

KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE POTROŠAČA SA VISOKOM DISTORZIJOM STRUJE I NAPONA

Miloje Kostić, Branka Kostić, Saša Minić
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Kratak sadržaj: U ovom radu su izloženi rezultati istraživanja na polju kompenzacije reaktivnih snaga u mrežama sa harmonijskom distorzijom napona i struja, koje su znatno iznad najvećih dozvoljenih vrednosti. Prikazan je originalan postupak koji omogućava da se harmonijska distorzija napona postepeno snižava sa uključenjem pojedinih sekcija kondenzatora. Time je harmonijska distorzija napona smanjena dva puta, i sada je u granicama dozvoljenih vrednosti za mreže niskog i srednjeg napona.

Ključne reči: korekcija faktora snage, distorzija napona, distorzija struje, viši harmonici

1. UVOD

Na osnovu podataka o utrošenoj električnoj energiji [1], utvrđeno je da potrošač preuzima količine reaktivne energije koje su 2–3 puta veće u odnosu na utrošenu aktivnu energiju. Posledica toga je da troškovi za reaktivnu energiju učestvuju sa preko 30% u ukupnim troškovima za električnu energiju. Merenjima opterećenja u sekundarnoj mreži TS 10/0.4 kV 2×1000 kVA, "Skijališta 1" na Torniku [2], potvrđeno je da reaktivna opterećenja, samo za Pogon Žičara - Tornik - motora jednosmerne struje snage 730 kW, idu od 250 kvar do 550 kvar u pojedinim režimima. Vrednosti reaktivnih snaga znatno prevazilaze opterećenja po aktivnoj snazi, čak i u režimu maksimalnih opterećenja (od 300-500kW).

Merenjima je utvrđeno da je u opterećenju Pogona Žičara - Tornik prisutna visoka harmonijska distorzija po struji (THDI = 30 - 60%) i naponu (THDU = 8 - 14%). Na osnovu toga je zaključeno da je potrebno, pored nivoa reaktivnih opterećenja, detaljnije razmotriti i harmonijsku distorziju po struji i naponu, posebno po pojedinim harmonicima, počev od harmonika reda $h = 5$ pa do $h = 49$.

2. ANALIZA NIVOVA AKTIVNIH I REAKTIVNIH OPTEREĆENJA I VIŠIH HARMONIKA NAPONA I STRUJA

Jednosmerni motor pogona žičare, snage 730 kW, [1], je jedini potrošač koji je priključen na transformator TR2 10/0.4 kV, 1000 kVA, dok je ostala potrošnja čije opterećenje ide od 30kW do 100 kW priključena na drugi transformator TR1 10/0.4 kV, 1000 kVA. Kako opterećenje motora, u zavisnosti od opterećenja žičare sa putnicima (teretom) i brzine kretanja, ide u granicama 80 - 500 kW i 250-550 kvar, to ono učestvuje sa više od 90% u ukupnoj aktivnoj i reaktivnoj snazi potrošača. U cilju preciznije kvantifikacije navedenih ocena, daju se rezultati merenja opterećenja pogona žičare za karakteristične režime rada, i to:

- pogon žičara bez putnika, u četiri režima, tj. četiri brzine: $v = 2$ m/s, $v = 3$ m/s, $v = 4$ m/s i $v = 5$ m/s, i
- pogon žičara sa teretom (putnicima) pri brzini $v = 5$ m/s.

Rezultati merenja, na sekundarnoj strani transformatora TR2 10/0.4 kV 1000 kVA, pre instaliranja kompenzacije reaktivnih snaga, su dati u Tab. 1, i to:

- opterećenja po aktivnoj (P) i reaktivnoj (Q) snazi, i struji (I),
- harmonijske distorzije po struji (THD_I) i naponu (THD_U),

kao i izmerene vrednosti harmonijske distorzije po naponu (THD_U), na sekundarnoj strani transformatora TR 1 10/0.4 kV, 1000 kVA.

Tab. 1: Rezultati merenja opterećenja po aktivnoj (P), reaktivnoj (Q) snazi i struja (I), kao i harmonijske distorzije po struji (THD_I [%]) i naponu (THD_U [%]) na sekundaru TR2, i po naponu (THD_U [%]) na sekundaru TR1, u karakterističnim režimima pogona žičare [1]

Karakteristični režimi	Transformator pogona žičare (TR2)						
	OPTEREĆENJA				Distorzija struje i napona		
Žičara bez tereta	P	Q	U	I	THD_I	THD_I	THD_U
	[kW]	[kvar]	[V]	[A]	[%]	[A]	[%]
1. $v = 2$ m/s	78	244	439	349	62.50%	218	7.1
2. $v = 3$ m/s	113	255	438.9	368	58.30%	256	8.13
3. $v = 4$ m/s	154	245	437.5	384	51.60%	198	8.86
4. $v = 5$ m/s	184	225	437.4	400	46.20%	185	8.18
Žičara sa teretom							
5. $v = 5$ m/s	535	540	421.2	1044	30.1	314	14

Prvo se sprovodi studijska analiza nivoa aktivnih i reaktivnih opterećenja i viših harmonika struje i napona, u mreži potrošača. Zbog visoke harmonijske distorzije po struji (THD_I) i naponu (THD_U), potrebno je detaljnije razmotriti pojedine harmonike po struji i naponu, počev od harmonika reda $h = 5$ pa do $h = 49$. U Tab. 2 su date izmerene vrednosti pojedinih harmonika po struji (I_h [%]) i naponu (U_h u [%]) na sekundarnoj strani transformatora TR2 10/0.4 kV, 1000 kVA, kao i izmerene vrednosti pojedinih harmonika po naponu (U_h [%]) na sekundarnoj strani transformatora TR1 10/0.4 kV, 1000 kVA, takođe u režimu maksimalnih opterećenja transformatora TR2. S obzirom da je, u režimu malih opterećenja - žičara bez putnika - sa brzinom kretanja $v = 3$ m/s, procenat harmonijske distorzije po struji najveći ($THD_I = 58.3\%$), potrebno je i za ovaj režim:

- utvrditi harmonijsku distorzije po struji u apsolutnim jedinicama [A], i
- detaljnije razmotriti harmonijske distorzije po struji i naponu, posebno po pojedinim harmonicima, počev od harmonika reda $h = 5$ pa do $h = 49$.

Tab. 2: Vrednosti harmonika po struji I_h [%] i naponu U_h [%] na sekundaru TR2, i po naponu U_h [%] na sekundaru TR1, u režimu maksimalnih opterećenja žičare (režim 5)

Red harmonika	Transformator TR2				Transformator TR1	
	Harmonici struje		Harmonici napona		Harmonici napona	
	I_h [A]	I_h [%]	U_h [V]	U_h [%]	U_h [V]	U_h [%]
THD	300.9	30.1		14		5.34
h=1	999.6	100	417	100	433	100
h=5	275.9	27.6		10.4		5.10
h=7	45	4.5		1.6		0.67
h=11	83	8.3		4.8		0.97
h=13	33	3.3		3.3		0.47
h=17	42	4.2		3.6		0.50
h=19	24	2.4		2.3		0.33
h=23	25	2.5		3.0		0.47
h=25	18	1.8		2.2		0.37
h=29	14	1.4		2.3		0.43
h=31	12	1.2		2.0		0.33
h=35	10	1		1.7		0.23
h=37	9	0.9		1.6		0.23
h=41	7	0.7		1.3		0.26
h=43	6	0.6		1.2		0.26
h=47	4	0.4		0.8		0.15
h=49	4	0.4		0.8		0.15

U Tab. 3 su date izmerene vrednosti pojedinih harmonika po struji I_h [%] i naponu U_h [%] na sekundarnoj strani transformatora TR2 10/0.4 kV, 1000 kVA, kao i izmerene vrednosti pojedinih harmonika po naponu U_h [%] na sekundarnoj strani transformatora TR1 10/0.4 kV, 1000 kVA, u režimu malih opterećenja - žičara bez putnika - sa brzinom kretanja $v = 3$ m/s. Izmerene vrednosti harmonijske distorzije po naponu ($THD_U = 8.1\%$) su manje nego u režimu maksimalnih opterećenja pogona žičare i transformatora TR2.

Tab. 3: Vrednosti harmonika po struji I_h [%] i naponu U_h [%] na sekundaru TR2, i po naponu U_h [%] na sekundaru TR1, u režimu malih opterećenja žičare (Režim pod 2)

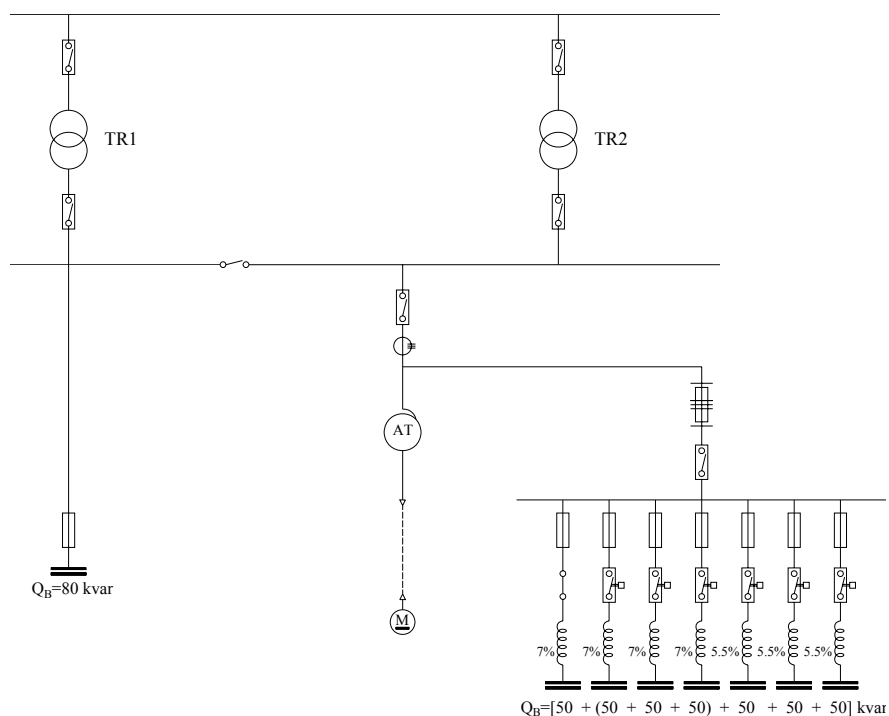
Red harmonika	Transformator TR2				Transformator TR1	
	Harmonici struje		Harmonici napona		Harmonici napona	
	I_h [A]	I_h [%]	U_h [V]	U_h [%]	U_h [V]	U_h [%]
THD	175.40	58.30		8.15		3.73
h=1	100	100	437.5	100	438	100
h=5	154.70	51.40		7.37		3.66
h=7	74.90	24.90		2.60		0.40
h=11	20.20	6.70		1.27		0.33
h=13	24.40	8.10		1.27		0.33
h=17	2.30	0.77		0.10		0
h=19	9.20	3.07		0.97		0
h=23	1.80	0.60		0.17		0
h=25	3.50	1.17		0.40		0
h=29	2.70	0.90		0.40		0
h=31	0.70	0.23		0.07		0
h=35	2.60	0.87		0.43		0
h=37	0.50	0.17		0.07		0
h=41	2.10	0.70		0.47		0
h=43	0.90	0.30		0.17		0
h=47	1.50	0.50		0.37		0
h=49	1.00	0.33		0.27		0

3. STRUKTURA I NAČIN RADA KONDENZATORSKE BATERIJE SA FILTERSKOM SEKCIJAMA

Izmerene harmonijske distorzije struje i napona, na sekundarnim sabirnicama transformatora za pogon žičare, veće su od najvećih dozvoljenih vrednosti [3,4,5]. Kako one uzimaju vrlo visoke vrednosti, $THD_I = 30 - 58\%$ i $THD_U = 8 - 14\%$, to su, već, pri koncipiranju strukture kondenzatorske baterije primenjena određena poboljšanja i inovacije. Navode se najvažnije karakteristike u vezi sa strukturom i načinom rada iste.

1. Kondenzatorska baterija snage 350 kvar se formira od jedne fiksno priključene sekcije i 6 sekcija koje rade u režimu automatske regulacije ($Q_B = 50 \text{ kvar} + 6 \times 50 \text{ kvar}$) sa antirezonantnim filterima. Struktura baterije je sledeća (Sl. 1):

- fiksno priključenu (nultu) sekciju sa stalno uključenim kontaktorom (Sl. 1) obrazuju kondenzatori snage 50 kvar i prigušnice sa $p = 6.92\%$ (rezonantna učestanost 215 Hz),
- sledeće 3 sekcije, takođe, obrazuju kondenzatori snage 50 kvar i prigušnice sa $p = 6.92\%$ (rezonantna učestanost 215 Hz), koje se po potrebi automatski uključuju/isključuju (ukupno 4 sekcije kondenzatora sa prigušnicama $p = 6.92\%$), i
- poslednje 3 sekcije obrazuju kondenzatori snage 50 kvar i prigušnice za $p = 5.42\%$ (rezonantna učestanost 190 Hz), koje se po potrebi automatski uključuju/isključuju (Sl. 1).



Sl. 1: Jednopolna šema filterske kompenzacije u pogonu žičare "Tornik"

2. Tako izvedeno rešenje omogućava da po priključenju 1. sekcije kondenzatora putem regulatora, uz postojeću fiksno priključenu (nultu) sekciju, odmah bude uključeno 100 kvar sa prigušnicama $p = 6.92\%$, kako bi bilo dovoljno kapaciteta da se kondenzatori ne preopterećuju strujama viših harmonika (najviše strujom 5. harmonika). Daljim uključivanjem naredne dve sekcije kondenzatora, sa prigušnicama $p = 6.92\%$, se obezbeđuje dovoljna snaga baterije (200 kvar) u režimu malih opterećenja žičare kada reaktivna opterećenja idu od 230 kvar do 260 kvar.

3. U režimu većih opterećenja žičare, već sa priključenjem 4. sekcije iz automatske regulacije, uključuje se sekcija kondenzatora sa prigušnicom $p = 5.42\%$, koja ima 2 puta veću apsorpcionu moć kada su u pitanju struje 5. harmonika. Time se znatno smanjuju

(kompenzuju) struje 5. harmonika, a u nešto manjoj meri i struje ostalih harmonika. To je bilo moguće pošto se, sa priključenjem dovoljnog broja (ili dovoljne snage) filterskih sekcija, napon 5. harmonika smanjio na prihvatljivu meru ($\leq 5\%$), tako da se kondenzatori i prigušnice ne preopterete strujama viših harmonika. To su pokazali proračuni a potvrdile i kasnije provere na bazi merenja čiji se rezultati daju u ovom izveštaju.

4. PRORAČUNI STRUJA I NAPONA VIŠIH HARMONIKA

Da bi se kvantifikovao nivo prisustva struja i napona viših harmonika, prvo su sprovedena detaljna merenja, a najvažniji rezultati su dati u Tab. 1, Tab. 2 i Tab. 3. Pri proračunu struja i napona viših harmonika, pored rezultata merenja napona (U_h) i struja (I_h) viših harmonika bilo je potrebno što tačnije utvrditi reaktanse elemenata zamenskih šema za više harmonike. Na raspolaganju su bili podaci napona kratkog spoja razmatranih transformatora TR1 10/0.4 kV, 1000 kVA, podaci o napojnom vodu 10 kV i snazi kratkog spoja u tački priključka na distributivnu mrežu 10 kV [1].

Proračun struja i napona viših harmonika se vrši pomoću ekvivalentne šeme na Sl. 2. U navedenoj šemi su uključene sledeće reaktanse:

- $X_{TS35/10}$ - reaktansa transformatora TS 35/10 kV, 8 MVA, koji napaja mrežu 10 kV,
- X_{v10} - reaktansa kablovskog voda 10 kV, kojim je potrošač priključen na TS 35/10 kV,
- $X_{TS10/0.4}$ - reaktansa transformatora 1000 kVA (TR2), koji napaja pogon žičare

Uticaj pogona žičare je ekvivalentiran strujnim izvorom viših harmonika (I_h), za koji se ukupna harmonijska distorzija po struji THDI, kao i struje pojedinih harmonika, I_h ($h = 3, 5, 7, 11, 13, \dots, 47, 49$) utvrđuju merenjem. Kada nema drugih potrošača, ili je impedansa preostalih potrošača koje napaja transformator relativno velika, $Z_p > 100X_{TS10/0.4}$, onda se grana koja karakteriše tu potrošnju može smatrati isključenom (otvoreni prekidači za Z_p na Sl. 2).

Kondenzatorska baterija koju treba instalirati, pored kondenzatora sadrži i redno vezane prigušnice sa kojima formira antirezonantni filter, i ekvivalentirana je rednom vezom kapaciteta i induktivnosti (Sl. 2). Na desnoj strani ekvivalentne šeme (Sl. 2) je naznačen i drugi transformator TS 10/0.4 kV, 1000 kVA preko koga se napaja ostala potrošnja relativno male snage (time i velike impedanse), tako da se redno kolo koje obrazuje reaktansa tog transformatora i pomenuta impedansa može smatrati otvorenim za struje viših harmonika, i praktično nema uticaja na struje i napone viših harmonika u distributivnoj mreži. Obrnuto, sve promene napona viših harmonika na primarnim sabirnicama 10 kV se direktno prenose i na sekundarne sabirnice ovog drugog transformatora, praktično u punom iznosu ($U_{h(0.4)} \approx U_{h(10)}$), Sl. 2, i stvaraju smetnje.

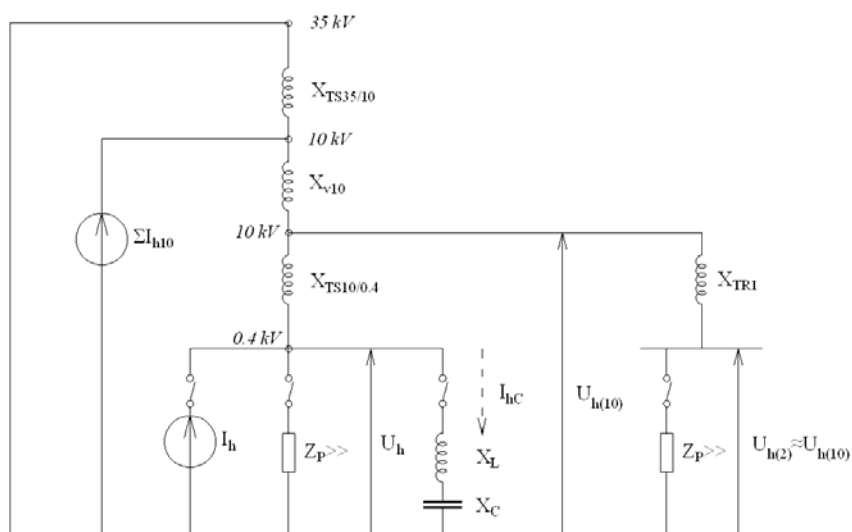
Podaci o kapacitivnoj reaktansi kondenzatora (X_C) i induktivnoj reaktansi antirezonantne prigušnice ($X_L = 0.07X_C$), Sl. 2, se mogu odrediti sa dovoljnom sigurnošću na osnovu kataloških podataka za iste. Kada su u pitanju reaktanse induktivne grane koju čini redna veza reaktanse transformatora TR2 ($X_{TS10/0.4}$), kablovskog voda 10 kV (X_{v10}) i transformatora TS 35/10 kV, 8 MVA ($X_{TS35/10}$), na osnovu odgovarajućih podataka, utvrđena je vrednost ukupne redne reaktanse (Sl. 2), koja iznosi $X_{TS10/0.4} + X_{v10} + X_{TS35/10} = 8\%$.

Proračun se vrši pomoću ekvivalentne šeme na Sl. 2. Proračun bi mogao biti komplikovan jer, pored izvora viših harmonika u mreži potrošača, postoje izvori viših

harmonika u mreži višeg napona. Da se taj problem savlada, pomaže originalan postupak prvog autora ovog rada. Radi se o "Postupku za indirektno merenje vrednosti napona ekvivalentnih izvora viših harmonika u mreži višeg i nižeg napona" [6].

U konkretnom slučaju (ekvivalentna šema na Sl. 2), bio je dostupan i eksperimenat kada nije bilo injektovanih struja viših harmonika u sekundarnoj mreži, tj. kada je $\Sigma I_{2h} = I_h = 0$, pa su naponi viših harmonika izmereni na primarnoj strani transformatora $U'_{1-h} = U_{h0(10)} = U_{h0}$ (U_{h0} - izmerene vrednosti napona viših harmonika na sekundarnim sabirnicama istog transformatora, Sl. 2). Za taj slučaj, dolazi se do izraza za određivanje napona viših harmonika na sekundarnim sabirnicama transformatora $U_h = U_{2-h}$:

$$U_h \approx U_{h0} + h(X_{TS35/10} + X_{v10} + X_{TS10/0.4}) \cdot I_h \quad (1)$$



Sl. 2: Ekvivalentna šema žičare "Tornik" za proračun

Tako se na osnovu izmerenih vrednosti, za napone i struje 5. harmonika:

- u režimu maksimalnih opterećenja žičare (Režim 5), $U_{h(1)} = 25.18 \text{ V}$ i $I_{h(1)} = 276 \text{ A}$, i

- u režimu malih opterećenja žičare (Režim pod 2), $U_{h(2)} = 17.74 \text{ V}$ i $I_{h(2)} = 163 \text{ A}$

dolazi do vrednosti komponente napona 5. harmonika $U_{5,0} = 7.06 \text{ V}$ (ili $U_{5,0} = 2.90\%$), koji je posledica injektiranja struja 5. harmonika kada bi one postojale samo u mreži višeg napona. Važno je naglasiti da je merenjima potvrđena tačnost date metode [6]. Naime, izmerena vrednost napona 5. harmonika je bila $U_{h0} = 2.90 - 3.00\%$, kada nije bilo izvora viših harmonika (time i 5. harmonika) u mreži nižeg napona, tj. kada je bio isključen pogon žičare. Time je proverena mogućnost primene opisanog postupka za tačniji proračun struja i napona viših harmonika u konkretnim uslovima.

Vrednost tražene komponente napona 5. harmonika, $U_h - U_{h0}$, koji je posledica injektiranja izvora viših harmonika u mreži nižeg napona iznosi:

- $U_h - U_{h0} = 25.18 \text{ V} - 7.06 \text{ V} = 17.12 \text{ V}$, u režimu maksimalnih opterećenja žičare, i

- $U_h - U_{h0} = 17.74 \text{ V} - 7.06 \text{ V} = 10.68 \text{ V}$, u režimu minimalnih opterećenja žičare.

5. REZULTATI PRORAČUNA STRUJA I NAPONA VIŠIH HARMONIKA U SEKCIJAMA KONDENZATORA

Za proračun struja i napona viših harmonika u sekcijama kondenzatora kada su one uključene, u cilju kompenzacije reaktivne energije, potrebno je poznavati reaktanse elemenata ekvivalentne šeme za proračun (Sl. 2) i vrednosti napona odgovarajućih harmonika. Vrednosti reaktansi sekcija kondenzatora sa filterskim sekcijama $(X_L - X_C)_h$ i reaktanse mreže $(X_{TS35/10} + X_{v10})$ za pojedine harmonike, svedene na snagu od 1000 kVA, se sračunavaju, redom:

- $(X_{TS35/10} + X_{v10})_h = 0.08 \cdot h$ reaktanse mreže i transformatora, za harmonik reda (h), a
- $(X_L - X_C)_h = (Q_C/S_i) (0.0692 \cdot h - 1/h)$, za reaktansu sekcije kondenzatora sa $p = 6.92\%$, i
- $(X_L - X_C)_h = (Q_C/S_i) (0.0542 \cdot h - 1/h)$, za reaktansu sekcije kondenzatora sa $p = 5.42\%$, gde je h - red, a $(X_{TS35/10} + X_{v10}) = 0.08$ tj. – reaktansa napojne mreže sa transformatorom snage 1000 kVA, za osnovni (prvi) harmonik.

Merenjima je, takode, utvrđeno da su vrednosti napona viših harmonika, reda $h \geq 7$, kada je bio isključen pogon žičare, vrlo male, tj. $U_{h0} \ll U_h$ (tj. $U_h - U_{h0} \approx U_h$) pa se, u datom slučaju, može pisati da je

$$U_h \approx h(X_{TS35/10} + X_{v10} + X_{TS10/0.4}) \cdot I_h, \text{ za } h \geq 7 \quad (6)$$

Kako se i reaktanse (grana ekvivalentne šeme sa Sl. 2) značajno povećavaju za više harmonike, to se struje harmonika reda $h \geq 7$, mogu približno sračunati po izrazu:

$$I_{(L-C)h} = \frac{U_h}{(X_L - X_C)_h}, \text{ za } h \geq 7 \quad (7)$$

tj. na osnovu merenjima utvrđenih vrednosti napona harmonika reda $h \geq 7$ (Tab. 2 i Tab. 3). Jedino se pri utvrđivanju vrednosti struje 5. harmonika, ne mogu koristiti izmerene vrednosti napona 5. harmonika (U_5), već vrednosti napona koje su utvrđene pomoću opisanog postupka, tj. vrednosti:

$U_h - U_{h0} = 25.18 \text{ V} - 7.06 \text{ V} = 17.12 \text{ V}$, u režimu maksimalnih opterećenja žičare, i

$U_h - U_{h0} = 17.74 \text{ V} - 7.06 \text{ V} = 10.68 \text{ V}$, u režimu malih opterećenja žičare.

Za date režime pogona sračunate su odgovarajuće vrednosti

- napona osnovnog (U_1) i viših harmonika ($U_5, U_7, U_{11}, U_{13}, U_{17}, U_{19}$ i U_{21}) i ukupnog harmonijskog izobličenja napona (THD_U),
- struja osnovnog (I_1) i viših harmonika ($I_5, I_7, I_{11}, I_{13}, I_{17}, I_{19}$ i I_{21}), ukupnog harmonijskog izobličenja struja (THD_I) i I_{RMS} .

Relevantni rezultati proračuna navedenih vrednosti napona i struja su dati u Tab. 4, za režim minimalnih opterećenja, pri uključenoj kompenzaciji od 100 kvar (uključena fiksna sekcija kondenzatora od 50 kvar i jedna sekcija od 50 kvar koju uključuje regulator), 200 kvar (uključene sve sekcije sa prigušnicama $p = 6.92\%$).

Tab. 4: Rezultati proračuna osnovnog (I1) i viših harmonika struje (I5, I7, I11, I13, ... I25), THD_I i I_{RMS} kroz kondenzatore, **u režimu rada žičare bez tereta**, pri naponu 420 V

Q _C [kvar]	0 (nema kondenzatora)	100	200	300
U ₁ [V]	420/242	420/242	420/242	420/242
I _{C,1} [A]	-	127.43	254.86	382.29
THD _{IC} [A]	-	66.18	124.7	171.98
I _{C, RMS} [A]	-	138.32	273.02	402.97
I _{C,max} [A]	-	145	290	435
I _{C,max} /I _{C,RMS}	-	1.049	1.062	1.079
THD(U _{T2}) [%]	8.1	7.08	5.67	5.01
THD(U _{T1}) [%]	4.08	3.85	3.61	3.47
Viši harmonici struje, 100(I _h / I ₁) %				
THDI _C (%)		54.52	51.33	47.2
h=5		53.81	50.71	46.62
h=7		4.02	3.62	3.3
h=11		6.06	5.57	5.14
h=13		2.32	2.13	1.98
h=17		2.9	2.67	2.48
h=19		1.63	1.5	1.4
h=23		1.67	1.55	1.44
h=25		1.18	1.09	1.01

Proračuni vrednosti navedenih veličina su sprovedeni i za režim maksimalnih opterećenja, pri uključenoj kompenzaciji, redom:

- od 100 kvar, 150 kvar i 200 kvar, sve sekcije su sa prigušnicama p = 6.92%,
- 250 kvar = 200kvar (sa prigušnicama p = 6.92%) + 50 kvar (sa prigušnicama p = 5.42%),
- 300 kvar = 200kvar (sa prigušnicama p = 6.92%) + 100 kvar (sa prigušnicama p = 5.42%), i
- 350 kvar = 200kvar (sa prigušnicama p = 6.92%) + 150 kvar (sa prigušnicama p = 5.42%).

Dobijeni rezultati su pokazali da su sračunate vrednosti pojedinih harmonika struje vrlo visoke, posebno 5. harmonika. Ukupne distorzije napona (THD_U) i struje (THD_I) na vodu na koji je priključena kondenzatorska baterija su takođe visoke, ali su manje od najviše dozvoljene vrednosti za kondenzatore i odgovarajuće prigušnice:

- THD_I ≤ THD_{IC,max} = 46%, za sekcije sa prigušnicama p = 6.92% (prve 4 sekcije), i
- THD_I ≤ THD_{IC,max} = 72%, za sekcije sa prigušnicama p=5.42% (sekcije 5, 6 i 7).

6. REZULTATI MERENJA OPTEREĆENJA I HARMONIJSKE DISTORZIJE PRI AUTOMATSKOJ KOMPENZACIJI

Aktivna i reaktivna opterećenja pogona žičare, kao i harmonijska distorzija struje i napona, se utvrđuju merenjem odgovarajućih veličina na napojnom vodu na koji je priključen primar autotransformatora 1000 kVA (400/500 V) preko koga se napaja pogon žičare. Rezultati merenja se daju u vidu tabela, za karakteristične režime rada:

- za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s, kada je u pitanju rad sa malim teretom, (bez putnika, ili sa malim brojem putnika), i
- za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s, kada je u pitanju rad sa velikim teretom (korpe su popunjene teretom koji simulira putnike).

6.1. Režimi rada i opterećenja voda za pogon žičare sa malim teretom

U Tab. 5 i Tab. 6, za pogon žičare, su dati podaci o:

- izmerenim vrednostima distorzije napona (THD_U) i struje (THD_I), Tab. 5
- izmerenim vrednostima aktivne (P) i reaktivne (Q) snage, Tab. 6,

redom za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s, za rad sa malim teretom [7].

Navedene veličine predstavljaju izmerene vrednosti napona, struja opterećenja i ukupne distorzije napona (THD_U) i struje (THD_I) na vodu kojim se napaja pogon žičare.

Tab. 5: Izmerene vrednosti ukupne distorzije napona (THD_U) i struje (THD_I), u sve tri faze, redom, za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s

Datum	Vreme	THD_{U1} [%]	THD_{U2} [%]	THD_{U3} [%]	THD_{I1} [%]	THD_{I2} [%]	THD_{I3} [%]	THD_{U1} [A]	THD_{U2} [A]	THD_{U3} [A]
30.11.2009.	12:42:20	6.1	5.7	6.3	126.8	131.7	115.9	148.1	151.2	142.9
30.11.2009.	12:54:30	6.4	6.2	6.5	59.5	62.1	53.3	123.4	126.5	117.2
30.11.2009.	13:06:45	7.0	6.8	7.1	46.4	50.3	45.1	123.8	129.4	121.7
30.11.2009.	13:31:55	6.8	6.8	7.0	40.8	44.0	40.0	133.5	139.6	131.7

Tab. 6: Izmerene vrednosti aktivne (P) i reaktivne (Q) snage, u sve tri faze, redom, za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s

Datum	Vreme	P_1 [kW]	P_2 [kW]	P_3 [kW]	P_{ukupno} [kW]	Q_1 [kvar]	Q_2 [kvar]	Q_3 [kvar]	Q_{ukupno} [kvar]
30.11.2009.	12:42:20	27.05	26.29	29.05	82.39	35.96	37.05	34.45	107.46
30.11.2009.	12:54:30	49.25	48.24	52.33	149.81	17.80	-30.52	-28.34	-41.06
30.11.2009.	13:06:45	62.41	60.32	63.65	186.38	31.66	32.80	30.77	95.24
30.11.2009.	13:31:55	74.24	72.34	75.80	222.39	38.96	39.78	37.51	116.25

U odnosu na rezultate merenja istih veličina, u odgovarajućim režimima pre i nakon ugradnje postrojenja za kompenzaciju reaktivnih snaga, uočavaju se sledeća poboljšanja:

- reaktivna opterećenja su pala na oko 90 kvar u proseku (Tab. 6),
- efektivne vrednosti struja opterećenja su manja za 50%, u proseku, dok je
- ukupna distorzija napona je pala, sa $THD_U = 9\%$, na $THD_U = 6.5\%$, u proseku.

6.2. Režimi rada žičare sa većim teretom

U Tab. 7 i Tab. 8, za pogon žičare, su dati podaci o:

- izmerenim vrednostima distorzije napona (THD_U) i struje (THD_I), Tab. 7,
- izmerenim vrednostima aktivne (P) i reaktivne (Q) snage, za sve tri faze, Tab. 8,

redom, za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s, za rad sa velikim teretom (korpe popunjene teretom koji simulira putnike).

Tab. 7: Izmerene vrednosti ukupne distorzije napona (THD_U) i struje (THD_I), u sve tri faze, redom, za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s

Datum	Vreme	U_{THD1} [%]	U_{THD2} [%]	U_{THD3} [%]	A_{THD1} [%]	A_{THD2} [%]	A_{THD3} [%]	A_{THD1} [A]	A_{THD2} [A]	A_{THD3} [A]
01.12.2009.	13:31:20	6.5	6.1	6.8	85.2	91.8	82.0	128.9	132.4	125.5
01.12.2009.	13:33:25	7.1	6.8	7.2	46.6	50.7	45.8	125.2	130.5	122.5
01.12.2009.	13:34:10	7.6	7.4	7.7	38.2	41.3	36.6	137.0	144.6	133.3
01.12.2009.	13:37:10	7.2	6.8	6.8	26.4	28.3	23.7	116.5	123.4	107.3

Tab. 8: Izmerene vrednosti aktivne (P) i reaktivne (Q) snage, u sve tri faze, redom, za brzine žičare od 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s

Datum	Vreme	P_1 [kW]	P_2 [kW]	P_3 [kW]	P_Σ [kW]	Q_1 [kvar]	Q_2 [kvar]	Q_3 [kvar]	Q_Σ [kvar]
01.12.2009.	13:31:20	34.43	33.21	35.49	103.13	32.91	33.22	31.57	97.70
01.12.2009.	13:33:25	63.01	60.59	63.35	186.95	32.81	33.86	31.45	98.12
01.12.2009.	13:34:10	79.01	78.23	81.69	238.94	45.81	45.45	43.62	134.88
01.12.2009.	13:37:10	101.95	101.67	105.79	309.41	38.47	38.06	35.34	111.87

U odnosu na rezultate merenja istih veličina, u odgovarajućim režimima i pre ugradnje postrojenja za kompenzaciju reaktivnih snaga, uočavaju se sledeća poboljšanja:

- reaktivna opterećenja su pala na oko 110 kvar u proseku (Tab. 6),
- efektivne vrednosti struja opterećenja su manja za 40%, u proseku,
- ukupna distorzija napona je pala, sa $THD_U = 14\%$, na $THD_U \approx 6.5\%$, u proseku.

Posebno je značajna činjenica da je vrednost ukupne distorzije napona, sa $THD_U = 14\%$, pala na $THD_U = 6.5\% \leq 8\%$ (najveće dozvoljene vrednosti po [4]).

Navedeno smanjenje bi iznosilo oko 8%, da transformatori 2×1000 kVA nisu priključeni u paralelan rad (uključeno je spojno polje na sabirnicama 0.4 kV).

7. EFEKTI KOMPENZACIJE NA SMANJENJE POTROŠNJE REAKTIVNE ENERGIJE I HARMONIJSKE DISTORZIJE

Smanjenja reaktivnih opterećenja pogona Žičare (ΔQ) je jednako izmerenoj kapacitivnoj snazi kondenzatorske baterije (Q_C). To znači da se efekat kompenzacije reaktivnih opterećenja može odrediti na osnovu rezultata merenja reaktivnih snaga kondenzatorske baterije za karakteristične režime rada žičare, tj. za karakteristična opterećenja pogona žičare (motora) po aktivnoj snazi.

Smanjenja harmonijske distorzije struje pogona Žičare, takođe, su jednaka izmerenoj harmonijskoj distorziji struje kondenzatorske baterije, tj. $\Delta THD_I \approx THD_{IC}$. Takođe, smanjenje odgovarajuće snage distorzije (D) pogona žičare jednako je izmerenoj harmonijskoj distorziji snage (D_C) kondenzatorske baterije, tj. $\Delta(D) \approx D_C$.

Efekat kompenzacije na smanjenje harmonijske distorzije struje i snage može se odrediti na osnovu rezultata merenja harmonijske distorzije struje kondenzatorske baterije, za date karakteristične režime rada pogona žičare.

Efekti kompenzacije reaktivne energije se procenjuju na osnovu kapacitivne reaktivne snage kondenzatorskih baterija u dva karakteristična režima. Ta snaga se određuje na osnovu broja uključenih sekcija kondenzatora i izmerene snage jedne sekcije kondenzatora koja, u proseku, iznosi 55 kvar, i veća je za 10% u odnosu na deklarisanu snagu odgovarajućih kondenzatora. To povećanje je posledica nešto većeg napona (za 3 - 4%, u odnosu na 400 V) i merenjem utvrđene povećane kapacitivnosti kondenzatora za 5 - 6%, u odnosu na kataloške podatke (dozvoljeno odstupanje je od -5% do +10%). Merenjem, a i posmatranjem režima rada, je utvrđeno:

- da su skoro uvek uključene 4 sekcije kondenzatora ukupne snage 220 kvar, za rad sa malim teretom, pošto je reaktivno opterećenje približno jednako, za brzine žičare od 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s i 5 m/s, i iznosi 230 kvar \pm 10%,
- da je, u proseku uključeno 6 sekcija kondenzatora ukupne snage 330 kvar, kada su u pitanju režimi rada sa velikim teretom (tj, rad žičare sa putnicima), pošto tada reaktivno opterećenje ide od 400 kvar do 500 kvar, za brzine žičare od 2 m/s \div 5 m/s,

Za navedene režime, na osnovu datih smanjenja reaktivne snage ($\Delta Q = Q_C$), godišnji efekti u smanjenju potrošnje reaktive energije iznose:

- za režim sa malim teretom, 220 kvar \cdot 500 h/god = 110 000 kvarh/god, i
- za režim maksimalnih opterećenja, 330 kvar \cdot 900 h/god = 297 000 kvarh/god.

Ukupne godišnje uštede od 407000 kvarh/god, približne su projektovanim uštedama (415000 kvarh/god) ili od oko 245000 Din/god, i imaju relativno skromnu godišnju stopu povraćaja od oko 12%.

Smanjenja harmonijske distorzije struje pogona Žičare, jednako je izmerenoj harmonijskoj distorziji struje kondenzatorske baterije (oko 33%), tj. $\Delta THD_1 \approx THD_{1C}$. Takođe, smanjenje odgovarajuće snage distorzije snage (D) pogona Žičare, jednako je izmerenoj harmonijskoj distorziji snage (D_C) kondenzatorske baterije, tj. $\Delta(D) \approx D_C$. Naime, savremene merne grupe za potrošnju energije mere i smanjenje reaktivne energije, koje odgovara smanjenju harmonijske distorzije struje i snage, pa se i ti efekti računavaju. Tako efekat kompenzacije na smanjenje reaktivne energije, koja odgovara harmonijskoj distorziji struje i snage, iznosi približno 33% sračunatog smanjenja potrošnje reaktive energije, i iznosi 135700 kvarh/god ($0.33 \cdot 407000$ kvarh/god), pa će biti registrovano ukupno smanjenje u potrošnji reaktive energije od 542700 kvarh/god, i veće je od projektovanih ušteda (415000 kvarh/god).

Finansijska vrednost navedenih ušteda je oko 330 000 Din/god. Time godišnja stopa povraćaja dostiže zavidan nivo od oko 15%, iako se radi o relativno skupom kondenzatorskom postrojenju sa filterskim sekcijama, koje je za oko dva puta skuplje od uobičajene automatske kompenzacije (bez filterskih prigušnica).

Dodatna kompenzacija reaktivne snage se obezbeđuje fiksnom kompenzacijom od 80 kvar na sekundarnim sabirnicama transformatora TR1 10/0.4 kV, 1000 kVA. Radi se o originalnom rešenju, sa kojim se obezbeđuje da rezonantna učestanost bude oko 15. harmonika ($h_{r1} \approx 15$), ali rezonanca nije moguća pošto transformatori sprege D/y predstavljaju otvoreno kolo za harmonike deljive sa 3, tj. za harmonike 3., 9. i 15. reda.

Pošto je navedena fiksna kompenzacija od 80 kvar uključena svih 8760 h/god, efekti u smanjenju potrošnje reaktive energije iznose

$$80 \text{ kvar} \cdot 8760 \text{ h/god} = 700\,800 \text{ kvarh/god}$$

pa godišnje uštede, od ove kompenzacije, iznose oko 400000 Din/god, a povraćaj uloženi sredstava je oko 5 meseci. Time se povećava smanjenje ukupnih troškova za utrošenu reaktivnu energiju na oko 730000 Din/god, pa godišnja stopa povraćaja ukupno uloženi sredstava (za kompenzaciju) iznosi 30%.

U odnosu na rezultate merenja distorzije napona struje, pre ugradnje postrojenja za kompenzaciju reaktivnih snaga, uočavaju se sledeća poboljšanja:

- u režimu malih tereta distorzija napona je pala sa $\text{THD}_U = 9\%$, na $\text{THD}_U = 6.5\%$, i
- u režimu velikih tereta distorzija napona je pala sa $\text{THD}_U = 14\%$, na $\text{THD}_U \approx 6.5\%$,

za sve režime brzina od 2 m/s – 5 m/s. Posebno je značajno smanjenje ukupne distorzije napona sa $\text{THD}_U = 14\%$, na $\text{THD}_U = 6.5\% \leq 8\%$ (najviše dozvoljene vrednosti, [7]).

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata merenja potvrđene su originalane pretpostavke da je moguće postepeno snižavati harmonijsku distorziju napona sukcesivnim uključanjem pojedinih sekcija kondenzatora sa filterskim prigušnicama. Tako je izborom pogodne strukture sekcija navedenih kondenzatora, harmonijska distorzija napona smanjena za dva puta i dovedena u dozvoljene granice. Sve to je potvrđeno merenjima po realizaciji projekta. Time je omogućeno da se, primenom filterskih sekcija kondenzatora, kompenzacija reaktivne energije sprovede bez primene skupih aktivnih filtara i u uslovima kada je distorzija napona iznad dozvoljenih vrednosti, što je bio i osnovni zadatak ovih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Podloge Naručioca sa potrebnim podacima o potrošnji električne energije, sa jednopolnim šemama transformatorske stanice i električnog razvoda za pogon Žičare "Skijališta 1" na Torniku .
- [2] Studija, "Analiza opterećenja i viših harmonika i izrada rešenja za kompenzaciju reaktivne energije", Elaborat, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2009.godine.
- [3] Standard IEC 1000-2-2 Electromagnetic compatibility EMC, Part 2, 1990.
- [4] "Power factor correction and harmonic filtering", Circutor, General catalogue, 2007. god.
- [5] Katalog Schneider Electric, Poglavlje Kompenzacija reaktivne energije (na srpskom jeziku), 2008. godine.
- [6] M. Kostić, "Postupak za indirektno merenje vrednosti napona ekvivalentnih izvora viših harmonika u mreži višeg i nižeg napona", Prijava patenta P-411/2006, "Glasnik intelektualne svojine", broj 2006/6.
- [7] Elaborat "Analiza rezultata merenja i efekata kompenzacije reaktivne energije na smanjenje potrošnje reaktivne energije i smanjenje viših harmonika", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2009.

Abstract: In this paper the results of investigation in the area of power factor correction of consumers with current and voltage distortion are presented. The corresponding values of the voltage and current harmonics are greater than the highest admissible values for capacitors and corresponding filters reactors. The original procedure, which enables successive decreasing of harmonic distortion by switching the capacitor sections, is presented. By using the proposed method, the voltage distortion is decreased by two times. In such way, the corresponding voltage and current harmonics are under the highest admissible values for low- and medium- voltage networks.

Key words: *power factor correction,, voltage distortion, current distortion, harmonics*

POWER FACTOR CORRECTION OF CONSUMERS WITH HIGH DISTORTION OF VOLTAGE AND CURRENT

Miloje Kostić, Branka Kostić, Saša Minić
Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade