

ZAKONI O OPSEZIMA U KOJIMA SE KREĆE FAKTOR SNAGE U ELEKTRODISTRIBUTIVNIM I PRENOSNIM MREŽAMA

Tomislav Milanov, dipl. el. ing.¹
PD „ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD“ – BEOGRAD

Radom se prikazuju karakteristike kablovskih i nadzemnih vodova i transformatora koji u interakciji sa faktorom snage potrošača na 0,4 kV determinišu opseg u kome se kreće faktor snage u mrežama. Prikazuje se kretanje faktora snage na svim naponskim nivoima elektrodistributivne i prenosne mreže pri čemu faktor snage potrošača na naponskom nivou 0,4 kV ima diskretne vrednosti (0.7, 0.8, 0.9, 0.95 i 1). Zakonitosti kretanja faktora snage su za visokonaponske mreže 400 kV i 110 kV i srednjenaponske mreže 35 kV, 20 kV i 10 kV i važe za elektroenergetski sistem Srbije i Balkanskog poluostrva.

Očigledno se zaključuje da se sa povećanjem razlika između zimske i letnje potrošnje električne energije, ne samo u našem elektroenergetskom sistemu, proširuje opseg u kome se kreće faktor snage na raznim naponskim nivoima u mreži, i da izgrađenost visokonaponske elektrodistributivne i prenosne mreže određuje nivo uvedene regulisane kompenzacije reaktivne snage u elektrodistributivnoj i prenosnoj mreži prema zahtevima proizvodno – prenosnog dela elektroenergetskog sistema.

S obzirom na činjenicu da je u proračunima korišćena zamenska "Π"šema za vodove i zamenska "T" šema za transformatore, rad predstavlja krajnji domet u istraživanjima stacionarnih režima u elektrodistributivnim mrežama, krunu ozbiljnih proračuna.

Rad može da bude koristan ekspertima koji preduzimaju mere da se faktor snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema kreće u strogo definisanom opsegu. Takođe, rad može da bude koristan i planerima i projektantima elektrodistributivne i prenosne mreže za definisanje i realizaciju potrebnog obima uvođenja fiksne i/ili regulisane kompenzacije reaktivne snage.

Ključne reči: *Elektrodistributivne i prenosne mreže, kapacitivne snage kablovskih i nadzemnih vodova, reaktanse energetskih transformatora, faktor snage u mrežama.*

THE LAWS OF POWER FACTOR RANGE WITHIN THE POWER DISTRIBUTION NETWORKS

The paper deals with the characteristics of cable and overhead lines and transformers determining, through interaction with the power factor of consumers at 0.4 kV, the scope of the power factor range within the networks. It presents the power factor range at all voltage levels of power distribution and power transmission networks, where the power factor of consumers at 0.4 kV voltage level has discreet values (0.7, 0.8, 0.9, 0.95 and similar). The laws of power factor range refer to 400 kV and 110 kV high-

¹ Masarikova 1-3 11000 Beograd, tel. 011/328-11-10 lok. 2357; faks: 34-05-017; tmilanov@edb.eps.co.yu

voltage networks and 35 kV, 20 kV i 10 kV medium-voltage networks and apply to the Electric Power System of Serbia and the Balkan Peninsula.

It may obviously be concluded that with the increase of differences between the winter and summer power consumption, the scope of the power factor range is expanded at various voltage levels, not only in our electric power system, and that the level of construction of the high-voltage power distribution and transmission networks shall determine the level of the introduced regulated compensation of the reactive power in the power distribution and transmission network in accordance with the requirements of the generating and transmission part of the electric power system.

The paper could be useful to experts taking measures in order to keep the power factor range in the generating part of the electric power system within a strictly defined scope. The paper could also be useful to planners and designers of the power distribution and transmission networks in defining and implementing the required volume of introduced fixed and/or regulated reactive power compensation.

Key words: Power distribution and transmission networks, capacity power of cable and overhead lines, energy transformer reactances, power factor in networks.

1. UVOD

Dugoročno planiranje razvoja elektrodistributivnog i proizvodno – prenosnog dela elektroenergetskog sistema obuhvata i planiranje potreba za dopunskim izvorima reaktivne snage u mreži, kako bi se omogućio stabilan rad proizvodnih agregata te optimizirao pogon sistema u svim uslovima eksploatacije.

Analize na modelima elektrodistributivne i prenosne mreže pokazale su da vrednost faktora snage potrošača značajno utiče na **Joule** – ove gubitke i padove napona na svim naponskim nivoima mreže (lit.2. lit.3), kao i na kretanje faktora snage u sredjenaponskim i visokonaponskim mrežama; ovaj rad upravo prikazuje nekoliko zakonitosti u kretanju faktora snage u mreži kao posledice interakcije između faktora snage potrošača i karakteristika transformatora i vodova na svim naponskim nivoima.

U racionalnim prenosnim i elektrodistributivnim mrežama sa aspekta dužine vodova i ukupnog broja transformatora, pri čemu se poštuju pravila sigurnosti u izgradnji mreže, sagledava se kretanje faktora snage u sredjenaponskim i visokonaponskim elektrodistributivnim mrežama sa posebno prikazanim uticajem dužine visokonaponske mreže 380 kV na kretanje faktora snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema.

2. KARAKTERISTIKE ELEKTRODISTRIBUTIVNE I PRENOSNE MREŽE

Analiziran je veliki broj modela elektrodistributivne i prenosne mreže koji su tipični za pojedine delove mreže na konzumu EDB; pri tome elektrodistributivni modeli mogu biti ili sa direktnom transformacijom 110/10(20) kV ili sa dva nivoa transformacije – 35/10 kV i 110/35 kV. U ovim uslovima će u ovom radu biti prikazano kretanje faktora snage na sabirnicama 10(20) kV u TS X/10(20) kV, na sabirnicama 110 kV u TS X/110 kV i u proizvodnom delu sistema – a sve u zavisnosti od aktivnog opterećenja potrošača i vrednosti faktora snage potrošača u niskonaponskoj mreži.

U transformaciji 10(20)/0,4 kV i mreži 0,4 kV obuhvaćene su sve vrste vodova (kablovski i nadzemni, sa širokim rasponom dužina i broja potrošača koji su priključeni), i sve vrste energetskih transformatora 10(20,35)/0,4 kV (u rasponu snaga od 50 kVA do 1000 kVA, sa karakteristikama tipičnim za elektrodistributivnu mrežu EDB).

U mreži 10(20) kV obuhvaćeni su i kablovski i nadzemni vodovi sa dužinama tipičnim kako za područja sa velikom tako i za područja sa malom površinskom gustinom opterećenja (kablovski vodovi 10(20) kV dužine od 1 – 5 km, i nadzemni vodovi 10(20) kV dužine od 1 - 15 km). Pri tome se vodovi opterećuju do granice sigurnosti u složenoj mreži.

Na transformaciju X/10(20,35) kV vezan je širok raspon ukupnog broja vodova 10(20) kV (od 3 do 20 po energetskom transformatoru) a karakteristike transformatora 35/10 kV, 110/10 kV i 110/20 kV su tipične za sistem Srbije. Takođe, razmatrani su i modeli mreže sa kablovskim i nadzemnim vodovima 35 kV i transformacijom 110/35 kV u širokom rasponu dužina vodova (od 1 do 30 km) i karakteristika transformatora (raspon snaga od 20 MVA do 100 MVA).

U mreži 110 kV obuhvaćeni su i kablovski i nadzemni vodovi sa rasponom dužina od 1 km do 10km za kablovske, i rasponom dužina od 15 km do 100 km za nadzemne vodove. Električni parametri vodova su tipični za konzum EDB (sa kablovskim vodovima sa domaćeg i inostranog tržišta). Pri tome se vodovi opterećuju do granice sigurnosti u složenoj mreži.

Transformaciju 380/110 kV čine autotransformatori snage 300 MVA (TS snage 2 x 300 MVA) sa adekvatnom mrežom 110 kV sa kablovskim ili nadzemnim vodovima i odgovarajuće dimenzionisanim distributivnim delom mreže.

Prenosnu mrežu čini nadzemni DV 380 kV dužine 100 km preseka 2 x (3x 490/65) mm². Posebno su razmatrane dužine vodova 380 kV oko 50 km i 400 km – sa stalnom vrednošću faktora snage na kraju dalekovoda (reda 1 i 0,9)

Električni parametri vodova i transformatora dati su u tabelama I i II, a kapacitivne i induktivne snage kablovskih i nadzemnih vodova svih napona po kilometru dužine su prikazane na sl. 1.

Tabela I – Električni parametri vodova

KABLOVSKI VODOVI					
Naponski nivo	Vrsta voda	R [Ω/Km, f]	X [Ω/Km, f]	B [μS/Km, f]	Oznaka na crtežu
110 kV	Papirno-uljni kabl 300 Cu	0,0716	0,109	119	2
	XHE-1000 AL	0,0409	0,111	75,36	3
	Papirno-uljni kabl 500 CU	0,053	0,103	157	1
	Papirno-uljni kabl 500 CU	0.0469	0.175	182.7	-
35 kv	95-Cu	0,234	0,138	86,35	6
10 kV	95-Cu	0,231	0,098	135	7
	150-Al	0,248	0,092	169	-
	240-Al	0,0954	0,089	210	-
0,4 kv	95-Cu	0,233	0,074	-	-
	150-Al	0,25	0,072	-	-
NADZEMNI VODOVI					
400 kV	2x490/65	0,029	0,341	3,371	4
220 kv	490/65	0,06	0,415	2,66	5
110 kV	150/25	0,184	0,436	2,61	-
	240/40	0,119	0,396	2,88	8
35 kV	AlČe 70	0,435	0,375	3,04	9
10 kV	AlČe 70	0,435	0,35	3,27	10
0,4 kv	Al 50	0,6	0,36	-	-

3. KRETANJE FAKTORA SNAGE U MODELIMA ELEKTRODISTRIBUTIVNE I PRENOSNE MREŽE

Faktor snage potrošača na sabirnicama 0,4 kV u TS 10(20)/0,4 kV (sl. 2) ima stalne diskretne vrednosti reda 1; 0,95; 0,9; 0,8 i 0,7 pri svim opterećenjima potrošača koji su priključeni na mrežu niskog napona.

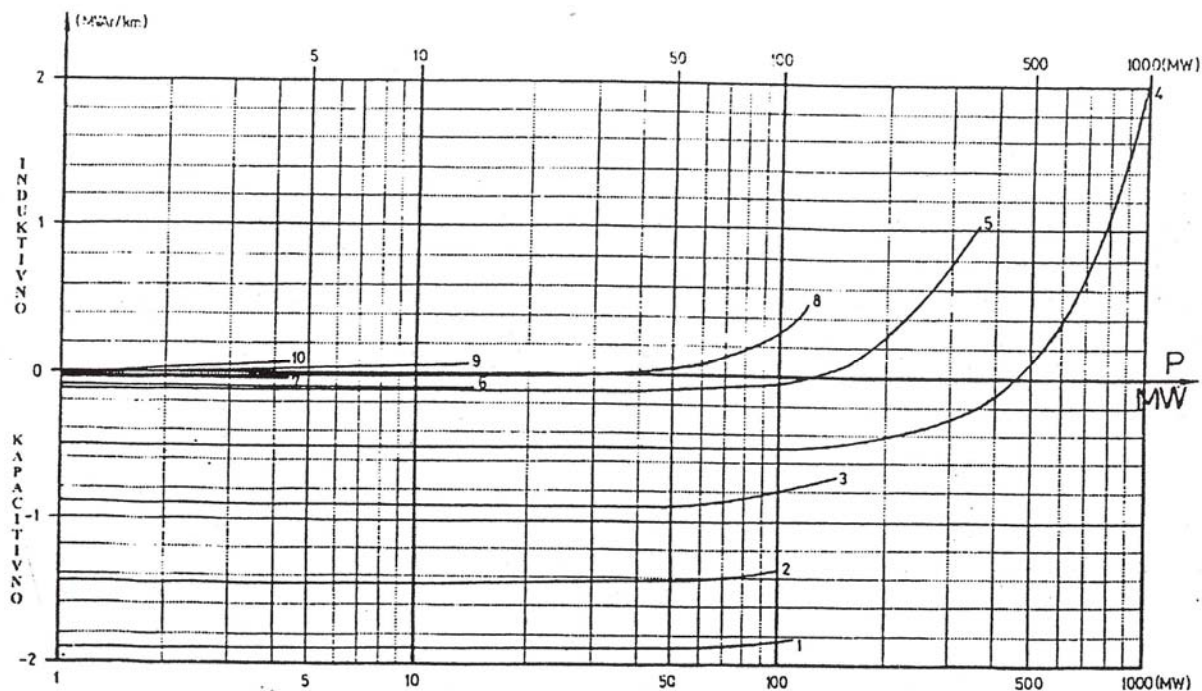
Opsezi u kojima se kreće faktor snage na sabirnicama 10(20) kV u TS 10(20)/0,4 kV su prikazani na sl. 3. Očigledno je da niskonaponski i sredjenaponski deo elektrodistributivne mreže ne utiče bitno na promenu vrednosti faktora snage potrošača iz mreže 0,4 kV.

Opsezi u kojima se kreće faktor snage na sabirnicama 10(20) kV i 110 kV u TS x/10(20) kV su prikazani na sl. 4 i sl. 5.

Opsezi u kojima se kreće faktor snage na sabirnicama 380 kV u TS 380/110 kV su prikazani na sl. 7.

Tabela II - Karakteristike energetskih transformatora na konzumu EDB

Prenosni odnos (kV)	Naznačena snaga (MVA)	Naznačeni gubici u bakru (kW)	Naznačeni gubici u gvožđu (kW)	Struja praznog hoda (%)	Napon kratkog spoja (%)		
					1-2	1-3	2-3
10/0,4 (0,42)	0,05	1,1/0,94	0,19/0,16	2,6	4		
10/0,4 (0,42)	0,1	1,75/1,5	0,32/0,27	2,5	4		
10/0,4 (0,42)	0,16	2,35/2	0,46/0,39	2,3	4		
10/0,4 (0,42)	0,25	3,25/2,75	0,65/0,55	2,1	4		
10/0,4 (0,42)	0,4	4,6/3,9	0,93/0,79	1,9	4		
10/0,4 (0,42)	0,63	6,5/5,9	1,3/1,1	1,8	4		
10/0,4 (0,42)	1	13,5/10,5	1,75/1,48	1,4	6		
35/10,5	4	29,3	4,93	0,377	6		
35/10,5	8	50,7	8,15	0,287	7,05		
35/10,5	12,5	71,6 (44,6)	11,8 (11,3)	0,29 (0,431)	7,24 (5,8)		
110/10,5	31,5/31,5/10,5	174,8	25,4	0,35	15,68		
110/10,5	40	227,9	25,4	0,122	20 (18)		
110/36,75	31,5/31,5/10,5	124	28	0,2	11,62	10,49	9,8
110/36,75	63/63/20,5	254	49	0,137	12,16	11,24	10,45
110/36,75	100/100/40	411	67	0,16	20,41	11,6	7,975
110/36,75/10,5	31,5/21/21	79,71/91,71/74,1	24,62	0,19	9,24	14,16	3,81
220/120	AT 50/50/16,7	193,6	49,4	0,7	12,2	7,1	2,26
220/115	AT 150/150/50	336,4	85,8	0,2	12,3	13,4	8,1
220/115	AT 250/250/50	505,7	98,75	0,2	14,23	9,68	6,92
400/115	AT 300	683	139,6	0,093	12,6		
400/231	AT 400/400/100	728,7	136	0,28	12,4	18,59	14,17



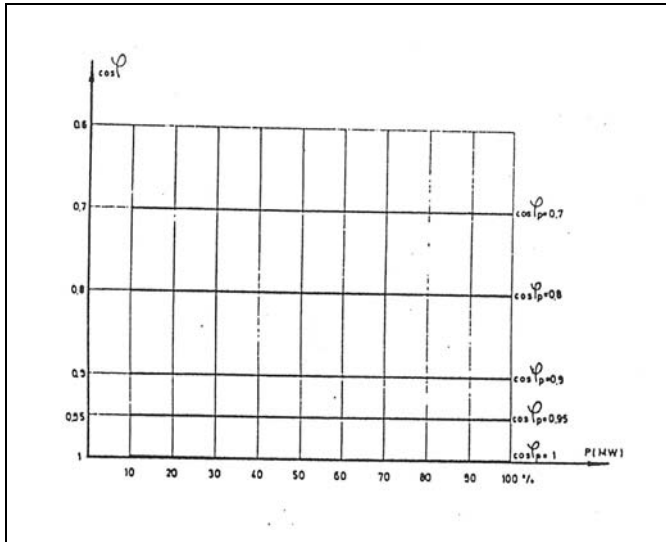
Sl. 1 – Kapacitivne i induktivne snage kablovskih i nadzemnih vodova po kilometru dužine u funkciji od aktivnog opterećenja kojim se terete

Opsezi u kojima se kreće faktor snage na početku DV 380 kV dužine 100 km su prikazani na sl. 8. Očigledno je da mreža 380 kV svojom kapacitivnošću pri malim opterećenjima konzuma popravlja faktor snage u mreži, a da pri velikim opterećenjima konzuma mreža 380 kV svojom induktivnošću doprinosi induktivnom karakteru faktora snage u mreži.

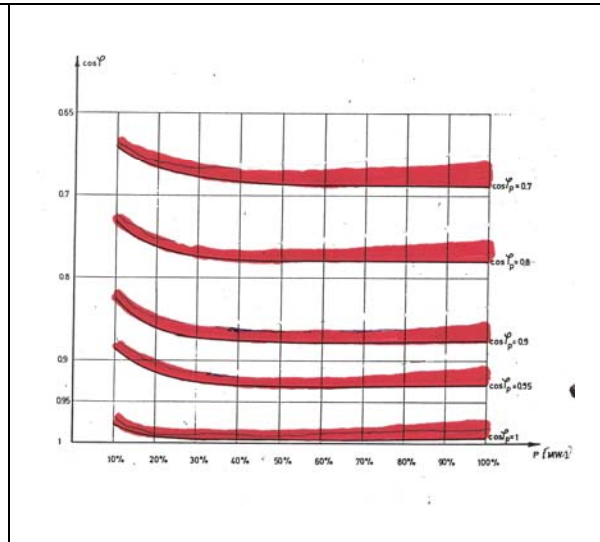
Prema tome, zaključuje se da se opseg u kome se kreće faktor snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema značajno proširuje ukoliko se povećava razlika između najvećeg i najmanjeg opterećenja mreže.

Takođe, dijagrami kazuju da je uvođenje regulisane kompenzacije reaktivne snage u elektrodistributivnoj mreži u ovim uslovima neophodno, a da se stalna – neregulisana kompenzacija reaktivne snage u elektrodistributivnoj mreži mora uvoditi samo na područjima sa puno opterećenom i enormno dugačkom nadzemnom elektrodistributivnom mrežom.

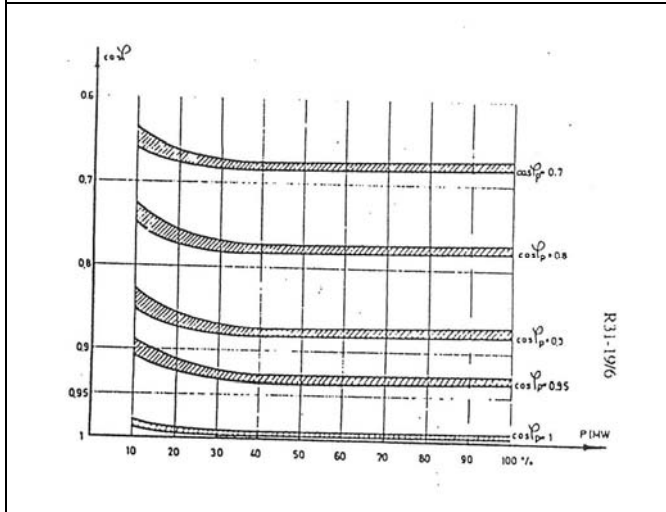
Slični su zaključci i za sistem napajanja 110 kV, 20 kV i 0,4 kV.



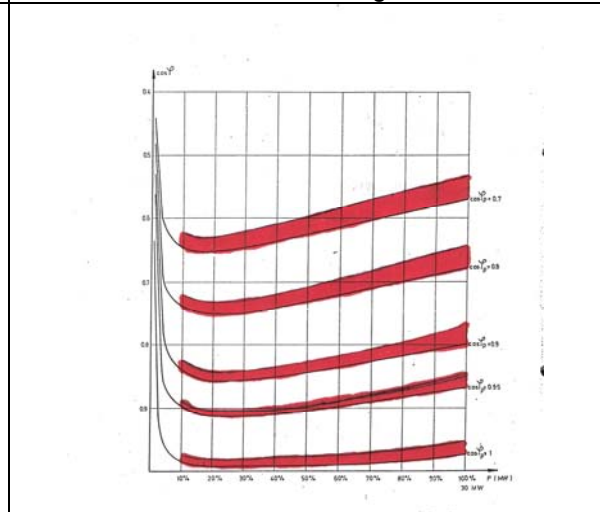
Sl. 2 - Faktor snage na sabirnicama 0,4 kV u TS 10(20,35) /0,4 kV u funkciji od aktivne snage



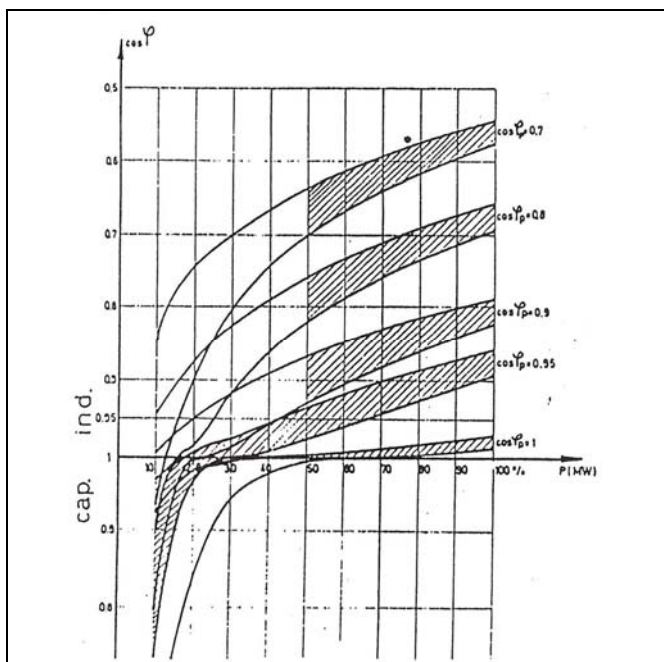
Sl. 3 - Faktor snage na sabirnicama 10(20,35) kV u TS 10(20,35) /0,4 kV u funkciji od aktivne snage i pri diskretnim vrednostima faktora snage na 0,4 kV



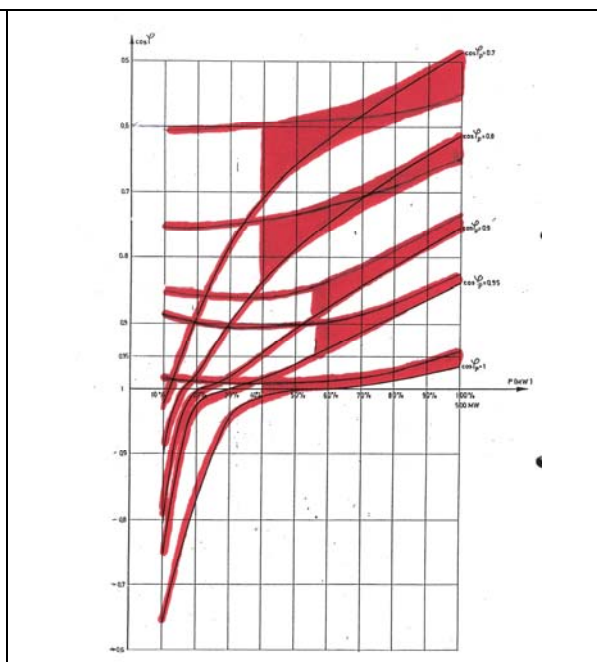
Sl. 4 - Kretanje faktora snage na sabirnicama 10(20,35) kV u TS X/10(20,35) kV u funkciji od aktivnog opterećenja potrošača i pri diskretnim vrednostima faktora snage na 0,4 kV



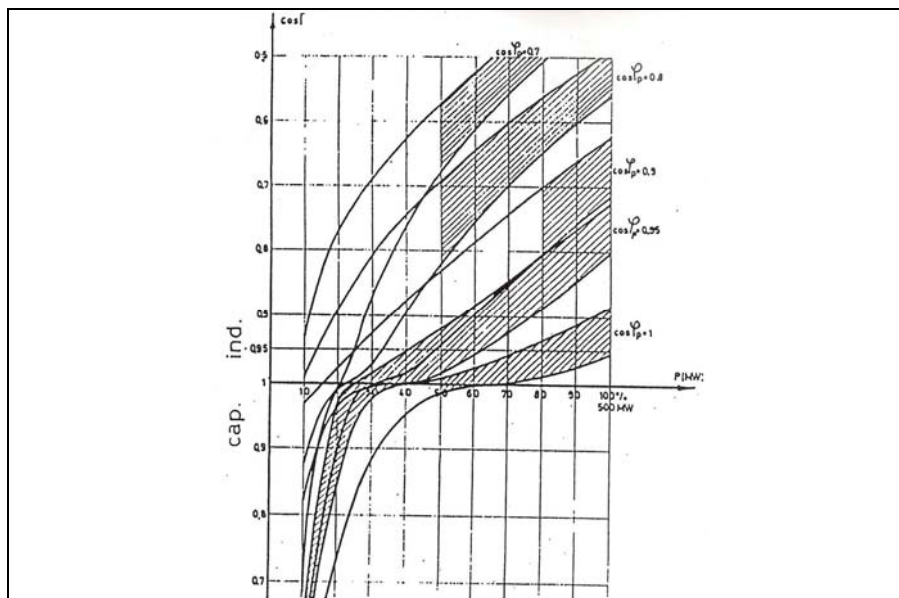
Sl. 5 - Kretanje faktora snage na sabirnicama 110 kV u TS 110/10(20,35) kV u funkciji od aktivnog opterećenja potrošača i pri diskretnim vrednostima faktora snage na 0,4 kV



Sl. 6 - Kretanje faktora snage na sabirnicama 110 kV u TS 380/110 kV u funkciji od aktivnog opterećenja potrošača i pri diskretnim vrednostima faktora snage na 0,4 kV



Sl. 7 - Kretanje faktora snage na sabirnicama 380 kV u TS 380/110 kV u funkciji od aktivnog opterećenja potrošača i pri diskretnim vrednostima faktora snage na 0,4 kV



Sl. 8 – Kretanje faktora snage na početku nadzemnog dalekovoda 380 kV dužine 100 km u funkciji od aktivne snage i pri diskretnim vrednostima faktora snage potrošača na 0,4 kV

4. UTICAJ MREŽE 380 kV NA KRETANJE FAKTORA SNAGEU PROIZVODNOM DELU ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Uticaj mreže 380 kV na kretanje faktora snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema je veoma značajan u čitavom energetsom sistemu.

Ovde je ovaj uticaj prikazan na sl. 9 i sl. 10 gde je pri stalnim vrednostima faktora snage na kraju dalekovoda ($\cos\varphi_p = 1$ na sl. 9, i $\cos\varphi_p = 0,9$ na sl. 10) varirana dužina dalekovoda sa 50 km, na 100 km i 400 km, te dobijene vrednosti faktora snage na početku dalekovoda.

Upoređenjem dijagrama na sl. 9 i sl. 10 sa dijagramom na sl. 8 zaključuje se da kapacitivnost i induktivnost mreže 380 kV, odnosno njena ukupna dužina, najznačajnije utiču na kretanje faktora snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema. Ukoliko se dalekovodi u mreži 380 kV opterećuju do prirodne snage i ukoliko nisu velike razlike između najvećeg i najmanjeg opterećenja konzuma, može se čak postaviti pitanje opravdanosti uvođenja uređaja za kompenzaciju reaktivne snage u elektrodistributivnoj mreži sa aspekta regulacije faktora snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema, s obzirom na to da se faktor snage u mreži 380 kV kreće tada u sasvim zadovoljavajućem opsegu.

Međutim, u našim uslovima, zahtevi tranzita električne snage kroz mrežu 380 kV mogu da postave još strože zahteve za uvođenje uređaja za kompenzaciju reaktivne snage u mrežama.



5. ZAKLJUČAK

Na očigledan način su prikazane zakonitosti u kretanju faktora snage kroz sve naponske nivoe u elektrodistributivnoj i prenosnoj mreži.

Uticaj niskonaponske i sredjenaponske elektrodistributivne mreže je pri tome zanemarljiv, međutim visokonaponske elektrodistributivne i prenosne mreže, svojom kapacitivnošću i induktivnošću, značajno proširuju opseg kretanja faktora snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema. Kapacitivnost vodova popravља faktor snage pri malim opterećenjima mreže, a induktivnost transformatora i vodova dolazi do izražaja pri većim opterećenjima mreže te doprinosi induktivnom karakteru faktora snage u mreži.

Pokazano je da su elektrodistributivni i prenosni deo elektroenergetskog sistema međusobno u veoma složenoj zavisnosti i da mreža 380 kV (njena ukupna dužina i izgrađenost sa aspekta sigurnosti) ima nesumnjivo najznačajniji uticaj na kretanje faktora snage u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema.

Sugestija je autora ovog rada da treba u propisima i normativima, kao i standardima, definisati potreban precizan opseg u kome treba da se kreće faktor snage na svim naponskim nivoima elektrodistributivne i prenosne mreže te u proizvodnom delu elektroenergetskog sistema.

KORIŠĆENA LITERATURA

- (lit. 1) **Dr. S. Despotović, el. ing.** Osnovi analize elektroenergetskih sistema, knjiga, Beograd, 1962
- (lit. 2) **T. Milanov, dipl. el. ing, S. Maksimović, dipl. el. ing.** - Joule-ovi gubici i padovi napona u modelima elektrodistributivne i prenosne mreže, JUKO CIGRE, 21 Savetovanje, Vrnjačka Banja, 1993. referat broj 31 – 16
- (lit. 3) **T. Milanov, dipl. el. ing, S. Maksimović, dipl. el. ing.** - Uticaj faktora snage potrošača i uvedene kompenzacije na stalnost napona u elektroenergetskom sistemu, Časopis „Elektrodistribucija“, br. 3, 1991, str. 138 -147
- (lit. 4) **Prof. Dr. M. Čalović, dipl. el. ing.** - Savremene tendencije u upravljanju naponima, proizvodnjom, apsorpcijom i tokovima reaktivnih snaga u prenosnim mrežama, Časopis „Elektroprivreda“, god. XLIII, br. 7 – 8 str. 249 -264
- (lit. 5) **I. A. Erinmez** - Results of an international survey on reactive power in interconnected power systems, part I: reactive power and system characteristics, Electra, March 1983, No. 87; **A. Invernizzi, part II** - planning practices for voltage and reactive power control, Electra, March 1984., No. 93
- (lit. 6) **M. Ernout, J. Verseille** - Conferences sur la tenue de la tension et la compensation de l'energie reactive sur les reseaux de transport et de distribution, Publikacija, Ljubljana, 1989.
- (lit. 7) **GEC** - Variable static equipment for electricity transmission and distribution systems a selection of literature
- (lit. 8) **S. E. Haque, N. H. Malik, W. Shepherd** - Operation of a fixed capacitor – thyristor controlled reactor (FC – TCR) power factor compensator, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No, 6, June 1985., p.p. 1385 – 1390
- (lit. 9) **T. Milanov, dipl. ing, S. Maksimović, dipl. ing.** - Kretanje faktora snage u modelima elektrodistributivne i prenosne mreže, JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, 1995, R. 31-19