

Određivanje pojedinačnih gubitaka i stepena korisnog dejstva generatora

Ilija Klasnić^{1,2}, Zoran Ćirić¹, Slobodan Bogdanović¹, Dane Džepčeski¹,
Dušan Joksimović¹, Dušan Arnautović¹

¹Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
Ilija.klasnic@ieent.org

²Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu.,
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Kratak sadržaj: U radu su prikazani rezultati izračunavanja pojedinačnih i ukupnih gubitaka generatora i određivanja stepena korisnog dejstva revitalizovanog hidrogeneratora agregata A4 u HE „Đerdap 1“. Merenja radi određivanja gubitaka i stepena korisnog dejstva generatora su izvršena u okviru garancijskih ispitivanja revitalizovanog agregata A4 u HE „Đerdap 1“.

Ključne reči: stepen korisnog dejstva generatora, kalorimetrijska metoda, pojedinačni i ukupni gubici

1. Uvod

U ovom radu prikazani su rezultati merenja i izračunavanja ukupnih i pojedinačnih gubitaka generatora kao i stepena korisnog dejstva generatora. Prikazani su rezultati merenja ukupnih gubitaka generatora. Merenja ukupnih gubitaka izvršena su primenom kalorimetrijske metode u struji rashladne vode u četiri karakteristična režima rada generatora. Takođe, prikazani su rezultati merenja omskih otpornosti namotaja statora i namotaja rotora glavnog (MG) i pomoćnog generatora (AG) i rezultati merenja radi određivanja regulacionih karakteristika glavnog generatora pri $\cos\varphi = 0,9$ ind. i $\cos\varphi=1,0$. Ispitivanja su sprovedena u skladu sa važećim standardima [1], [2], [3], [4]. Istovremeno sa merenjima ukupnih gubitaka generatora u karakterističnim režimima izvršena su i merenja električnih veličina MG i AG. Ispitivanja su izvršena na revitalizovanom generatoru na agregatu br. 4 u HE „Đerdap 1“. Tehnički podaci i parametri MG i AG navedeni su u tabeli 1. [5], [6]

Tabela 1. Osnovni podaci o ispitivanom generatoru

OPIS	GLAVNI GENERATOR	POMOĆNI GENERATOR
Tip generatora	CB 1488/175-84 УХЛ4	CB 850/20-84 УХЛ4
Nominalna snaga	211,11 MVA	2,222 MVA
Nominalni napon	15750 V	720 V
Nominalna struja statora	7739 A	1782 A
Nominalna struja rotora	1880 A	205 A
Nominalni faktor snage	0,90	0,43
Učestanost	50 Hz	50 Hz
Nominalna brzina obrtanja	71,43 ob/min	71,43 ob/min

Merenja ukupnih gubitaka generatora izvršena su u struji rashladne vode primenom kalorimetrijske metode u sledećim režimima rada generatora:

- prazan hod, generator nepobuđen (IR),
- prazan hod generatora, generator pobuđen na nominalni napon (IRE),
- kratak spoj generatora sa nominalnom strujom (SC).

2. Merenja u režimu prazan hod generator nepobuđen

U tabeli 2 prikazani su rezultati merenja temperatura na izlazu i na ulazu grupe hladnjaka generatora i protoka rashladne vode kroz te hladnjake u režimu prazan hod, generator nepobuđen.

Tabela 2. Merenja temperatura i protoka rashladne vode, prazan hod generator nepobuđen

Merno mesto	$\theta_{Wj,i}$ (C)	$\theta_{Wj,o}$ (C)	Hladnjaci	Razlika temperatura $\Delta\theta_{Wj}$ (C)		Protok	(l/s)	(m ³ /s)
1	16,82	24,54	17, 16, 15	$\Delta\theta_{W1} = \theta_{W1,o} - \theta_{W1,i}$	7,69	Q_{W1}	3,04	0,003036333
2	16,82	24,76	2, 1, 18	$\Delta\theta_{W2} = \theta_{W2,o} - \theta_{W2,i}$	7,91	Q_{W2}	3,00	0,002995267
3	16,86	24,67	5, 4, 3	$\Delta\theta_{W3} = \theta_{W3,o} - \theta_{W3,i}$	7,82	Q_{W3}	2,97	0,002967233

Merno mesto	$\theta_{Wj,i}$ (°C)	$\theta_{Wj,o}$ (°C)	Hladnjaci	Razlika temperatura $\Delta\theta_{Wj}$ (°C)		Protok	(l/s)	(m ³ /s)
4	16,89	24,73	14, 13, 12	$\Delta\theta_{W4} = \theta_{W4,o} - \theta_{W4,i}$	7,88	Q_{W4}	3,02	0,003023867
5	16,87	24,67	11, 10, 9	$\Delta\theta_{W5} = \theta_{W5,o} - \theta_{W5,i}$	7,82	Q_{W5}	3,03	0,0030299
6	16,85	24,83	8, 7, 6	$\Delta\theta_{W6} = \theta_{W6,o} - \theta_{W6,i}$	7,98	Q_{W6}	2,99	0,0029891

U tabeli 3 prikazani su rezultati merenja temeperatura radi određivanja snage gubitaka koji se razmenjuju preko gornjeg poklopca generatora, donjeg poklopca generatora i kućišta nosećeg ležaja, kao i rezultati merenja temeperatura radi određivanja gubitaka generatora usled termičke provodljivosti zida bureta generatora. U tabelama 4 i 5 prikazani su rezultati izračunavanja snage gubitaka generatora u hladnjacima generatora i gubitaka generatora usled radijacije, konvekcije i provodljivosti.

Tabela 3. Merenja temperatura

Gornji poklopac generatora			Donji poklopac generatora			Zid betonskog bureta		
Br.	θ_{UC} (°C)	θ_{AUC} (°C)	Br.	θ_{LC} (°C)	θ_{ALC} (°C)	Br.	$\theta_{PIT i}$ (°C)	$\theta_{PIT o}$ (°C)
1	26,00	22,83	1	26,41	24,06	1	26,92	23,96
2	26,41	22,43	2	26,41	24,06	2	26,51	22,53
3	26,10	23,24	3	26,82	24,77	3	26,92	24,16
4	26,20	23,24	4	26,41	24,47	4	27,12	23,96
5	26,20	23,24	5	27,33	24,57	5	26,61	24,57
AVE	26,18	23,00	AVE	26,67	24,39	AVE	26,82	23,83
$\Delta\theta_{UC} = \theta_{UC,ave} - \theta_{AUC,ave}$		3,19	$\Delta\theta_{LC} = \theta_{LC,ave} - \theta_{ALC,ave}$		2,29	$\Delta\theta_{PIT} = \theta_{PIT i,ave} - \theta_{PIT o,ave}$		2,98

Noseći ležaj		
Br.	θ_{TB} (°C)	θ_{ATB} (°C)
1	26,41	28,04
2	26,82	27,84
AVE	26,61	27,94
$\Delta\theta_{TB} = \theta_{ATB,ave} - \theta_{TB,ave}$		1,33

Tabela 4. Gubici u hladnjacima generatora, prazan hod generator nepobuđen

Merno mesto	Hladnjaci	Q_w (m ³ /s)	$\theta_{w,i}$ (°C)	$\theta_{w,o}$ (°C)	$\Delta\theta_w$ (°C)	$\theta_{w,avr}$ (°C)	ρ_w (kg/m ³)	c_{pw} (J/kgK)	P_{1wi} (kW)
1	17, 16, 15	0,00304	16,85	24,54	7,69	20,70	997,16	4181,38	97,310
2	2, 1, 18	0,00300	16,85	24,76	7,91	20,81	997,10	4181,31	98,718
3	5, 4, 3	0,00297	16,85	24,67	7,82	20,76	997,13	4181,34	96,715
4	14, 13, 12	0,00302	16,85	24,73	7,88	20,79	997,11	4181,32	99,360
5	11, 10, 9	0,00303	16,85	24,67	7,82	20,76	997,13	4181,34	98,757
6	8, 7, 6	0,00299	16,85	24,83	7,98	20,84	997,08	4181,29	99,443
							$P_{1w} = \sum P_{1wi}$ (kW)		590,302

Gubici u hladnjacima generatora se izračunavaju prema sledećoj formuli:

$$P_{1wi} = Q_w \rho_w c_{pw} \Delta\theta_w \quad (1)$$

Tabela 5. Gubici usled radijacije, konvekcije i provodljivosti, prazan hod generator nepobuđen

Gornji poklopac generatora		Donji poklopac generatora		Noseći ležaj		Bure generatora		
$P_{2,1} = 10^3 \cdot h_1 \cdot A_1 \cdot \Delta\theta_{UC}$ (kW)		$P_{2,2} = 10^3 \cdot h_2 \cdot A_2 \cdot \Delta\theta_{LC}$ (kW)		$P_{2,3} = 10^3 \cdot h_3 \cdot A_3 \cdot \Delta\theta_{TB}$ (kW)		$P_3 = \lambda \cdot A_{PIT} \cdot \Delta\theta_{PIT} / (3600 \cdot d)$ (kW)		
$\Delta\theta_{UC}$ (°C)	3,19	$\Delta\theta_{LC}$ (°C)	2,29	$\Delta\theta_{TB}$ (°C)	1,33	$\Delta\theta_{PIT}$ (°C)	2,98	
A_1 (m ²)	300	A_2 (m ²)	94	A_3 (m ²)	28	A_{PIT} (m ²)	372	
h_1 (W/m ² K)	15	h_2 (W/m ² K)	15	h_3 (W/m ² K)	15	λ (kJ/hKm)	5,4	
$P_{2,1}$ (kW)	14,335	$P_{2,2}$ (kW)	3,225	$P_{2,3}$ (kW)	0,557	d (m)	0,450	
				$P_2 = P_{2,1} + P_{2,2} + P_{2,3}$		18,117	P_3 (kW)	3,697

Ukupni gubici generatora u režimu prazan hod, generator nepobuđen iznose $P_{IR} = 612,117$ kW. Na isti način, koristeći podatke merenja i za preostala dva režima, izračunati su ukupni gubici generatora u režimu prazan hod, generator pobuđen na nominalni napon $P_{IRE} = 1354,04$ kW i u režimu kratak spoj generatora sa nominalnom strujom $P_{SC} = 1845,88$ kW. Merenja ukupnih gubitaka izvršena su pri sledećim uslovima u struji rashladnog vazduha, prikazanim u tabeli 6. [5]

Tabela 6. Uslovi u struji rashladnog vazduha

Veličina / Radni režim	IR	IRE	SC
Relativna vlažnost hladnog vazduha, φ (%)	30,90	29,32	30,48
Ambijentalni pritisak, p_b (mbar)	1020,38	1016,16	1009,72
Srednja temperatura toplog/hladnog vazduha, $\theta_{A,Scave}$ (°C)	29,02	32,85	35,72
Sračunata gustina vazduha, ρ_A , (kg/m ³)	1,1715	1,1508	1,1319

U okviru ovih ispitivanja izvršena su i merenja radi određivanja regulacionih karakteristika glavnog generatora pri dve vrednosti sačinioća snage $\cos\varphi = 0,9$ induktivno i $\cos\varphi = 1,0$. Na osnovu rezultata merenja određene su analitičke formule na osnovu kojih se izračunavaju struja pobude glavnog generatora $I_{f,MG}$, struja pobude pomoćnog generatora $I_{f,AG}$ i struja statora pomoćnog generatora $I_{s,AG}$ u apsolutnim jedinicama za razne vrednosti struje statora glavnog generatora $I_{s,MG}$ u relativnim jedinicama. To su sledeće formule [5], [7]:

- Za $\cos\varphi = 0,9$

$$I_{f,MG} = -689,61I_{s,MG}^4 + 1959,2I_{s,MG}^3 - 1679,9I_{s,MG}^2 + 1515,71I_{s,MG} + 774,73$$

$$I_{f,AG} = -0,2707I_{s,MG}^4 + 15,831I_{s,MG}^3 - 21,922,9I_{s,MG}^2 + 45,4831I_{s,MG} + 128,68 \quad (2)$$

$$I_{s,AG} = -1200,51I_{s,MG}^4 + 3081,9I_{s,MG}^3 - 2563,0I_{s,MG}^2 + 1606,91I_{s,MG} + 594,33$$

- Za $\cos\varphi = 1,0$

$$I_{f,MG} = -75,969I_{s,MG}^4 - 658,19I_{s,MG}^3 + 1254,4I_{s,MG}^2 - 142,29I_{s,MG} + 930,22$$

$$I_{f,AG} = 66,508I_{s,MG}^4 - 154,84I_{s,MG}^3 + 139,0I_{s,MG}^2 - 30,859I_{s,MG} + 135,39 \quad (3)$$

$$I_{s,AG} = 938,04I_{s,MG}^4 - 2324,2I_{s,MG}^3 + 2295,2I_{s,MG}^2 - 494,3I_{s,MG} + 799,22$$

Merenja omskih otpornosti namotaja statora i rotora glavnog i pomoćnog generatora izvršena su u periodu neposredno pred puštanje agregata u eksploataciju, kada su namotaji glavnog i pomoćnog generatora bili u hladnom-termički stacionarnom stanju. Pri tome su na temperaturi 31°C izmerene srednje vrednosti otpornosti faznih namotaja statora glavnog generatora 3,077mΩ i namotaja rotora glavnog generatora 162,7mΩ. Na temperaturi 31,5°C izmerene su srednje vrednosti otpornosti faznih namotaja statora pomoćnog generatora 4,104mΩ i namotaja rotora pomoćnog generatora 751,15mΩ. Preračunato na 75°C omska otpornost namotaja faze statora glavnog generatora iznosi 3,586 mΩ, namotaja rotora glavnog generatora 189,61mΩ, namotaja faze statora pomoćnog generatora 4,773mΩ i namotaja rotora pomoćnog generatora 873,76mΩ. Ove vrednosti koriste se prilikom izračunavanja gubitaka u generatoru. [1], [7]

3. Određivanje pojedinačnih gubitaka

Ukupni gubici generatora izmereni u režimu prazan hod bez pobude iznose 612,117 kW i oni su jednaki gubicima na trenje i ventilaciju $P_{(fr+vent)IR}=612,117$ kW. Preračunati na referentne uslove ovi gubici iznose:

$$P_{(fr+vent)nom} = P_{(fr+vent)IR} \left(\frac{\rho_{A,ref}}{\rho_{A,IR}} \right) = 583,013kW \quad (4)$$

gde je $\rho_{A,ref}=1,1158\text{kg/m}^3$. Ukupni gubici generatora izmereni u režimu prazan hod generator pobuđen na nominalni napon iznose 1354,04 kW. Gubici na trenje i ventilaciju u režimu prazan hod generator pobuđen iznose:

$$P_{(fr+vent)IRE} = P_{(fr+vent)IR} \left(\frac{\rho_{A,IRE}}{\rho_{A,IR}} \right) = 601,30kW \quad (5)$$

Na osnovu podataka o rezultatima merenja i podataka konstruktora generatora određeni su sledeći gubici:

- Gubici u pobudi glavnog generatora, $P_{f, MG}^{IRE}$ 135,267 kW
- Gubici u gvožđu pomomočnog generatora $P_{Fe,AG}^{IRE}$ pri izmerenom naponu pomočnog generatora 24,543 kW
- Gubici u bakru statora pomočnog genertaora, $P_{Cu,AG}^{IRE}$ 6,818 kW
- Gubici u pobudi pomočnog generatora, $P_{f, AG}^{IRE}$ 13,682 kW
- Dodatni gubici pomočnog generatora, $P_{S,AG}^{IRE}$ 0,35 kW
- Gubici u tiristorskim pretvaračima glavnog generatora, $P_{tir, MG}^{IRE}$ 7,30 kW
- Gubici u sistemu pobude pomočnog generatora, $P_{pob, AG}^{IRE}$ 2,05 kW

Gubici u gvožđu glavnog generatora iznose:

$$P_{Fe, MG} = P_{IRE} - P_{(fr+vent)}^{IRE} - P_{f, MG}^{IRE} - P_{Fe, AG}^{IRE} - P_{Cu, AG}^{IRE} - P_{f, AG}^{IRE} - P_{S, AG}^{IRE} - P_{tir, MG}^{IRE} - P_{pob, AG}^{IRE} = 562.729kW \quad (6)$$

Srednja vrednost napona statora glavnog generatora pri kojoj su izvršena merenja iznosi 15742 V, pa gubici u gvožđu glavnog generatora pri nominalnom naponu i nominalnoj brzini iznose:

$$P_{Fe, MG, Un} = P_{Fe, MG} \left(\frac{U_n}{U_{S, MG}} \right)^2 = 563,301kW \quad (7)$$

Ukupni gubici generatora izmereni u režimu kratak spoj generatora sa nominalnom strujom iznose 1845,88 kW. Gubici na trenje i ventilaciju u režimu kratak spoj generatora sa nominalnom strujom iznose:

$$P_{(fr+vent)SC} = P_{(fr+vent)IR} \left(\frac{\rho_{A,SC}}{\rho_{A,IR}} \right) = 591,426kW \quad (8)$$

Na osnovu podataka o rezultatima merenja i podataka konstruktora generatora određeni su sledeći gubici:

- Gubici u pobudi glavnog generatora, $P_{f, MG}^{SC}$ 183,157 kW
- Gubici u gvožđu pomoćnog generatora $P_{Fe,AG}^{SC}$ pri izmerenom naponu pomoćnog generatora 24,528 kW
- Gubici u bakru statora pomoćnog genertaora $P_{Cu,AG}^{SC}$ 9,165 kW
- Gubici u pobudi pomoćnog generatora $P_{f, AG}^{SC}$ 15,167 kW
- Dodatni gubici pomoćnog generatora $P_{s,AG}^{SC}$ 0,47 kW
- Gubici u tiristorskim pretvaračima glavnog generatora, $P_{tir, MG}^{SC}$ 7,70 kW
- Gubici u sistemu pobude pomoćnog generatora $P_{pob, AG}^{SC}$ 2,12 kW

Gubici pri kratkom spoju glavnog generatora pri srednjoj temperaturi namotaja statora 66,3°C i srednjoj struji faznih namotaja statora 7731,1A iznose:

$$P_{Cu, MG} + P_{S, MG} = P_{SC} - P_{(fr+vent)SC} - P_{f, MG}^{SC} - P_{Fe, AG}^{SC} - P_{Cu, AG}^{SC} - P_{f, AG}^{SC} - P_{S, AG}^{SC} - P_{tir, MG}^{SC} - P_{pob, AG}^{SC} + P_{Cu, MG} + P_{S, MG} = 1012,147kW \quad (9)$$

Gubici u bakru statora glavnog generatora iznose:

$$P_{Cu, MG} = 3 \left(\frac{3,586(235 + 66,3)}{310} \right) 7731,1^2 = 624,959kW \quad (10)$$

dok dodatni gubici iznose $P_{S, MG} = 387,188kW$. Dodatni gubici svedeni na nominalnu struju glavnog generatora iznose $P_{s, in} = 387,98 kW$.

Gubici u namotaju statora $P_{cu, MG}$ i u namotaju rotora $P_{f, MG}$ glavnog generatora pri temperaturi namotaja 75°C i za vrednosti sačinioca snage $\cos \varphi = 0,9$ induktivno i $\cos \varphi = 1,0$ prikazani su u tabeli 7.

Tabela 7. Gubici u namotaju statora i u namotaju rotora glavnog generatora

Gubici u bakru MG pri $\cos \varphi = 0,9$; $R_{S, MG} = 3,586m\Omega$; $R_{f, MG} = 189,61m\Omega$ pri 75°C									
Opterećenje	[p. u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$I_{S, MG}$	[A]	967,38	1934,75	2902,13	3869,50	4836,88	5804,25	6771,63	7739,00
$I_{f, MG}$	[A]	941,60	1076,60	1196,60	1314,40	1438,90	1574,90	1723,10	1880,10
$P_{Cu, MG}$	[kW]	10,07	40,27	90,61	161,08	251,69	362,43	493,31	644,32
$P_{f, MG}$	[kW]	168,11	219,77	271,49	327,58	392,57	470,29	562,97	670,23
Gubici u bakru MG pri $\cos \varphi = 1,0$; $R_{S, MG} = 3,586m\Omega$; $R_{f, MG} = 189,61m\Omega$ pri 75°C									
Opterećenje	[p. u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$I_{S, MG}$	[A]	967,38	1934,75	2902,13	3869,50	4836,88	5804,25	6771,63	7739,00
$I_{f, MG}$	[A]	930,80	963,10	1020,10	1095,10	1182,20	1275,50	1369,70	1460,10
$P_{Cu, MG}$	[kW]	10,07	40,27	90,61	161,08	251,69	362,43	493,31	644,32
$P_{f, MG}$	[kW]	164,28	175,87	197,31	227,39	265,00	308,48	355,72	404,23

Ukupni gubici u pomoćnom generatoru pri temperaturi namotaja statora i rotora 75°C prikazani su u tabeli 8.

Tabela 8. Ukupni gubici u pomoćnom generatoru

Ukupni gubici u AG pri $\cos \varphi = 0,9$; $R_{S,AG}=4,773m\Omega$; $R_{f,AG}=873,76m\Omega$ pri 75°C									
Opterećenje	[p.u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$I_{S,AG}$	[A]	760,87	879,33	975,28	1067,24	1166,71	1278,15	1398,99	1519,63
$I_{f,AG}$	[A]	134,05	138,93	143,48	147,90	152,37	157,05	162,14	167,80
$P_{Cu,AG}$	[kW]	8,29	11,07	13,62	16,31	19,49	23,39	28,02	33,07
$P_{S,AG}$	[kW]	0,50	0,67	0,83	0,99	1,18	1,42	1,70	2,00
$P_{f,AG}$	[kW]	15,70	16,86	17,99	19,11	20,29	21,55	22,97	24,60
$P_{fe,AG}$	[kW]	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
P_{AG}	[kW]	47,49	51,61	55,43	59,41	63,96	69,36	75,69	82,67
Ukupni gubici u AG pri $\cos \varphi = 1,0$; $R_{S,AG}=4,773m\Omega$; $R_{f,AG}=873,76m\Omega$ pri 75°C									
Opterećenje	[p.u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$I_{S,AG}$	[A]	768,98	786,44	832,60	893,97	962,55	1035,82	1116,80	1213,96
$I_{f,AG}$	[A]	133,42	134,20	136,51	139,51	142,75	146,15	150,07	155,20
$P_{Cu,AG}$	[kW]	8,47	8,86	9,93	11,44	13,27	15,36	17,86	21,10
$P_{S,AG}$	[kW]	0,53	0,56	0,62	,072	0,83	0,96	1,12	1,32
$P_{f,AG}$	[kW]	15,55	15,74	16,28	17,01	17,81	18,66	19,68	21,05
$P_{fe,AG}$	[kW]	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
P_{AG}	[kW]	47,55	48,15	49,83	52,17	54,90	57,99	61,66	66,47

Gubici u tiristorskim mostovima glavnog generatora $P_{tir,MG}$ i u sistemu pobude pomoćnog generatora $P_{pob,AG}$ za vrednosti sačinioca snage $\cos \varphi = 0,9$ induktivno i $\cos \varphi = 1,0$ prikazani su u tabeli 9.

Tabela 9. Gubici u tiristorskim mostovima GG i u sistemu pobude PG

Opterećenje	[p.u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$P_{tir,MG}+P_{pob,AG}$ za $\cos \varphi = 0,9$	[kW]	9,67	9,96	10,33	10,69	11,14	11,54	12,02	12,63
$P_{tir,MG}+P_{pob,AG}$ za $\cos \varphi = 1,0$	[kW]	9,43	9,58	9,74	9,98	10,29	10,57	10,88	11,25

Gubici na četkicama izračunavaju se na osnovu izraza $P_{BG} = 2 (I_{f,MG} + I_{f,AG})$. Vrednosti gubitaka na četkicama za vrednosti sačinioca snage $\cos \varphi = 0,9$ induktivno i $\cos \varphi = 1,0$ prikazane su u tabeli 10.

Tabela 10. Gubici na četkicama

Gubici na četkicama P_{BG} , $\cos\varphi=0.9$									
Opterećenje	[p.u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$I_{f,MG}$	[A]	941,6	1076,6	1196,6	1314,4	1438,9	1574,9	1723,1	1880,1
$I_{f,AG}$	[A]	134,05	138,93	143,48	147,90	152,37	157,05	162,14	167,80
P_{BG}	[kW]	2,151	2,431	2,680	2,925	3,183	3,464	3,770	4,096

Gubici na četkicama P_{BG} , $\cos\varphi = 1.0$									
Opterećenje	[p.u.]	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000
$I_{f,MG}$	[A]	930,8	963,1	1020,1	1095,1	1182,2	1275,5	1369,7	1460,1
$I_{f,AG}$	[A]	133,42	134,20	136,51	139,51	142,75	146,15	150,07	155,20
P_{BG}	[kW]	2,128	2,195	2,313	2,469	2,650	2,843	3,040	3,231

Izvršena su merenja gubitaka u ležajevima u nominalnom režimu rada agregata. Parametri rada agregata u nominalnom radnom režimu dati su u tabeli 11.

Tabela 11. Parametri rada agregata u nominalnom radnom režimu

H_n (m)	Q_T (m ³ /s)	φ_{runner} (°)	α_{WG} (%)	Y_{WG} (mm)	$t_{oil,TB}$ (°C)	$t_{oil,RB}$ (°C)
26.8	647	14.5	73.5	882	29.5	31.7

Rezultati merenja za noseći ležaj prikazani su u tabelama 12 i 13.

Tabela 12. Gubici u hladnjacima nosećeg ležaja

Merno mesto	Q_{WTB} (m ³ /s)	$\theta_{WTB,i}$ (°C)	$\theta_{WTB,o}$ (°C)	$\Delta\theta_{WTB}$ (°C)	$\theta_{WTB,avr}$ (°C)	ρ_W (kg/m ³)	c_{PW} (J/kgK)	P_{1TBi} (kW)
1	0.010717	16.81	21.81	4.99	19.31	997.811	4182.21	223.377
2	0.009836	16.87	21.75	4.89	19.31	997.823	4182.21	200.539
$P_{1TB} = \sum P_{1TBi}$ (kW)								423.916

Tabela 13. Gubici usled radijacije i konvekcije

Noseći ležaj – kućište	
$P_{2,3,TB} = 10^{-3} \cdot h_3 \cdot A_3 \cdot \Delta\theta_{TB}$ (kW)	
$\Delta\theta_{TB}$ (°C)	-4.90
A_3 (m ²)	28
h_3 (W/m ² K)	15
$P_{2,3,TB}$ (kW)	-2.058

Rezultati merenja za vodeći ležaj prikazani su u tabeli 14.

Tabela 14. Gubici u hladnjacima vodećeg ležaja

Merno mesto	Q_{WRB} (m ³ /s)	$\theta_{WRB,i}$ (°C)	$\theta_{WRB,o}$ (°C)	$\Delta\theta_{WRB}$ (°C)	$\theta_{WRB,avr}$ (°C)	ρ_W (kg/m ³)	c_{pW} (J/kgK)	P_{RB} (kW)
1	0.004288	13.62	15.77	2.15	14.7	998.977	4186.123	38.502

Gubici u nosećem ležaju, koji se pri sračunavanju stepena korisnog dejstva generatora uzimaju da pripadaju generatoru, izračunati su prema podacima dobijenim od rukovodioca projekta proizvođača opreme i navedeni su u tabeli 15.

$$\frac{P_{TBN}}{G} = \frac{G_G}{(G_T + G_G)(P_{1TB} + P_{2,3}) \sqrt{\frac{\xi_{OIL,N}}{\xi_{OIL,N}}}} \quad (11)$$

Tabela 15. Gubici u nosećem ležaju koji pripadaju generatoru u referentnim uslovima

G_G (kN)	8000
G_T (kN)	5000
F_W (kN)	22000
$P_{1TB} + P_{2,3}$ (kW)	421.857
$\xi_{oil,N}$ (45°C) (m ² /s)	28.551
$\xi_{oil,TB}$ (m ² /s)	59.266
$P_{TBN/G}$ (kW)	66.927

Gubici u vodećem ležaju generatora u referentnim uslovima izračunati su prema podacima navedenim u tabeli 16.

$$P_{RBN} = P_{RB} \sqrt{\frac{\xi_{OIL,N}}{\xi_{OIL,TB}}} \quad (12)$$

Tabela 16. Gubici u vodećem ležaju generatora u referentnim uslovima

P_{RB} (kW)	38.502
$\xi_{oil,RB}$ (m ² /s)	52.893
$\xi_{oil,N}$ (40°C) (m ² /s)	35.557
P_{RBN} (kW)	31.568

Ukupni gubici u ležajevima koji se uzimaju da pripadaju generatoru u referentnim uslovima iznose $P_{TBN/G} + P_{RBN} = 98.495$ kW.

4. Određivanje stepena korisnog dejstva generatora

Stepen korisnog dejstva generatora izračunat je indirektnom metodom na osnovu određenih pojedinačnih gubitaka generatora, merenih u rashladnoj

vodi. Stepen korisnog dejstva je izračunat za osam opterećenja generatora pri $\cos\varphi = 0,9$ induktivno po sledećoj formuli [1], [7]:

$$\eta_G = \frac{P}{P + \sum P_g} \quad (13)$$

gde je:

- η_G – stepen korisnog dejstva generatora
- P – aktivna snaga generatora
- $\sum P_g$ – zbir izmerenih i sračunatih gubitaka generatora koji odgovaraju aktivnoj snazi

Rezultati izračunavanja prikazani su u tabeli 17.

Tabela 17. Stepen korisnog dejstva revitalizovanog generatora pri $\cos\varphi = 0.9$ ind

HE ĐERDAP 1 -									
Opterećenje	p.u.	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000
Prividna snaga	MVA	26.39	53.78	79.17	105.56	131.94	158.33	184.72	211.11
Aktivna snaga	MW	23.75	47.50	71.25	95.00	118.75	142.50	166.26	190.00
Napon statora	kV	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75
Struja statora	A	967.38	1934.75	2902.13	3869.50	4836.88	5804.25	6771.63	7739.00
Struja rotora	A	941.60	1076.60	1196.60	1314.40	1438.90	1574.90	1723.10	1880.10
Gubici na trenje i ventilaciju	kW	583.01	583.01	583.01	583.01	583.01	583.01	583.01	583.01
Gubici u ležajevima	kW	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50
Gubici na četkicama	kW	2.15	2.43	2.68	2.92	3.18	3.46	3.77	4.10
Gubici u gvožđu	kW	563.30	563.30	563.30	563.30	563.30	563.30	563.30	563.30
Gubici u bakru statora	kW	10.07	40.27	90.61	161.08	251.69	362.43	493.31	644.32
Dodatni gubici	kW	6.06	24.25	54.56	97.00	151.55	218.24	297.04	387.98
Gubici u rotoru	kW	168.11	219.77	271.49	327.58	392.57	470.29	562.97	670.23

HE ĐERDAP 1 -.									
Gubici u tirst. pretvar. MG, i sist. pobude AG	kW	9.67	9.96	10.33	10.69	11.14	11.54	12.02	12.63
Ukupni gubici AG	kW	47.49	51.61	55.43	59.41	63.96	69.36	75.69	82.67
Ukupni gubici MG	kW	1488.36	1593.10	1729.91	1903.49	2118.90	2380.13	2689.61	3046.74
Aktivna snaga generatora	kW	23750	47500	71250	95000	118750	142500	166250	190000
Snaga na vratilu turbine	kW	25238	49093	72980	96903	120869	144880	168940	193047
Stepen korisnog dejstva η	%	94.10	96.75	97.63	98.04	98.25	98.36	98.41	98.42
Srednji energetski stepen korisnog dejstva η	%	98.27							
Garantovani stepen korisnog dejstva η_{gar}	%		96.52		97.91		98.27		98.36
Garantovani Srednji energetski stepen korisnog dejstva $\eta_{sr gar}$	%	98.18							

5. Zaključak

U radu je prikazan postupak za izračunavanje pojedinačnih i ukupnih gubitaka i stepena korisnog dejstva generatora primenom kalorimetrijske metode merenja gubitaka u rashladnoj vodi. Stepenn korisnosti generatora izračunat je indirektnom metodom određivanjem i sabiranjem pojedinačnih gubitaka generatora. Pojedinačni gubici generatora određeni su na osnovu merenja gubitaka u karakterističnim režimima rada generatora. Stepenn korisnosti je određen za razna aktivna opterećenja i sa nominalnim sačinioem snage. Dobijena vrednost stepena korisnog dejstva generatora je veća od garantovane vrednosti.

Literatura

- [1] *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*, IEC Standard - Publication 60034-1, 2010.
- [2] *Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*. IEC Standard - Publication 60034-4, 2008.
- [3] *Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Standard 115-2009.
- [4] ГОСТ 10169-77 „Машины электрические трехфазные синхронные. Общие методы испытаний“.
- [5] Izveštaj o garancijskim ispitivanjima revitalizovanog agregata A4 u HE „Đerdap 1“, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ Beograd, 2015. godine.
- [6] Специальные технические условия, Раздел 2: Гидрогенератор.
- [7] Metodologija tipskih ispitivanja glavnog generatora tipa CB 1488/175 – 84 УХЛ4 u HE „Đerdap 1“.

Zahvalnica

Rad je nastao kao rezultat istraživanja u okviru naučno-istraživačkog projekta TR33020 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Abstract: The paper presents the results of deriving by calculation the local and total losses of the generator as well as efficiency determination of the revitalised hydro-generator unit A4 in HPP "Djerdap 1". In order to determine the generator losses and generator efficiency, measurements are performed during the acceptance tests of revitalised aggregate A4 in HPP "Djerdap 1".

Keywords: generator efficiency, calorimeter method, local and total losses

Determination of Generator Losses and Efficiency

Rad primljen u uredništvo: 08.10.2015. godine.

Rad prihvaćen: 20.11.2015. godine.

