

RAZVOJ PROGRAMSKE OPREME ZA VERJETNOSTNE IZRAČUNE STANJ PRENOSNEGA OMREŽJA

Jože VORŠIČ, Jurček VOH

POVZETEK

V tem delu je opisana metoda za načrtovanje in obratovanje elektroenergetskih omrežij, ki upošteva spreminjanje obratovalnih pogojev. Vhodni parametri – vsiljene vozliščne moči v verjetnostnem izračunu pretokov moči – so podani s porazdelitvijo verjetnosti. Ta porazdelitev je rezultat skrbne analize preteklega obratovanja.

Na osnovi opisane metode je razvita programska oprema za računanje. S slučajnim vektorjem vsiljenih vozliščnih moči, ki upošteva medsebojno povezanost med delovnimi in jalovimi močmi istega in sosednjih vozlišč, izračuna vozliščne napetosti, pretoke moči, toke v elementih in izgube. Rezultati (vozliščne napetosti, pretoki moči, toki in izgube) so podani tabelarično s pričakovano vrednostjo (aritmetično srednjo vrednostjo) in srednjim kvadratičnim odstopanjem. Istočasno je narejena še kontrola obremenitve elementov (vodov, transformatorjev) glede na naravno (za vode) in termično moč. Prava vrednost metode pa so histogrami pretokov energije.

ABSTRACT

Method for planning and operation of power system which considers changes of operational conditions is described in this work. Input parameters - node loads in the load flow probability calculation are passed as probability function resulting from former operation careful analysis.

Based on described method calculation software has been developed. Node voltages, load flows, element currents and losses are calculated from node loads random vector considering connectedness among working and reactive power of same and adjoining nodes. Results (node voltages, load flows, currents and losses) are shown with expected value (arithmetical mean value) and mean square deviation in tabulated form. At the same time elements (lines, transformers) load control according to the natural (lines) and thermic power has been performed. Load flow histograms are real value of this method.

1. UVOD

V prenosnih omrežjih opisujeta medsebojno povezavo med vozliščnimi močmi, vozliščnimi napetostmi in pretoki moči v vejah enačbi:

$$[y] = g([x])$$

$$[z] = h([x])$$

[y] – vektor vsiljenih jalovih in delovnih komponent moči,

[x] – vektor vozliščnih napetosti (velikost in kot),

[z] – vektor pretokov delovnih in jalovih komponent energije.

Ker je vektor vsiljenih vozliščnih moči [y] slučajna spremenljivka, sta tudi vektorja [x] oz. [z] slučajni spremenljivki ter ju opišemo z gostoto verjetnosti. Naloga verjetnostnega izračuna pretokov moči je torej določiti funkciji gostote verjetnosti $f_x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ in $f_z(z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$ pri znani funkciji $f_y(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$.

Pregledali smo in kritično primerjali večino do sedaj znanih pristopov k verjetnostnim izračunom pretokov moči:

- a) Metoda Monte – Carlo je metoda, pri kateri ponavljamo deterministične izračune pretokov moči, pri tem pa vhodne vsiljene vozliščne moči generiramo s pomočjo generatorja naključnih števil.
- b) Metode, ki predpostavljajo normalno porazdelitev. Na osnovi srednjih vrednosti, varianc in kovarianc vsiljenih vozliščnih moči izračunamo gostote verjetnosti pretokov moči.
- c) Konvolucijske metode. V verjetnostnem izračunu pomeni konvolucija postopek za izračun gostote verjetnosti vsote dveh neodvisnih slučajnih spremenljivk.
- d) Momentne metode. Gostota verjetnosti slučajne spremenljivke je enoumno podana s statističnimi momenti. Ob določenih pogojih je možno gostoto verjetnosti s pomočjo momentov predstaviti kot vrsto ter izračunati tudi kombinacijo dveh gostot.
- e) Boolov model. V Boolovem modelu nekega sistema opišemo strukturo vzrok – učinek v obliki Boolovega diagrama, v katerem nadomestimo posamezne systemske elemente z logičnimi stikalnimi elementi. Posebni matematični postopek, Boolova algebra, je prirejen za analizo zanesljivosti. Stikalna struktura predstavlja čiste stohastične dvostopenjske elemente in s tem tudi sisteme z monotonim obnašanjem.
- f) Markovske verige. Stohastično obnašanje električnih omrežij lahko še najbolj realno ponazorimo z Markovim modelom. Pogoji, ki mora biti pri tem izpolnjen, je: *Stohastični pojav opišemo z Markovim modelom samo, če je prehod v naslednje stanje $S_j(t+\Delta t)$ odvisen izključno od začetnega stanja $S_i(t)$ in ne od prejšnjih dogodkov.* Intenzivnost prehodov λ , to pomeni intenzivnosti (indeksi, pogostosti) izpadov λ in intenzivnosti popraviljanja μ , so konstantne vrednosti; porazdelitev verjetnosti časov zadrževanja v posameznih stanjih pa je eksponentna.

2. RAZVOJ IN IZDELAVA PROGRAMSKE OPREME

Verjetnostni izračun pretokov moči je cilj in namen te študije. Obratovalcu in načrtovalcu mora podati vozliščne napetosti in sipanje, porazdelitve verjetnosti obremenitev v posameznih vodih ter izgube celotnega sistema. Na osnovi teh informacij se lahko odločita za ustrezno ukrepanje oziroma gradnjo.

Ob analizi podatkov preteklega obratovanja slovenskega elektroenergetskega sistema smo ponovno pretehtali nam znane metode za verjetnostne izračune pretokov moči.

Momentna metoda zahteva že pri majhnem testnem primeru dvojni računalniški čas metode Monte – Carlo z 860 poskusi.

Konvolucijska metoda da pravilne rezultate šele ob posebnih prijemih, ki omogočajo upoštevanje medsebojne odvisnosti med delovno in jalovo močjo. S tem izgubi metoda vse svoje prednosti.

Metode, ki predpostavljajo normalnost porazdelitve, so primerne le za hitro ocenjevanje ne pa tudi za natančnejšo analizo, saj ne podajo dejanske porazdelitve.

Slabost metode Monte – Carlo je težava pri modeliranju odvisnosti med vsiljenimi vozliščnimi močmi in velikim časom računanja.

Po mnenju strokovnjakov [L. 1] je vendar metoda Monte – Carlo metoda, ki daje najbolj verodostojne rezultate in jo uporabljajo kot referenčno. Za osnovo našega programa smo izbrali metodo Monte – Carlo, ki smo jo nekoliko priredili. V klasični, deterministični računalniški program za izračun pretokov moči smo vgradili namesto generatorja pseudo – slučajnih števil za spreminjanje vsiljenih vozliščnih moči generator slučajnega vektorja vsiljenih vozliščnih moči.

R. Jamnik pravi v [L. 5], da je iz porazdelitvene funkcije slučajnega vektorja zmeraj mogoče dobiti porazdelitvene funkcije njegovih komponent. Iz porazdelitvenih funkcij komponent slučajnega vektorja pa se da določiti porazdelitvena funkcija vektorja samega samo včasih.

Pri vsakem izračunu sestavimo slučajni vektor s poskušanjem iz podanih porazdelitvenih funkcij posameznih komponent. Iz analize preteklega obratovanja izhaja, da imamo opravka s štirimi vrstami vozlišč. Pri vozliščih z izmenjavo so slučajne spremenljivke smer izmenjave in velikost delovne moči ter smer izmenjave in velikost jalove moči. Pri vozliščih s proizvodnjo sta slučajni spremenljivki velikost delovne in jalove moči. Pri bremenskih vozliščih delovna in jalova moč nista neodvisni slučajni spremenljivki (povezuje ju faktor delavnosti). Izbrano časovno obdobje (teden) da že implicitno tudi medsebojno povezanost med sosednjimi vozlišči – v četrtem tednu leta ima reka Drava majhen pretok vode, termoelektrarna Šotan pa dela z vso zmogljivostjo. Nasprotno ima Drava velik pretok v enaindvajsetem tednu, termoelektrarna pa načrtovani remont.

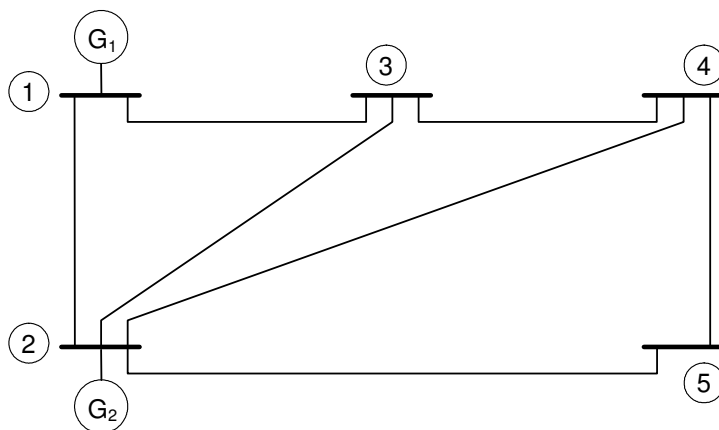
S tako dobljenim slučajnim vektorjem vsiljenih vozliščnih moči, ki upošteva medsebojno povezanost med delovnimi in jalovimi močmi istega in sosednjih vozlišč, smo izračunali vozliščne napetosti, pretoke moči, toke v elementih in izgube. Izkazalo se je, da pri nobenem testnem primeru ni velike razlike pri srednjih vrednostih in sipanjih, če opravimo sto, tisoč ali deset tisoč izračunov. Razlika je le pri histogramih. Več kot dvesto izračunov je nesmiselno, ker je to meja ločljivosti slike.

Rezultati (vozliščne napetosti, pretoki moči, toki in izgube) so podani tabelarično s pričakovano vrednostjo (aritmetična srednja vrednost) in srednjim kvadratičnim odstopanjem. Istočasno je narejena še kontrola višine vozliščnih napetosti glede na predpise ter obremenitve elementov (vodov, transformatorjev) glede na termično moč in naravno moč (za vode). Prava vrednost metode pa so histogrami pretokov moči.

3. PRIMER IZRAČUNA

3.1 Vhodni podatki

Primer izračuna za testni primer (prirejen testni primer IEEE 5 vozlišč, 7 povezav) je na naslednjih straneh.



Slika 3.1: Testni primer IEEE 5 – 7

Preglednica 3.1: Podatki o vozliščih

naziv vozlišča	Un[kV]	U[kV]	Pg[MW]	Qg[MVAr]	Pb[MW]	Qb[MVAr]	sP[MW]	sQ[MVAr]
North	110	116,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
South	110	114,40	40,00	30,00	20,00	10,00	3,97	1,98
Lake	110	110,00	0,00	0,00	45,00	15,00	9,56	3,19
Main	110	110,00	0,00	0,00	40,00	5,00	8,15	1,02
Elm	110	110,00	0,00	0,00	60,00	10,00	13,89	2,31

podatki o vozliščih - nadaljevanje

Pb(0,024)	Qb(0,024)	Pb(0,089)	Qb(0,089)	Pb(0,238)	Qb(0,2388)	Pb(0,476)	Qb(0,476)	Pb(0,714)	Qb(0,714)	Pb(1,000)	Qb(1,000)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,71	12,85	25,29	12,64	24,81	12,40	23,21	11,60	19,67	9,84	15,37	7,69
58,45	19,48	56,62	18,87	55,44	18,48	52,83	17,61	45,44	15,15	33,46	11,15
50,98	6,37	50,26	6,28	49,64	6,20	47,08	5,88	39,15	4,89	30,51	3,81
78,29	13,05	77,38	12,90	76,66	12,78	71,44	11,91	59,74	9,96	43,42	7,24

Preglednica 3.2: Podatki o povezavah

naziv povezave	R(0)	X(0)	R(1)	X(1)	B1[S]	Sth[MVA]	Snat[MVA]	pTr
North - South	7,26	21,78	2,42	7,26	0,000496	270,00	90,00	0,00
North - Lake	29,04	87,12	9,68	29,04	0,000413	60,00	20,00	0,00
South - Lake	21,78	65,34	7,26	21,78	0,000331	60,00	20,00	1,00
South - Main	21,78	65,34	7,26	21,78	0,000331	60,00	20,00	0,00
South - Elm	14,52	43,56	4,84	14,52	0,000248	60,00	20,00	0,00
Lake - Main	3,63	10,89	1,21	3,63	0,000165	30,00	10,00	0,00
Main - Elm	29,04	87,12	9,68	29,04	0,000413	30,00	10,00	0,00

3.2 Rezultati - tabelarično

Preglednica 3.3: Tabelarični izpis izračuna

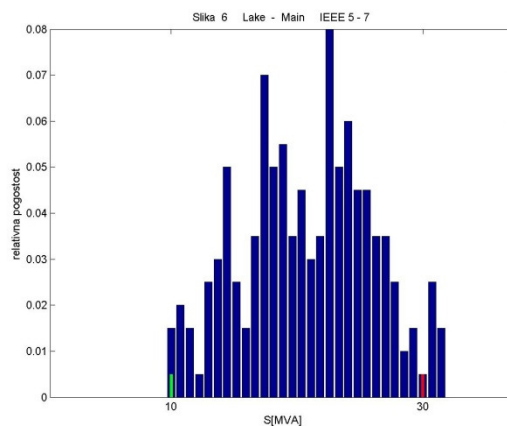
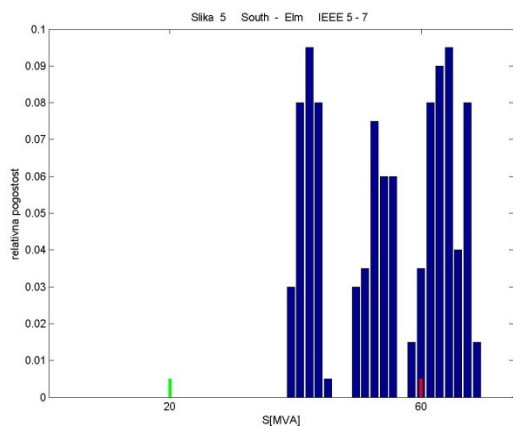
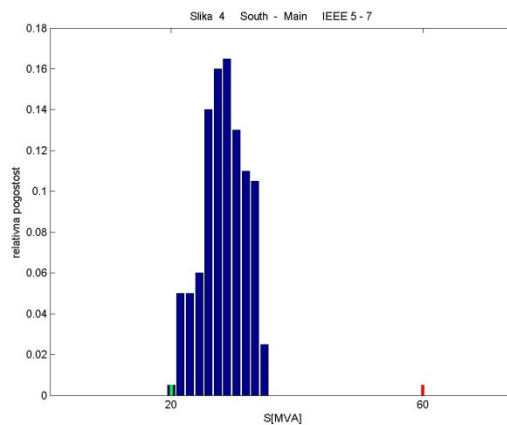
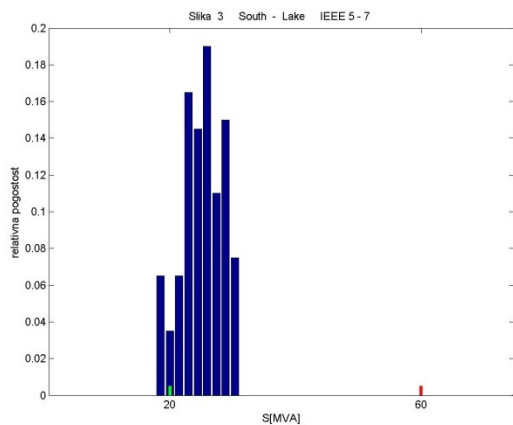
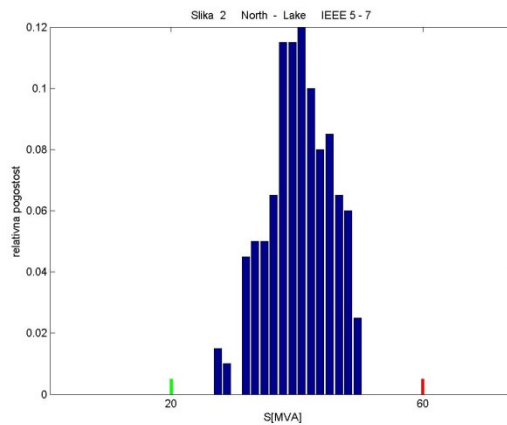
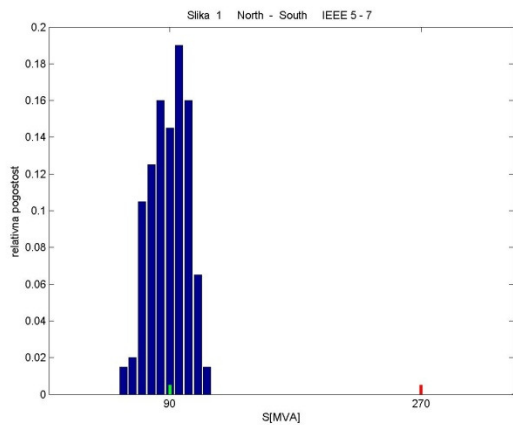
Verjetnostna analiza pretokov moči							
Vozlišče		vozliščna moč / pretoki		napetost / tok		izgube	kot
1 North		136.78(1+0.010)MW	7.83(1+0.034)MVA r	116.60(1+0.000)kV		bilančno	0.00(1+0.000)°
1 North	2 South	94.16(1+0.011)MW	3.52(1+0.083)MVA r	467.16(1+0.011)A		1.6269 MW	slika 1
1 North	3 Lake	42.63(1+0.009)MW	4.32(1+0.015)MVA r	212.16(1+0.009)A		1.3524 MW	slika 2
2 South		19.36(1+0.013)MW	19.68(1+0.007)MVA r	114.4000(1+0.00)kV		napetostno	-2.87(1+0.036)°
	proizvodnja	40.00(1+0.000)MW	30.00(1+0.007)MVA r				
	poraba	20.00(1+0.198)MW	10.00(1+0.198)MVA r				
2 South	1 North	- 92.53(1+0.011)MW	-4.15(1+0.095)MVA r	468.56(1+0.011)A		1.6269 MW	slika 1
2 South	3 Lake	25.32(1+0.009)MW	3.27(1+0.040)MVA r	129.04(1+0.009)A		0.3829 MW	slika 3
2 South	4 Main	28.81(1+0.008)MW	2.76(1+0.043)MVA r	146.23(1+0.009)A		0.4851 MW	slika 4
2 South	5 Elm	57.76(1+0.012)MW	7.34(1+0.030)MVA r	294.01(1+0.012)A		1.3106 MW	preob r. slika 5
3 Lake		- 45.87(1+0.014)MW	-15.29(1+0.014)MVA r	111.7455(1+0.00)kV			-5.15(1+0.050)°
3 Lake	1 North	- 41.27(1+0.009)MW	-5.65(1+0.009)MVA r	215.45(1+0.009)A		1.3524 MW	slika 2
3 Lake	2 South	- 24.93(1+0.009)MW	-7.41(1+0.015)MVA r	134.51(1+0.009)A		0.3829 MW	slika 3
3 Lake	4 Main	20.33(1+0.021)MW	-6.36(1+0.017)MVA r	111.34(1+0.018)A		0.0452 MW	slika 6

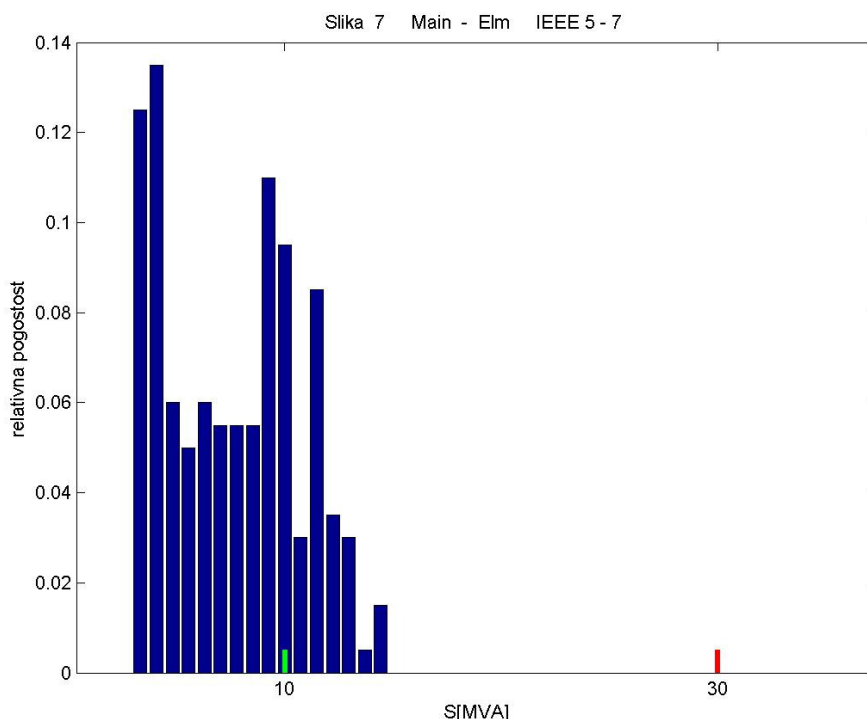
4 Main	-	-5.19(1+0.013)MVar	111.6508(1+0.00)kV	-5.51(1+0.053)°		
	41.48(1+0.013)MW					
4 Main	2 South	-	-6.59(1+0.014)MVar	150.49(1+0.009)A	0.4851 MW	slika 4
		28.32(1+0.008)MW				
4 Main	3 Lake	-	1.34(1+0.080)MVar	105.66(1+0.020)A	0.0452 MW	slika 6
		20.29(1+0.021)MW				
4 Main	5 Elm	7.13(1+0.041)MW	-2.00(1+0.031)MVar	40.89(1+0.029)A	0.0538 MW	slika 7
5 Elm	-	-10.59(1+0.015)MVar	110.9031(1+0.00)kV	-6.45(1+0.076)°		
		63.53(1+0.015)MW				
5 Elm	2 South	-	-8.65(1+0.015)MVar	297.66(1+0.012)A	1.3106 MW	preobr. slika 5
		56.45(1+0.012)MW				
5 Elm	4 Main	-7.08(1+0.041)MW	-2.95(1+0.018)MVar	41.27(1+0.033)A	0.0538 MW	slika 7

Rezultati (vozliščne napetosti, pretoki moči, toki in izgube) so podani tabelarično s pričakovano vrednostjo (aritmetična srednja vrednost) in srednjim kvadratičnim odstopanjem. Preglednica je smiselno urejena, da zavzame čim manj prostora:

- V prvi vrstici podajata prva dva stolpca naziv vozlišča, ki ga obdelujemo:
 - tretji stolpec je delovna komponenta vozliščne moči in srednje kvadratično odstopanje $P (1 \pm \sigma_P)$
 - četrti stolpec je jalova komponenta vozliščne moči in srednje kvadratično odstopanje $Q (1 \pm \sigma_Q)$
 - peti stolpec je vozliščna napetost in srednje kvadratično odstopanje $U (1 \pm \sigma_U)$
 - šesti stolpec je podatek o vrsti vozlišča (bilančno, napetostno oz. brez podatka, če je močnostno)
 - v sedmem stolpcu je podatek o kotu napetostnega kazalca glede na bilančno vozlišče $\delta (1 \pm \sigma_\delta)$
- V drugi vrstici je podatek o povezavi – prvi stolpec je naziv vozlišča, ki ga obdelujemo, v drugem naziv sosednjega vozlišča:
 - tretji stolpec je delovna komponenta pretoka moči in srednje kvadratično odstopanje $P_{IJ} (1 \pm \sigma_{PIJ})$
 - četrti stolpec jalova komponenta pretoka moči in srednje kvadratično odstopanje $Q_{IJ} (1 \pm \sigma_{QIJ})$
 - peti stolpec je Tok v povezavi in srednje kvadratično odstopanje $I_{IJ} (1 \pm \sigma_{I_{IJ}})$
 - v šestem stolpcu je podatek o izgubah v povezavi zaradi pretoka moči $\Delta P_{IJ} (1 \pm \sigma_{PIJ})$
 - v sedmem stolpcu je podatek o morebitni prekoračitvi termične mejne moči povezave
 - v osmem stolpcu je podatek o sliki

3.3 Rezultati - histogrami





Slika 3.2: Pretok energije med vozliščema Main – Elm

Prava vrednost metode so histogrami pretokov moči. Slika pokaže, kako se spreminjajo pretoki moči glede na spremenljive vhodne podatke. Na abscisi sta podani še dve značilni vrednosti – naravna moč (zeleno) in termična mejna moč (rdeče) povezave, kar omogoča takojšnje ukrepanje

4. SKLEP

Pri vsakem izračunu sestavimo slučajni vektor s poskušanjem iz podanih porazdelitvenih funkcij posameznih komponent. S tako dobljenim slučajnim vektorjem vsiljenih vozliščnih moči, ki upošteva medsebojno povezanost med delovnimi in jalovimi močmi istega in sosednjih vozlišč, smo izračunali vozliščne napetosti, pretoke moči, toke v elementih in izgube. Izkazalo se je, da pri nobenem testnem primeru ni velike razlike pri srednjih vrednostih in sipanjih, če opravimo sto, tisoč ali deset tisoč izračunov. Razlika je le pri histogramih. Več kot dvesto izračunov je nesmiselno, ker je to meja ločljivosti slike.

Koristna je kontrola obremenjenosti elementov glede na termično mejno moč oziroma naravno in termično mejno moč pri nadzemnih vodih, saj nas tako opozori na odstopanje, ki bi ga lahko sicer spregledali. Slika pove tehniku več kot morje števil, zato smo podali rezultate posameznih različic v obliki histogramov. Slika pokaže, kako se spreminjajo pretoki moči glede na spremenljive vhodne podatke.

Edina slabost uporabljene metode, ki smo jo poimenovali po našem laboratoriju *POWERLAB*, je obilica dela za pripravo vhodnih podatkov, ki pa je bogato poplačana s celovitostjo in uporabnostjo rezultatov.

5. VIRI

- [1] Georg J. Anders: Koncepti verjetnosti v elektroenergetiki; Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Maribor 2008
- [2] Zvonimir Bohte: Numerična analiza, Institut za matematiko, fiziko in mehaniko, Ljubljana 1973
- [3] Barbara Borkowska: Probabilistic load flow, IEEE, PAS-93, 1974, pp. 752-759
- [4] George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins: Time series analysis, Holden Day, San Francisco 1976
- [5] Rajko Jamnik: Verjetnostni račun, Mladinska knjiga, Ljubljana 1971
- [6] Marjan Plaper: Elektroenergetska omrežja I, Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1974
- [7] Marjan Plaper: Elektroenergetska omrežja II, Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1975
- [8] Jože Voršič, Tine Zorič, Miran Horvat: Izračun obratovalnih stanj v elektroenergetskih omrežjih, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Maribor 2003

NASLOV AVTORJEV

Jurček VOH
Jože VORŠIČ

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Laboratorij za energetiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor