom uporabili Metodo Beta faktorja. Glavna predpostavka Metode Beta faktorja je, da znotraj ene

skupine velja stalna vrednost faktorja β . Iz tega sledi, da imajo vse komponente dodan model odpovedi s skupnim vzrokom, ki ima enako vrednost verjetnosti, čeprav so v praksi vrednosti lahko glede na komponento različne [13]. Metoda prav tako predvideva, da ob nastopu določenega skupnega vzroka vse komponente znotraj skupine odpovedo.

Glede na definicijo odpovedi s skupnim vzrokom je celotna verjetnost odpovedi komponente K definirana kot [10]:

$$q_K = q_{Kind} + q_{CCF}, \quad (2)$$

kjer je q_{Kind} verjetnost odpovedi komponente K zaradi individualnih razlogov, q_{CCF} pa verjetnost odpovedi komponente zaradi skupnega vzroka skupaj z drugimi komponentami. Če so odpovedi s skupnim vzrokom ovrednotene z Metodo Beta faktorja, sta individualna verjetnost odpovedi in verjetnost odpovedi zaradi skupnega vzroka definirani kot [10]:

$$q_{Kind} = (1 - \beta)q_K \quad (3)$$

$$q_{CCF} = \beta q_K \quad (4)$$

Vrednost parametra β je ocenjena med 0 in 1 in navadno znaša okoli 0,1. Če je vrednost β enaka 0,1, potem odpovedi s skupnim vzrokom predstavljajo 10 odstotkov vseh odpovedi komponente. Če je vrednost β enaka 0, potem odpovedi s skupnim vzrokom niso upoštevane [4].

Zaradi podobnih lastnosti posameznih komponent znotraj ene skupine komponent, ki lahko odpovedo zaradi skupnega vzroka, lahko na splošno vsem osnovnim dogodkom, ki opisujejo njihove odpovedi, predpišemo enako verjetnost odpovedi. Če so verjetnosti odpovedi komponent različne, lahko uporabimo približek, ki ga ovrednotimo kot srednjo vrednost vseh verjetnosti odpovedi [5].

2.2.1 Vpeljava odpovedi s skupnim vzrokom v indeks pričakovanega tveganja izpada napajanja (LOLE)

Odpovedi s skupnim vzrokom lahko vpeljemo v definicijo indeksa LOLE. S tem zajamemo tudi tiste kombinacije izpadov proizvodnih enot, kjer pride do odpovedi več agregatov znotraj ene elektrarne ali več elektrarn hkrati zaradi skupnega vzroka. Eden izmed mogočih skupnih vzrokov so neugodne vremenske razmere, kot je udar strele [4]. Ta lahko povzroči odpoved več agregatov v elektrarni, če strela udari v stikališče elektrarne. Prav tako lahko udar strele povzroči izpad več elektrarn v opazovanem EES, če strela udari v glavno razdelilno transformatorsko postajo ali vod, ki povezuje elektrarne s preostalim delom sistema. Drugi skupni vzroki, ki lahko povzročijo odpoved več proizvodnih enot hkrati, so še enak način vzdrževanja ali obratovanja proizvodnih enot ter uporaba opreme istega proizvajalca. Ti vzroki lahko povzročijo hkratne odpovedi proizvodnih enot, ki so lahko locirane na različnih koncih opazovanega EES.

Predpostavimo, da lahko v opazovanem sistemu dve proizvodni enoti odpovesta hkrati zaradi skupnega

vzroka, npr. udara strele. Za pravilno vpeljavo odpovedi s skupnim vzrokom v indeks LOLE je treba v kombinacijah izpadov proizvodnih enot poiskati tiste izpade, pri katerih ti dve proizvodni enoti odpovesta hkrati. Ti dogodki zahtevajo podrobnejšo analizo.

V skladu z definicijo odpovedi s skupnim vzrokom omenjeni dogodki vsebujejo vplive vseh individualnih odpovedi in vseh odpovedi s skupnim vzrokom. Posledično lahko ta dogodek razširimo z dvema dogodkoma. Pri prvem predpostavimo, da proizvodni enoti odpovesta hkrati zaradi individualnih razlogov, pri drugem dogodku pa, da odpovesta hkrati zaradi skupnega vzroka. Posledično njuni nerazpoložljivosti ovrednotimo z izbrano metodo za ovrednotenje odpovedi s skupnim vzrokom, v našem primeru z Metodo Beta faktorja:

$$Un = Un_{ind} + Un_{CCF} \quad (5)$$

$$Un_{ind} = (1 - \beta)Un \quad (6)$$

$$Un_{CCF} = \beta Un, \quad (7)$$

kjer je Un celotna nerazpoložljivost proizvodne enote, Un_{ind} je nerazpoložljivost proizvodne enote zaradi individualnih vzrokov odpovedi, Un_{CCF} je nerazpoložljivost proizvodne enote zaradi odpovedi s skupnim vzrokom, β pa je parameter, ki pove, kolikšen delež vseh odpovedi proizvodne enote predstavljajo odpovedi s skupnim vzrokom.

Verjetnost dogodka i -te kombinacije izpadov, kjer proizvodni enoti, ki lahko odpovesta zaradi skupnega vzroka, odpovesta hkrati, je bila predhodno definirana kot:

$$p_i = \prod_{a \in A} Un_a \cdot \prod_{b \in B} Un_b \cdot \prod_{c \in C} Av_c, \quad (8)$$

kjer Un_a pomeni celotno nerazpoložljivost a -te proizvodne enote, ki lahko odpove zaradi skupnih vzrokov. A pomeni množico proizvodnih enot, ki lahko odpovedo zaradi skupnih vzrokov. Un_b je nerazpoložljivost b -te izpadle proizvodne enote, kjer je B množica proizvodnih enot, ki v i -ti kombinaciji izpadov izpadejo. Av_c je razpoložljivost c -te proizvodne enote v obratovanju tekom i -te kombinacije izpadov. C je množica proizvodnih enot, ki obratujejo v i -ti kombinaciji izpadov. Pri tem velja, da je $A \cap B = 0$, $A \cap C = 0$ in $B \cap C = 0$.

Z vpeljavo odpovedi s skupnim vzrokom je obravnavan dogodek razširjen z dvema dogodkoma, ki imata verjetnosti enaki:

$$p_{i_ind} = \prod_{a \in A} Un_{ind,a} \cdot \prod_{b \in B} Un_b \cdot \prod_{c \in C} Av_c \quad (9)$$

$$p_{i_CCF} = Un_{CCF,A} \cdot \prod_{b \in B} Un_b \cdot \prod_{c \in C} Av_c, \quad (10)$$

kjer je $Un_{ind,a}$ nerazpoložljivost a -te proizvodne enote izpostavljene odpovedim s skupnim vzrokom zaradi individualnih vzrokov odpovedi in $Un_{CCF,A}$ je nerazpoložljivost proizvodnih enot zaradi odpovedi s

skupnim vzrokom. Predviden čas nepokrivanja porabe (t_i) znaša pri obeh na novo definiranih dogodkih enako kot prej, ko odpovedi s skupnim vzrokom niso bile upoštevane.

Če upoštevamo odpovedi s skupnim vzrokom v sklopu analiz zanesljivosti proizvodnje v EES, se matematični model opazovanega sistema spremeni. Posledično lahko podrobneje definiramo izpade posameznih proizvodnih enot in izvedemo natančnejše analize zanesljivosti proizvodnje v EES. Tako lahko enačbo (1) razširimo:

$$LOLE = \sum_{f \in F} p_f t_f + \sum_{g \in G} (p_{g_ind} + p_{g_CCF}) t_g \quad [h / leto], \quad (11)$$

kjer f označuje f -to kombinacijo izpadov proizvodnih enot znotraj množice F , ki pomeni množico vseh kombinacij izpadov proizvodnih enot, kjer izpadi medsebojno odvisnih enot niso vsebovani. G je množica vseh kombinacij izpadov proizvodnih enot, kjer medsebojno odvisne proizvodne enote izpadejo hkrati, g pa je g -ta kombinacija izpadov v množici G . Tako sta p_f in t_f verjetnost izpada proizvodnih enot v f -ti kombinaciji izpadov v množici F in posledični čas izpada pokrivanja porabe, p_{g_ind} je verjetnost izpada medsebojno odvisnih proizvodnih enot g -te kombinacije izpadov v množici G zaradi individualnih vzrokov ter p_{g_CCF} je verjetnost izpada medsebojno odvisnih proizvodnih enot g -te kombinacije izpadov zaradi odpovedi s skupnim vzrokom. t_g je predviden čas nepokrivanja porabe za g -to kombinacijo izpadov proizvodnih enot v množici G .

Za ustrezno vpeljavo odpovedi s skupnim vzrokom v analize zanesljivosti proizvodnje v EES morajo biti na voljo podatki, s katerimi lahko pravilno ovrednotimo odpovedi s skupnim vzrokom. Odpovedi proizvodnih enot do zdaj niso bile tako podrobno opazovane, da bi lahko preprosto določili, kolikšen delež vseh odpovedi predstavljajo odpovedi s skupnim vzrokom. Zato bomo v prispevku uporabili posplošene podatke, pri čemer bomo parametru β predpisali vrednost 0,1. Če bi bili na voljo natančnejši podatki o vzrokih izpadov proizvodnih enot za daljše časovno obdobje, bi lahko parameter β za namen prispevka ustrezno določili. Za določanje parametra β v nekaterih primerih pa se lahko uporabijo statistični podatki tudi iz drugih virov, kot je za primer udara strele beleženje števila in lokacij atmosferskih razelektritev.

2.2.2 Ovrednotenje indeksa pričakovanega tveganja izpada napajanja (LOLE) ob vpeljavi odpovedi s skupnim vzrokom

Predpostavimo, da lahko v EES, ki smo ga obravnavali v razdelku 2.1.1, proizvodni enoti A in C odpovesta zaradi skupnega vzroka, npr. udara strele. Kot je predstavljeno v prejšnjem razdelku, moramo nerazpoložljivosti enot A in C ovrednotiti z metodo za

ovrednotenje skupnih vzrokov (v našem primeru z Metodo Beta faktorja). Faktorju β bomo pripisali vrednost 0,1.

$$Un_A = Un_C = Un = 0,025 \quad (12)$$

$$Un_{Aind} = Un_{Cind} = (1 - \beta)Un = 0,0225 \quad (13)$$

$$Un_{AC_CCF} = \beta Un = 0,0025 \quad (14)$$

Zdaj vse dogodke v definiciji indeksa LOLE, kjer proizvodni enoti A in C izpadeta hkrati, razširimo z dvema dogodkoma: z enim, kjer enoti hkrati izpadeta zaradi individualnih vzrokov in enim, kjer enoti hkrati izpadeta zaradi skupnega vzroka. V definiciji kazalnika LOLE sta dva dogodka, ki ju je treba razširiti: dogodek, kjer enoti A in C izpadeta, enota B pa obratuje, in dogodek, kjer vse tri proizvodne enote izpadejo hkrati. Tabela 2 prikazuje ovrednotenje indeksa LOLE, pri čemer so upoštevane odpovedi s skupnim vzrokom proizvodnih enot A in C.

Tabela 2: Ovrednotenje indeksa LOLE z upoštevanjem odpovedi s skupnim vzrokom

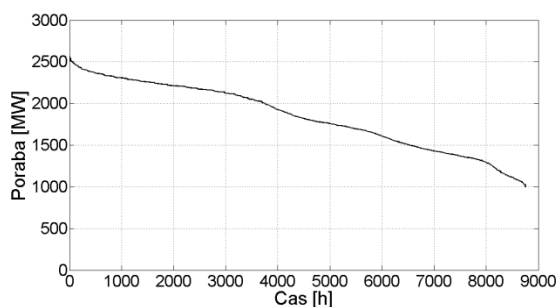
Izpadle enote	Izpadla moč [MW]	Verjetnost izpada p_i	t_i [h]	$p_i \cdot t_i$ [h]
0	0	$Av_A \cdot Av_B \cdot Av_C = 0,9221$	0	0
C	300	$Av_A \cdot Av_B \cdot Un_C = 0,0236$	0	0
B	200	$Av_A \cdot Un_B \cdot Av_C = 0,0285$	0	0
B C	500	$Av_A \cdot Un_B \cdot Un_C = 0,0007$	7293	5,1051
A	150	$Un_A \cdot Av_B \cdot Av_C = 0,0236$	0	0
Aind Cind	450	$Un_{Aind} \cdot Av_B \cdot Un_{Cind} = 0,0005$	4199	2,0995
AC_CCF	450	$Un_{AC_CCF} \cdot Av_B = 0,0024$	4199	10,0776
A B	350	$Un_A \cdot Un_B \cdot Av_C = 0,0007$	0	0
Aind Cind B	650	$Un_{Aind} \cdot Un_B \cdot Un_{Cind} = 0,000015$	8760	0,1314
AC_CCF B	650	$Un_{AC_CCF} \cdot Un_B = 0,0001$	8760	0,876

LOLE 18,29 h/leto

Rezultati kažejo, da če upoštevamo odpovedi s skupnim vzrokom proizvodnih enot A in C, se vrednost indeksa LOLE poveča za več kot 100 %, na vrednost 18,29 ure na leto. Sklepamo lahko, da opazovani EES ni zanesljiv, kot je bilo prvotno predvideno. Za doseganje želene zanesljivosti proizvodnje v EES bi lahko predlagali ustrezne izboljšave sistema oz. bi v sistemu zagotovili dodatno rezervo delovne moči, ki je lahko zagotovljena z baterijami in s shranjevalniki energije, s črpalnimi hidroelektrarnami, lahko pa jo zagotovimo z uvozom iz tujine.

3 PRIMER UPORABE NOVE METODE

Novo metodo smo preizkusili na IEEE-96 RTS EES. IEEE-96 RTS je fiktiven EES, namenjen analizam zanesljivosti, in je sestavljen iz 24 vozlišč (stikališč). V sistemu je priključenih 32 proizvodnih enot s skupno instalirano močjo 3405 MW [7]. Slika 2 prikazuje urejen letni diagram porabe za obravnavani EES.



Slika 2: Urejen letni diagram porabe

Če bi upoštevali vseh 32 proizvodnih enot posamično, bi pri izračunu indeksa LOLE dobili več kot 4 milijarde kombinacij izpadov proizvodnih enot. Zato smo v primerih, kjer je na eno stikališče priključenih več proizvodnih enot, nadomestili te proizvodne enote z nadomestno enoto. Poenostavljen EES tako vsebuje 10 nadomestnih proizvodnih enot.

Instalirana moč ene nadomestne enote je enaka vsoti moči vseh priključenih enot. Kjer so reaktance

Tabela 3: Vpliv odpovedi s skupnim vzrokom na indeks LOLE

Proizvodne enote, ki lahko odpovejo zaradi skupnih vzrokov	Skupna instalirana moč enot [MW]	Izvorni vzrok/povezovalni mehanizem	LOLE [h/leto]	Absolutna razlika LOLE [h/leto]	Relativna razlika LOLE [%]
/	0	/	25,23	0	0
{G2, G3}	489,50	udar strele	26,35	1,12	4,44
{G1, G3}	489,50	udar strele	26,91	1,68	6,66
{G7, G9}	700	enak način vzdrževanja opreme	27,59	2,36	9,35
{G1, G2, G3}	679	udar strele	27,82	2,59	10,27
{G7, G8}	800	enak način vzdrževanja opreme	28,16	2,93	11,61
{G1, G3}; {G7, G9}	1189,50	udar strele; enak način vzdrževanja opreme	28,71	3,48	13,79
{G7, G10}	1060	enak način vzdrževanja opreme	33,12	7,89	31,27
{G8, G9, G10}	1360	enak način vzdrževanja opreme	46,55	21,32	84,50
{G1, G2, G3}; {G8, G9, G10}	2039	udar strele; enak način vzdrževanja opreme	49,13	23,90	94,73
{G7, G8, G9, G10}	1760	enak način vzdrževanja opreme	58,21	32,98	130,72
{G1, G2, G3}; {G7, G8, G9, G10}	2439	udar strele; enak način vzdrževanja opreme	60,79	35,56	140,94

Rezultati kažejo, da se indeks LOLE ob upoštevanju odpovedi s skupnim vzrokom poveča. Tem več proizvodnih enot kot lahko odpove zaradi skupnega vzroka, tem večja je rast indeksa LOLE.

V nekaterih primerih se indeks LOLE poveča le za nekaj odstotkov v primerjavi z izhodiščnim modelom sistema, ko odpovedi s skupnim vzrokom niso upoštevane. Majhen dvig indeksa je zaradi zanesljive in stabilne proizvodnje velikih proizvodnih enot, npr. G10, katerih obratovanje ni ogroženo z odpovedmi s skupnim vzrokom.

priključenih enot različne, smo moči nadomestnih enot ustrezno preračunali glede na podane reaktance. Nerazpoložljivosti nadomestnih enot smo ovrednotili kot povprečno vrednost nerazpoložljivosti vseh priključenih proizvodnih enot.

Indeks LOLE za takšno konfiguracijo sistema znaša 25,23 ure na leto. Ker je vrednost indeksa višja od uporabljene mejne vrednosti 10 ur na leto, lahko obravnavan sistem označimo za nezanesljiv. Za doseganje večje zanesljivosti obratovanja sistema bi lahko predlagali višjo rezervo moči v sistemu, npr. višji uvoz iz tujine, prav tako bi lahko predlagali ustrezne nadgradnje sistema.

Tabela 3 prikazuje, kako upoštevanje odpovedi s skupnim vzrokom različnih proizvodnih enot vpliva na zanesljivosti proizvodnje opazovanega EES. Vsaka vrstica je svoj primer upoštevanja odpovedi s skupnim vzrokom. Prvi stolpec vsebuje proizvodne enote, ki lahko odpovedo zaradi skupnega vzroka, drugi stolpec vsebuje njihovo skupno instalirano moč in tretji stolpec vsebuje informacije o izvornem vzroku oz. povezovalnem mehanizmu, zaradi katerega lahko odpovedo proizvodne enote hkrati. Četrty stolpec vsebuje vrednosti indeksa LOLE, če so odpovedi s skupnim vzrokom upoštevane, peti in šesti stolpec pa vsebujeta absolutno in relativno razliko indeksa LOLE v primerjavi z izhodiščnim modelom sistema, ko odpovedi s skupnim vzrokom niso upoštevane.

V nekaterih primerih pa se indeks LOLE poveča tudi za več kot 100 %. Tako je npr. tedaj, ko lahko enote G1, G2 in G3 odpovedo zaradi skupnega vzroka, hkrati pa so tudi enote G7, G8, G9 in G10 izpostavljene odpovedim s skupnim vzrokom. Vrednost indeksa LOLE se poveča predvsem zato, ker so proizvodne enote G7, G8, G9 in G10 velike proizvodne enote, ki v sistemu predstavljajo glavni delež stabilne proizvodnje električne energije. Če je obratovanje takšnih proizvodnih enot ogroženo z odpovedmi s skupnim vzrokom, je posledično ogrožena zanesljivost celotnega EES. S tem se kaže prednost uporabe predstavljene

metode, saj brez upoštevanja odpovedi skupnim vzrokom ne moremo zajeti takšnih kritičnih dogodkov. Upoštevanje odpovedi s skupnim vzrokom kaže, da je lahko vrednost indeksa LOLE pravzaprav veliko večja in da je zanesljivosti proizvodnje v EES veliko manjša, kot je bilo prvotno predvideno. Posledično tudi predlagane nadgradnje in širitve sistema ter predlagan večji uvoz električne energije ne bi izboljšal zanesljivosti proizvodnje v opazovanem EES.

Upoštevanje odpovedi s skupnim vzrokom v analizah zanesljivosti proizvodnje v EES je ključnega pomena, saj omogoča podrobnejšo definicijo izpadov posameznih proizvodnih enot in podrobnejšo analizo zanesljivosti proizvodnje v EES. Vpeljava odpovedi s skupnim vzrokom lahko poda podrobnejše informacije o stabilnosti opazovanega EES, o morebitni dodatni rezervi moči v sistemu ter o morebitnih nadgradnjah in širitvah sistema.

4 SKLEP

Glavni namen prispevka je bil predstaviti novo metodo za oceno zanesljivosti proizvodnje v EES. Nova metoda upošteva, da lahko proizvodne enote v sistemu odpovedo hkrati zaradi skupnega vzroka, npr. udara strele. Izboljšave so narejene z vpeljavo odpovedi s skupnim vzrokom.

Rezultati kažejo, da se zanesljivost proizvodnje v opazovanem EES zmanjša, če v analizah upoštevamo odpovedi s skupnim vzrokom. Rezultati prav tako kažejo, da tem več proizvodnih enot kot lahko odpove zaradi skupnih vzrokov, tem nižjo oceno zanesljivosti proizvodnje v opazovanem EES dobimo. Upoštevanje odpovedi s skupnim vzrokom je izjemnega pomena v analizah zanesljivosti proizvodnje v EES, saj omogoča podrobnejšo definicijo izpadov posameznih proizvodnih enot. Vpeljava odpovedi s skupnim vzrokom prav tako omogoča natančnejšo analizo zanesljivosti proizvodnje v EES, poda podrobnejše informacije o stabilnosti opazovanega EES, o morebitni dodatni rezervi moči v sistemu ter o morebitnih nadgradnjah in širitvah sistema.

Za ustrezno obravnavno odpovedi s skupnim vzrokom v analizah zanesljivosti proizvodnje v EES morajo biti na voljo podatki, s katerimi lahko pravilno ovrednotimo odpovedi s skupnim vzrokom. Odpovedi proizvodnih enot do zdaj niso bile tako podrobno opazovane, da bi lahko preprosto določili, kolikšen delež vseh odpovedi predstavljajo odpovedi s skupnim vzrokom. Zato smo v prispevku uporabili posplošene podatke. Če bi realni podatki za obstoječe EES obstajali, bi lahko natančneje določili vpliv odpovedi skupnim vzrokom na zanesljivost proizvodnje v EES. Ker indeks LOLE podaja verjetnostno oceno tveganja izpada napajanja, bi s predstavljen metodo lahko določili morebitne posledice hkratnih odpovedi lokacijsko razpršenih stabilnih virov ali več agregatov ene elektrarne.

Negotovost rezultatov analiz zanesljivosti proizvodnje v EES brez upoštevanja odpovedi s skupnim vzrokom je relativno majhna, saj obstaja zadostna količina

potrebnih podatkov za ovrednotenje zanesljivosti proizvodnje v EES. Negotovost rezultatov se lahko znatno poveča, če upoštevamo odpovedi s skupnim vzrokom. Negotovosti podatkov za ovrednotenje odpovedi s skupnim vzrokom lahko vplivajo na negotovost vrednosti indeksa LOLE. Pri tem igra negotovost parametra β ključno vlogo. Zato bodo aktivnosti v prihodnje osredinjene na zmanjšanje negotovosti rezultatov.

LITERATURA

- [1] J. Voršič, T. Zorič, M. Horvat "Izračun obratovalnih stanj v elektroenergetskih omrežjih", *Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko*, 2009.
- [2] M. Čepin, "Assessment of Power System Reliability, Methods and Applications", *Springer-Verlag*, 2011.
- [3] U. Kerin, G. Bizjak, "Ocena dinamične sigurnosti elektroenergetskih sistemov s pomočjo digitalne simulacije", *Elektrotehniški vestnik 73 (4)*, 201-206, 2006.
- [4] Ž. Bricman Rejc, M. Čepin, "Advanced power system reliability assessment", *Proceedings of NENE 2012*, 2012.
- [5] Ž. Bricman Rejc, M. Čepin, "Extension of common-cause analysis", *Proceedings of PSAM 11 & ESREL 2012*, 2012
- [6] G. J. Anders, "Probability concepts in electric power systems", *J. Wiley & Sons*, 1990.
- [7] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Second edition, *Plenum Press*, 1996.
- [8] B. Gjorgiev, D. Kančev, M. Čepin, "A new model for optimal generation scheduling of power system considering generation units availability", *Electrical Power and Energy Systems 47*, 129-139, 2013.
- [9] M. Pantoš, M. Rejc, D. Brečević, A. Bučar, S. Cervenik, "Ocena dolgoročne zanesljivosti oskrbe z energijo v Republiki Sloveniji, Končno poročilo", *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko*, 2007.
- [10] NUREG/CR-4780 EPRI NP-5613, Vol.1 & Vol.2., "Procedures for Treating Common-Cause Failures in Safety and Reliability Studies", *US Nuclear Regulatory Commission*, 1987.
- [11] NUREG/CR-5485, "Guidelines on Modeling Common-Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment", *US Nuclear Regulatory Commission*, 1998.
- [12] M. Čepin, A. Volkanovski, "Nova faktorja pomembnosti v elektroenergetskih sistemih", *Elektrotehniški vestnik 76 (4)*, 177-181, 2009.
- [13] D. Kančev, M. Čepin, "A new method for explicit modelling of single failure event within different common-cause failure groups", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 103, 84-93, 2012.

Živa Bricman Rejc je diplomirala leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlena kot mlada raziskovalka v Laboratoriju za električna omrežja in naprave na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Marko Čepin je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1995 in doktoriral leta 1999 na Univerzi v Ljubljani. V letih od 1992 do 2009 je bil zaposlen na Institutu Jožef Stefan. Od leta 2009 je profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna dejavnost vključuje splošno energetiko, elektrarne in zanesljivost elektroenergetskih sistemov.